ID: 12661

# Stabilisering av friktionsjord genom injektering av CIPS

Calcite In-situ Precipitation System

**Anders Palmén**

**2013-03-18**

SBUF stödjer
forskning & utveckling
som leder till
praktisk handling

# Förord

Denna rapport är en översättning av det examensarbete som skrivits på engelska med titeln: *Stabilization of frictional soil through injection using CIPS*.

Det finns många människor och organisationer att tacka och visa tacksamhet till för att hjälpa och stöttat mig i min resa med att skriva och slutföra detta examensarbete.

Jag har haft den stora möjligheten att lära känna och arbeta med Morgan Axelsson på PEAB Sverige AB, som har varit min handledare och mentor under denna process. Morgan och PEAB har stöttat detta projekt inte bara med sin tid och kunskap, utan också med ett kontor att arbeta från. Jag vill också tacka Per Björnfot, platschef för Peab Sverige AB för att ordnat ett utrymme inom hans byggarbetsplats för genomförandet av fältförsöket och även för att ha hjälpt mig med nödvändig utrustning för schaktning.

Dr Graham Price, grundare av Lithic Ltd Pty och tidigare forskare vid CSIRO. Stort tack till honom för hans hjälpsamhet och tålamod med att assistera och skriva svar på alla mina många e-postmeddelanden som innehåller en massa frågor om allt från logistik till detaljerad kemi. Även många tack för att öppna upp och visat mig kemin, metoden och tekniken bakom CIPS. Sist men inte minst är jag också mycket tacksam för att ha haft nöjet att vistas som gäst hos Dr Price och hans fru Janet och deras generositet med att ha mig som deras gäst i deras hem under dagarna Dr Price visade mig detaljer i CIPS och förfarandet av den kemiska blandningsprocessen.

För det tredje finns det en hel del människor och företag vill jag tacka för hjälp med inskaffande av kemikalier och utrustning för både laboratorieexperiment och fältförsök.

- Tomas Eriksson på Tetra Chemicals tillhandahöll material inom det specifika området och hjälpte till att ordna Kalciumklorid för laboratorieexperimentet och fältförsöket.
- Mathias Gustafsson på Hanson & Möhring för hjälp av inköp och beställning Urea.
- Per Carlsson på SWECO GeoLab för vänlighet och utlåning av utrustning och utförande av geotekniska analyser.
- Henrik Johansson på TEMAG pumpar för hjälp att hitta rätt membranpump för fältförsöket samt hjälp med nyttig information angående olika pumpsystem.
- LM Inredning, ett utställnings- och inredningssnickeri, tillika min tidigare arbetsgivare, som har hjälpt mig med plats i en verkstad där jag kunde skapa och utveckla laboratorieutrustningen samt montera pumpsystemet, men även för utlåning av utrustning och transporter.
- Lambertsson verktyg och maskinuthyrning, för att låta mig använda deras verkstad. Även för att ta sin tid att hitta lämpliga tankar för att lagra CIPS-vätskorna i.

Slutligen stort tack till Fredrik Clifford på Vectura som hjälpte mig att organisera geotekniska sonderingar och utvärderingar av jordparametrar, vilket gav viktiga uppgifter för både mina laboratorietester och mina bedömningar av resultat från fältförsöket.

Stockholm, tisdag, 19 mars 2013

# Abstract

The precipitation system CIPS (Calcite In-situ Precipitation System) has been created as a permeation grouting system based on a two component fluid with the intention of slowly permeate and fill the pores. It causes cementation through a chemical reaction which bonds the soil particles together at the contact points. CIPS mimics one of the natural reactions in nature where sandstone is formed through calcite precipitation. This system is used in Australia with excellent results and there are many factors governing the outcome of the method, some of these factors are: flow rate, pressure, time, chemical recipe, temperature, composition of the soil matrix and number of performed injections at the same point of location. Some of these factors have been the focus of this report and where they have been examined from a Scandinavian point of view where our ground temperature conditions and soil compositions have governed the outcome of the accomplished results.

The strength increase has been examined through laboratory tests where natural sand from a building site with known particle size and dry density has been treated once with the CIPS Fluid. This treatment was completed in a temperature controlled room of 12 degrees after which the treated soil was tested by unconfined compression tests. Even a rather low increase in bearing capacity of the soil would result in benefits during the construction of temporary constructions during the early building stages foundation work. Since the desired increase in bearing capacity of the soil is fairly low, 50-100 kPa, the investigations has concentrated on one single injection, in order to study if there is a clear trend in the increase in bearing capacity, and if it can be roughly predicted.

In addition to the above mentioned laboratory work a small scale field test has been conducted, where the CIPS Fluid was injected into the ground with the aim of creating a column shaped object. This column was left for a certain time, a time long enough for the calcite crystal to bond the soil grains and generate an increase in strength. When the assumed cementation had occurred an ocular assessment was carried out in order to predict whether the strength had increased or not, and to what degree.

Based on the laboratory results, some evidence of that strength increase occurs due to either the discharge of the spent fluid containing ammonium chloride or the process of drying. Either way, the strength increase takes place during the grounds natural process of adjusting towards the natural water content equilibrium for the specific site of interest. A strength increase at the laboratory experiments of between approximately 60-220 kPa has been achieved.

The field tests where slightly less rewarding when difficulties of injecting the CIPS Fluid into the sandy soil arose due to challenging task of designing a pumping system where both a low pressure, less than the overburden pressure, and a low flow rate, less than 7 litres per minute, could be controlled. The flow rate could be controlled but with the effect of the pressure rising to too high levels. Due to the observations of CIPS Fluids exiting the ground at other points than near the injection spear, soil fractures are assumed to have occurred at one ore many locations. The volumes treated with CIPS Fluid displayed no increase in strength as long as they appeared somewhat wet with the spent fluid. When this fluid containing ammonium chloride vanished from the treated soil and the pH-value dropped, the build up in strength through calcite crystallisation at the contact points began. This crystallization which leads to a cementation was observed at the centre of the small spheres achieved through injection in the ground, which proves that the Calcite In-situ Precipitation System has caused a cementation of the soil grains treated.

# Sammanfattning

CIPS (Calcite In-situ Precipitation System) som är ett injekteringssystem (”permeation grouting”) som är konstruerat så att den injekterade 2-komponentsvätskan långsamt skall fylla porerna och genom en kemisk reaktion cementera jordkornen vid dess kontaktytor. Den kemiska reaktionen, som efterliknar den naturliga processen där sandsten bildas, åstadkommer en cementering genom att enzymet Ureas reagerar med kalciumklorid och urea vilket leder till en utfällning av kalsitkristaller runt kornens och dess kontaktpunkter. Denna process bevarar permeabiliteten hos materialet.

Systemet är utvecklat i Australien där det används med goda resultat, dock i ganska begränsad omfattning. Det är många faktorer som styr resultatet av behandlingen: flödeshastigheten, injekteringstrycket, tiden, kemiska receptet, temperaturen, sammansättningen av jorden samt antal injekteringar/behandlingar vid samma injekteringspunkt. De tre sistnämnda faktorerna kommer att vara fokus för denna rapport och de undersöks med en Skandinavisk synvinkel där hänsyn tas till rådande marktemperatur och jordsammansättning vilket troligtvis kommer att styra det slutliga resultatet.

Även en relativt låg tryckhållfasthet erhållen genom CIPS skulle leda till stor nytta i form av ökad bärighet/ stabilitet vid exempelvis schakter eller grundkonstruktioner för ett byggprojekt. Målet är en hållfasthetsökning på enbart runt 50-100 kPa, varför undersökningarna fokuserades på endast en inblandning/”injektering”. Detta valdes även av ekonomiska skäl då kostnaden för flera injekteringar är väsentligt högre och metoden då inte skulle vara lika konkurrenskraftig.

Tryckhållfasthetsökningen undersöktes genom laboratorieförsök där den analyserade sanden hämtades från en byggarbetsplats i Handen i Haninge. Efter justering av partikelstorlek och kontroll av torrdensiteten behandlades denna naturliga sand med CIPS-vätskan i ett kylrum med en temperatur på 12°C. Efter varierad tid och temperatur testades proverna avseende enaxlig tryckhållfasthet. En tryckhållfasthet på mellan 60-220 kPa uppmättes vid lab-försöken.

Den avslutande delen av denna rapport fokuserar på ett fältförsök där CIPS-vätska injekterades i marken för att försöka skapa en pelare. Injekteringen lämnades för att härda i marken en viss tid för att tillräcklig hållfasthet skulle hinna uppstå vid kontaktpunkterna. Därefter utfördes okulärbesiktning och upptagning av provkroppar.

Baserat på lab-undersökningarna finns bevis för att viss cementering uppstår såväl vid högre, som vid lägre temperaturer (12°C). Indikationer finns även på att överskottsvätskan, bestående av ammoniumklorid och vatten, sannolikt måste avgå, alternativt att proverna måste torka, för att en ökning i hållfasthet skall uppstå.

Fältförsöket gav en något sämre utdelning då det fanns svårigheter med pumpsystemet. Svårigheterna låg i att kunna hålla ett tryck som understiger det rådande konsolideringstrycket samt ett tillräckligt lågt flöde. Flödet kunde kontrolleras till lägre nivåer, men detta medförde att trycket i systemet samt i marken ökade till för höga nivåer, vilket ledde till svårigheter med injekteringen. På grund av att CIPS-vätska strömmade upp ur marken på andra ställen än längs injekteringsröret så antas att jordbrott skett på ett eller flera ställen. De sandvolymer som behandlades med CIPS visade inte någon ökning i hållfasthet så länge som de fortfarande innehöll överskottsvätska. När denna överskottsvätska, som innehåller ammoniumklorid, har avgått från den behandlade volymen och pH-värdet sjunkit så verkar cementeringen starta. Denna utfällning av kalcitkristaller som leder till en cementering av jordkornen observerades i mitten av de små sfärerna som skapats vid injekteringen. Detta visar att systemet som bygger på kalcitutfällningar har nått resultat men att åtskilligt arbete kvarstår för att utveckla bland annat pumpmetodiken. Sannolikt krävs även att man utför mer än *en* injektering för att få en önskad cementeringseffekt i fält. Labförsöken visar dock tydligt att det är möjligt att åstadkomma under de kontrollerade former som råder i ett laboratorium.

# Innehållsförteckning

**INNEHÅLLSFÖRTECKNING ..... 1**
**KAPITEL 1 INLEDNING ..... 3**
1.1 CIPS - CALCITE IN-SITU PRECIPITATION SYSTEM ..... 3
1.2 SYFTE OCH BEGRÄNSNING ..... 3
1.3 KRAV OCH BEGRÄNSNINGAR ..... 4
1.4 MÅL ..... 4
1.5 METOD ..... 4
1.6 STRUKTUR AV RAPPORTEN ..... 4
1.7 TERMINOLOGI ..... 5
**KAPITEL 2 MÖJLIGA ANVÄNDNINGSOMRÅDEN FÖR CEMENTERING MED KALCITUTFÄLLNING ..... FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.**
2.1 ANVÄNDNINGEN AV CIPS TEKNIKEN ..... **FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.**
2.2 FÖRDELARNA MED CIPS ..... 23
**KAPITEL 3 STUDIE AV EXISTERANDE KALCITUTFÄLLNINGSMETODER ..... 6**
3.1 DEN NATURLIGA PROCESSEN MED UTFÄLLNING AV KALCIT ..... 6
3.2 BIOGROUT – MICP (MICROBIAL INDUCED CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION) ..... 7
3.2.1 Kemisk process och metod ..... 7
3.2.2 Test resultat ..... 8
3.2.3 Osäkerheter med MICP ..... 12
3.3 CIPS – CALCITE IN-SITU PRECIPITATION ..... 13
3.3.1 Den kemiska processen ..... 13
3.3.2 Viktiga parametrar för ett gott resultat ..... 16
3.3.3 Applikationsprocessen, In-situ ..... 20
3.3.4 Hittills uppnådda resultat ..... 21
3.3.5 Osäkerheter med CIPS ..... 23
**KAPITEL 4 LABORATORIET UTVÄRDERING ..... 26**
4.1 TEMPERATUR FÖRHÅLLANDEN ..... 26
4.2 JORDPARAMETRAR IN-SITU ..... 26
4.3 BEREDNINGSTEKNIKER FÖR KÄRNPROVER ..... 28
4.4 ENAXLIGA TRYCKHÅLLFASTHETSTESTER, UCS ..... 31
4.5 RESULTAT ..... 33
4.6 DISKUSSION ..... 37
**KAPITEL 5 FÄLTFÖRSÖK ..... 39**
5.1 POSITIONEN FÖR FÄLTFÖRSÖKET ..... 39

5.2 LOKAL POSITIONERING AV FÄLTFÖRSÖKSPLATSEN ..... 40
5.2.1 De olika testerna ..... 40
5.3 UTRUSTNING ..... 42
5.4 METOD ..... 44
5.5 RESULTAT ..... 45
5.6 DISKUSSION ..... 47
**KAPITEL 6 ALLMÄN DISKUSSION ..... 50**
**KAPITEL 7 VIDARE STUDIER ..... 56**
**REFERENSER ..... 57**
**BILAGOR ..... 62**

# Kapitel 1

# Inledning

Med en konstant växande population och med konstruktioner där den byggda miljön blir mer och mer extrem (DeJong et al. 2010; Fauriel and Laloui 2011), så är det av stor nytta att kunna förbättra jordens egenskaper genom olika injekteringsmetoder (v. Wijngaarden et al., 2011) för att skapa tillräcklig stabilitet för bl.a. grundkonstruktioner. Flera av dessa injekteringsmetoder är inte helt miljövänliga (Karol 2003; Rong et al. 2010), och andra metoder bidrar till en osäkerhet i bedömningen de alternerade jordparametrarnas (DeJong et al., 2010) och ytterligare andra metoder kan helt enkelt inte användas i projekt där utrymmet är väldigt begränsat och etableringen av maskiner etc. tar för stor plats (CSIRO 2011; Paassen et al. 2009).

En annan viktig aspekt är människans påverkan på naturen och hur människor värden över kan hjälpa till att minska överutnyttjande av naturens resurser. Enligt Jonkers (2009) citerad i Gonsalves (2011) arbete uppgår den totala produktionen av växthusgasen $CO_2$, som härstammar från produktionen av cement, till 10 % av de värdens totala utsläpp av $CO_2$. Detta konstaterande ger upphov till att understryka behovet av nya alternativa material till betong med en mindre påverkan på naturen, speciellt för konstruktioner som inte behöver utnyttja betongs fulla styrk utan skulle klara sig med mycket lägre hållfasthet.

Målsättningen med denna rapport är att skapa en grundlig kunskap om hur CIPS fungerar samt att skaffa en viss förståelse för den kemiska processen av kalcitutfällning och urea-hydrolys, vilka är de grundläggande processerna som styr CIPS-metoden.

## 1.1 CIPS - Calcite In-situ Precipitation System

I början av 1980-talet under kommersialiseringen av området North-West Shelf vid Australiens västkust vid byggnationen av gas-plattformen North Rankine A uppstod konstruktionsmässiga svårigheter. Ingenjörer upptäckte att friktionspålarna inte hade utvecklat tillräcklig friktion/bindning med kringliggande bottensediment. Ett team bestående av både geologer, geotekniker och kemister kontrakterades för att lösa detta problem. Arbetet resulterade senare i det nya ”permeation grouting”-systemet CIPS, vilket åstadkommer cementering av porösa material genom utfällning av kalcitkristaller (CSIRO, 2011).

Metoden CIPS använder sig av två vattenbaserade vätskor som innehåller *Kalciumklorid, Urea, Tetrasodium, Natriumkarbonat, Natriumsulfit* samt *enzymet Ureas*. När dessa två vätskor blandas och injekteras (med ett max tryck motsv. konsolideringstrycket), så sprider sig vätskan i marken för att skapa ett sfäriskt cementerat objekt runt injekteringspunkten. Denna cementering åstadkoms genom de kalcitkristaller, som bildas på kornens ytor, vilka binder samman kornen vid dess kontaktytor. Flera injekteringar vid samma punkt kommer att leda till större kontaktytor mellan jordpartiklarna (Dr Price, 2012). Dr Price (2012) beskriver att hållfastheten i finsand sträcker sig mellan 2-40 MPa för 1-8 injekteringar. Dr Price (2012) fortsätter med att påpeka att den cementerade sanden får samma egenskaper som naturlig sandsten med en bibehållen porositet.

## 1.2 Syfte och begränsning

CIPS har tills denna dag endast använts i Australien och denna rapport kommer att undersöka potentialen med att använda CIPS i svenska friktionsjordar. För att skaffa förståelse för de bakomliggande teorierna och procedurerna till CIPS så kommer en litteraturstudie genomföras. Denna litteraturstudie kommer att innehålla en del där ovan nämnd metod kommer att bedömas och jämföras med Biogrout- metoden (MICP – Microbial

Induced Calcium carbonate Precipitation) vilken använder sig av bakteriekulturen Bacillus pasteurii för att starta kalcitutfällningen i marken.

## 1.3 Krav och begränsningar

En av de främsta begränsningarna i detta arbete är att denna studie faller mellan ramen för två olika forskningsområden, biokemi och geoteknik. På grund av att jag har min bakgrund inom anläggning och geoteknik så besitter jag inte tillräckligt med kunskap inom biokemi för att fördjupa mig i den detaljerade bakomliggande kemin och eventuellt alternera vissa parametrar för att passa de nya annorlunda markförhållanden som råder i Sverige gentemot Australien.

Nästa begränsning är att denna studie ”endast” är ett examensarbete, som bara har omfattningen av en termins studier vilket även det begränsar omfattningen till en mera introducerande och övergripande studie som utreder ifall denna metod lämpar sig för applikation i Sverige. Det har inte heller funnits tid att undersöka mängden kalciumklorid som fäller ut i varje provkropp, detta anses inte heller som det primära målet med denna rapport då fokus ligger på att undersöka hur metoden ter sig i fält. Tidsbristen har även resulterat i att treaxliga tryckförsök har fått strykas och fokus lagts på att skapa en mängd enaxliga tryckförsök för att få tillräckligt med data för att göra en tillräcklig utvärdering för att kunna urskilja trender och resultat

## 1.4 Mål

Målet med denna studie är att fastställa om CIPS är en lämplig metod för användning i Skandinaviskt klimat och i de friktionsjordar som är vanligt förekommande i byggprojekt här. Beroende på resultaten från laboratorie- och fältarbetet så kommer en diskussion presenteras i vilken olika potentiella applikations områden för CIPS kommer att presenteras, både från en teknisk samt ekonomisk vinkel.

## 1.5 Metod

För att utföra utvärderingen av CIPS-metoden behöver ett antal enaxliga tryckhållfasthetstester genomföras vilka kommer att ge en första indikation av beteendet och egenskaperna hos den behandlade skandinaviska sanden. Om dessa tester ger tillfredställande resultat så kommer även ett mindre fältförsök att verkställas där CIPS kommer att injekteras och den stabiliserande effekten bedömas. Det är väldigt intressant att undersöka om denna metod är användbara i ett mycket kyligare klimat än det i Australien. Om utfallet klarlägger en tydligt och tillfredställande hållfasthetsökning så kommer potentialen av tillämpningen i byggprojekt eventuellt bli betydelsefull.

## 1.6 Struktur av rapporten

Detta examensarbete är strukturerat enligt följande:

- Kapitel 2 innehåller en studie av tre liknande processer: naturlig utfällning av kalcit, Biogrout och CIPS. Kemin och mekanismerna bakom dessa processer är beskrivna i detta kapitel.
- Kapitel 3 presenterar laborationsarbetet och redovisar resultaten från dessa tester.
- Kapitel 4 förklarar hur fältundersökningen är utförd samt de resultat som har uppnåtts
- Kapitel 5 kommer att diskutera vad de uppnådda resultaten samt hur de kan underlätta
- Kapitel 6 belyser de ämnesområden som behöver vidare studier och arbete.

## 1.7 Terminologi

För att underlätta och spara tid för de läsare som inte är bekanta med frekvent använda ord inom kemins värd så följer här en lista på kemiska termer som används i denna rapport.

*Alkalinitet* – mäter förmågan hos en lösning för att neutralisera syror till ekvivalenspunkten av karbonat eller bikarbonat.

*Amorf struktur* – är en solid som saknar en ordnad positionering av ämnets atomer. Glas är en amorf struktur som omvandlas till en vätska när det hettas upp.

*Biomassa* – är en massa av levande biologiska organismer. Biomassa är organiskt material som kommer från växternas fotosyntes

*Biotisk* – beskriver en levande komponent av en koloni; t.ex. organismer så som plantor och djur.

*Celler i suspension* – cellerna ligger löst i cellodlingsmediumet antingen som aggregat eller som lösa celler, motsatsen är adherenta celler som är vidhäftade vid ett underlag eller yta i en cellodlingsskål.

*Enzym* – är protein som katalyserar (ökar hastigheten hos) en kemisk reaktion.

*Hydrolys* – är en kemisk process där en molekyl klyvs i två delar efter att en vattenmolekyl har adderats.

*Jon* – är en atom eller molekyl som har ett överskott eller underskott av elektrisk laddning.

*Katalysering* – är den kemiska hastighetsförändringen som uppstår på grund av tillsättningen av en substans kallad katalysator.

*Mikrobe* – är en microskopisk organism som endera består av endast en cell eller ett kluster av celler.

*Nukleation* – födelsen av nya kristaller.

*Nukleatiosn plats* – platsen där nya kristaller bildas.

*Utfällning* – är födelsen av en solid i en vätska eller inuti en annan solid som uppstår på grund av en kemisk reaktion. I detta fall innefattar det skapandet av kalcitkristaller.

*Övermättad lösning* – en övermättat lösning innehåller mer av ett löst ämne än vad lösningen egentligen borde kunna innehålla.

# Kapitel 2

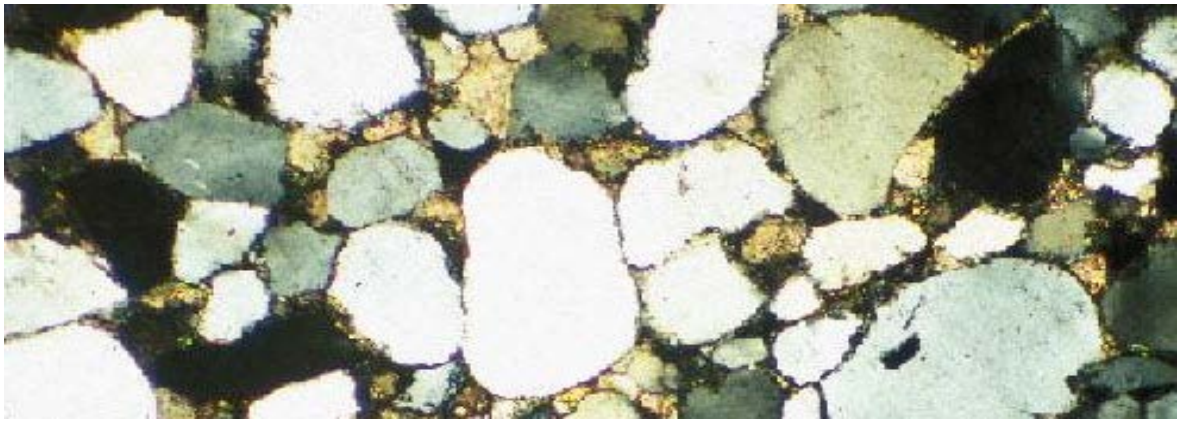
# Studie av existerande kalcitutfällningsmetoder

Kalcitutfälningsprocessen förändrar både de mekaniska som de fysiska egenskaperna hos jorden genom att bilda kalcitkristaller på jordkornens yta och skapa en cementering vid kontaktpunkterna för kornen. Tryckhållfasthet, skjuvhållfasthet samt elastisitetsmodulen ökas medans porositeten och permeabiliteten kommer att lämnas näst intill oförändrad.

## 2.1 Den naturliga processen med utfällning av kalcit

DeJong et al. (2006) förklarar att naturligt förekommande cement är skapat i ekosystemet genom kemiska depositioner samt biologiska processer relaterad till vittring och erosion. Utfällningen av kalciumkarbonat ($CaCO_3$) eller biologisk förkalkning har en viktig roll i cementeringen av natursten som bildats av sediment, mineraler eller jordarter (Chou, 2011). Molenaar (1993) klargör att kalciumkarbonat är en av de mest frekvent förekommande naturliga cementen och Whiffin (2004) tillägger att detta är som resultat av att kalcium är ett av de vanligaste mineralerna på jorden med 4 % (vikt procent) av jordens skorpa. Detta beror på att kalcium är de huvudsakliga mineralen i; snäckorna till marina varelser, korallskellet och som cement i kalk- och sandsten (Price 2012). Cementeringen orsakad av utfällningen av kalcit eller kalciumkarbonat kommer i detta kapitel att vara det primära fokusen i förklaringen av hur sedimentära stenarter bildas.

Castanier et al. 1999 studie (citerat i Al-Thawadi 2008) informerar att utfällning av $CaCO_3$ är en frekvent förekommande process i naturen och kan återfinnas i marina vatten, sötvatten och i jordarter. En ökning av koncentrationen eller en minskning av lösligheten av kalcium eller karbonat i vätskan orsakar den naturliga utfällningen av $CaCO_3$ (Al-Thawadi, 2008). Whiffin (2004) tillägger att det finns fyra faktorer som råder och styr över den utfällningen av kalciumkarbonat; kalcit koncentration, karbonat koncentration, pH i omgivningen samt närvaron av nukleationsplatser. Det har rapporterats att bakterieceller är utmärkta nukleationsplatser (dvs. födelsen av nya kristaller) för tillväxten av mineraler under skapandet av bergarter. På grund av att det inte är brist på nukleationsplatser inom bakteriekulturer så kommer de tre förstnämnda parametrarna vara de styrande för den mikrobiella utfällningen av karbonater (Whiffin 2004; Neumeier 1999). Figur 2.1 illustrerar kalciumkarbonatcementering av kvarts sandsten.



**Figur 2.1:** Sandsten av någorlunda rundade korn av kvarts, cementering genom kalciumkarbonat (Oxford Earth Science Image Store, 2004).

Al-Thawadi (2008) skriver att när urea är frigivet i en miljö genom biologiska händelseförlopp, till exempel sådan som urin från däggdjur och i kontakt med ureas, som är ett enzym som använder urea som energikälla, så bildas ammonium vilket höjer pH-värdet i omgivningen som i sin tur resulterar i att $Ca^{2+}$ och $CO_3^{2-}$ fäller ut som $CaCO_3$ (Al-Thawadi 2008). Dessa kalcitkristaller ($CaCO_3$) skapas som en film runt jordpartiklarna och bidrar till att kornen cementeras vid dess kontaktytor (Price 1988a; Airey 1993; ). Al-Thawadi (2008) och Bachmeier et al. (2002) förklarar att ureas är vanligt förekommande i jordar och marina miljöer samt att biotiska aktiviteter är vanlig vilket inkluderar bakteriell aktivitet, trådlik jästsvamp, alger och ett antal högre växter (kärlväxter) så som Jackbönan (Canavalia ensiformis), löv och frön från Sojabönan (Glycine max), svinmålla (Chenopodium album) och löv från vilt mullbär (Morus alba). Utav dessa växter så var Ureaser från Jack bönan det första som kristalliserades i en laboratoriemiljö (Sumner, 1926).

## 2.2 Biogrout – MICP (Microbial Induced Calcium carbonate Precipitation)

Denna metod härstammar från observationer av bakteriell utfällning av kalcit i de Australiensiska korallreven (v. d. Ruyt and v. d. Zon, 2009) vilket lägger grunden för de fortsatta studierna utförda av Victoria S. Wiffin Phd på Murdoch University 2004, Salwa M. Al-Thawadi Phd på Murdoch University 2008 och Leon van Paassen Phd på Delft University of Technology 2009. Ett av Leon van Paassens mål med sin avhandling vara att, förutom att studera den kemiska processen, undersöka och bevaka en ingenjörsmässig modell av en $1m^3$- samt $100m^3$- tank för att kunna utvärdera de styrande parametrarna rörande den fältmässiga processen, injekteringskonfigurationer och det behandlade området.

Resultatet av de tidigare gjorda studierna har resulterat i tre patent:

- Kucharski, E. S., R. Cord-Ruwisch, et al. (2005). Formation of high strength cement in permeable starting material for structural applications, and for pavements, roads, and runways, comprises combining starting material with urease producing micro-organism, urea and calcium ions. Patent WO2006066326, Murdoch University, Calcite Technology Pty Ltd.
- Paassen, LA van, C. M. Daza, M. C. M. Van Loosdrecht, R. Kleerebezem, W. Van der Star, and W. Van der Zon. (2008). Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement technique, patent applicant: Stichting Deltares, EP1798284-A1 (8 October 2008); WO2007069884-A1 (9 October 2008).
- Paassen, L. A. van, V. S. Whiffin, and M. P. Harkes. (2007). Immobilization of bacteria to a geological material, patent applicant: Stichting Deltares, EP1798284-A1 (20 Jun 2007); WO2007069884-A1 (21 Jun 2007); EP1974031-A1 (01 Oct 2008). Deltares owns the sole license of the patent by Kucharski et al (2005).

Ytterligare exempel av aktuel research angående Biogrout (MICP) är enligt v. Paassen et al. (Project: 11337) ett projekt som pågår på Geotechnology Department at Delft University of Technology och startade 2011. Målet med detta projekt är att kvantifiera och effektivisera bio-cementeringen vid förbättringen av prestationen av grunder och reducera risken som är associerad med likvifaktion och kanalbildning (v. Paassen et al., Project: 11337).

### 2.2.1 Kemisk process och metod

Enligt Fujita et al. (2000) är bakterier innehållandes ureas normalt förekommande i natur och mark, där av finns inget behov i att tillföra andra mikroorganismer utöver dessa för att accelerera In-situ processen som ökar jordens hållfasthet genom ureahydrolys (Okwadha and Li, 2010). Enzymet ureas hydrolyserar urea som sin energikälla och genererar löst ammoniak som i sin tur höjer pH värdet i marken vilket leder till att lösningen blir övermättad. Detta leder till att $Ca_2$ and $CO_3^{2-}$ fäller ut som $CaCO_3$ (Stocks-Fisher et al. 1999; Bang et al. 2010; Bachmeier et al. 2002). Gonsalves (2011) redogör för samma process på ett något annorlunda sätt; lösningsgraden av kalciumkarbonat är tämligen låg ($3.3 \times 10^{-9}$ mol/L) vid temperaturen 25°C vilket resulterar i att så fort koncentrationen av of $Ca^{2+}$ och $CO_3^{2-}$ joner överskrider detta värde så fäller kalcitkristaller ut (Gonsalves, 2011). Dessa mikroorganismer som orsakar denna hydrolys tillför även en god nukleations plats för dessa kalcitkristaller (Stockes-Fisher et al. 1999).

Wijngaarden et al. (2012) upplyser att majoriteten av studier gjorda angående Biogrout och MICP har använt sig av mikroorganismen Sporosarcina pasteurii (tidigare Bacillus pasteurii) som har innehållit ureas för att stabilisera jorden. De fortsätter med att klargöra att de naturliga miljöfaktorerna som kontrollerar aktiviteten av ureas är; typ av bakterie, bakteriecellskoncentration, temperatur, ureakoncentration, kalciumkoncentration, jon koncentrationen samt pH värdet i den bildade vätskan. Sarda et al. (2009) informerar att kvantiteten och

kvaliteten av enzymet är väldigt viktigt då det kan påverkas av så många olika faktorer och detta är anledningen till varför MICP är så beroende av aktiviteten orsakat av ureas.

Ett antal studier har avslutats som åskådliggör att MICP kan användas för att förbättra de mekaniska egenskaperna hos porösa material, framförallt hos sand (Whiffin 2004; DeJong et al. 2006; Al-Thawadi 2008; van Paassen 2009b). Först kultiveras bakterierna i en reaktor på arbetsplatsen eller i laboratoriet tills de har vuxit till sig och är redo att injekteras och transporteras med hjälp av vattenflöde till platsen där hållfasthetsökningen är behövd (Paassen, 2009c). Van Paassen et al. (2008) fortsätter förklara att delar av bakterierna kommer att absorberas till- eller växa sig fast mellan jordpartiklarna. När detta gjorts så injekteras en vätska innehållandes urea och kalciumklorid vilken lämnas en tid för att tillåta den kemiska reaktionen att äga rum, denna kemiska process sammanfattas nedan av Paassen (2009a).

Det mikrobiella Urease katalyserar hydrolysen av urea till ammoniak och karbonat

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{Urease}} 2NH_4^+ + CO_3^{2-}$$

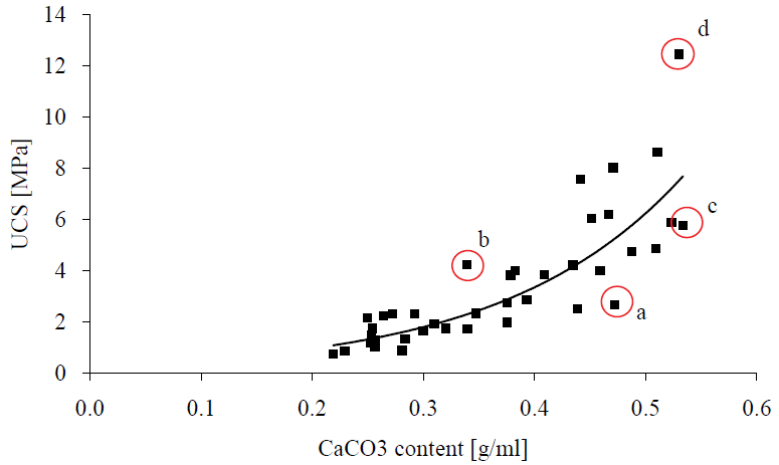
De skapade karbonatjonerna fäller ut i kalciumjonernas närvaro och tillsammans formar de kalcitkristaller på ytan av jordpartiklarna där cementeringen sker vid kontaktytorna.

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3\ (s)$$

Van Paassen (2009d) fortsätter förklara att de utfällda kalciumkarbonatkristallerna endast löses upp väldigt långsamt av ett kontinuerligt tillflöde av surt grundvatten eller genom den försurande process i porerna vilket är ett resultat av nedbrytningen av biomassa.

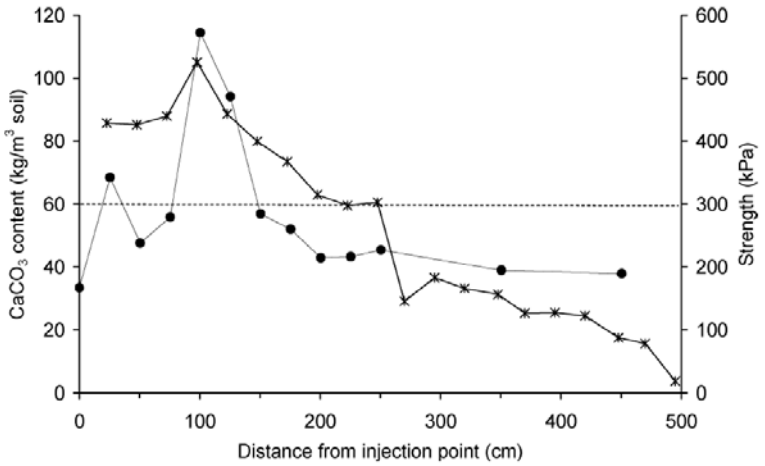
### 2.2.2 Test resultat av tidigare utförda studier

Det har demonstrerats att mängden av utfällt kalciumkarbonat eller kvantitet av formade kalcitkristaller har ett samband med den uppnådda ökningen av den enaxliga tryckhållfastheten, UCS, (*graf 2.1*) efter behandling med MICP (van Paassen 2009a, Whiffin et al. 2007, Al-Thawadi 2008).



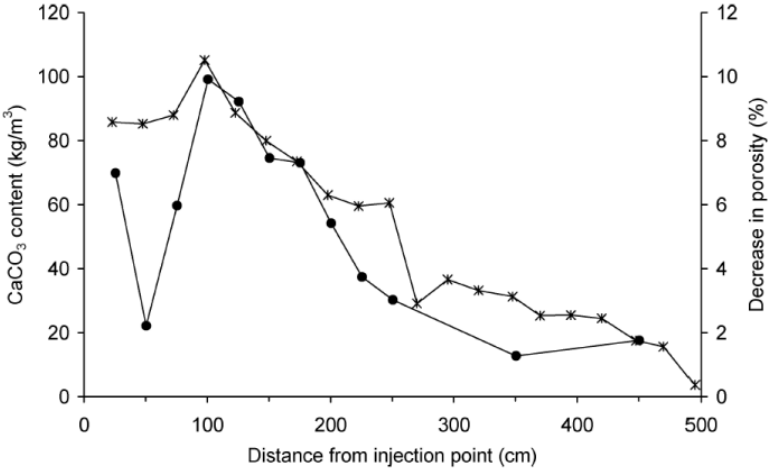

**Graf 2.1:** Samband mellan $CaCO_3$ innehåll och UCS, variations koefficient $R^2$=0.77 vilket tyder på en viss inkonsekvens (van Paassen, 2009a).

Whiffin et al. (2007) demonstrerade genom att dela en 5 meter lång kolumn i 25 cm sektioner, där sedan tre prover togs ur varje sektion (för att få en bättre spridning av testerna), att den högsta andelen $CaCO_3$ samt den maximala tryckhållfastheten inträffade båda ungefär 1 meter efter injekteringspunkten. Högre $CaCO_3$ halt och maximal tryckhållfasthet har observerats nära injekteringspunkten till skillnad från utloppspunkten i alla test utförda hittills. Resultaten från de testade 25 cm sektionerna redovisas i graf 2.2 nedan.




**Graf 2.2:** Tryckhållfasthet indikeras med fyllda cirklar och $CaCO_3$ innehåll med kryss. Den streckade linjen är medel innehållet av $CaCO_3$ som har beräknats till 59.2 kg/m3 (Whiffin et al., 2007).

Under samma utvärdering sammanställd av Whiffin et al. (2007) fastställdes porositeten genom mätningar av den fuktiga och den torra densiteten för alla sektions prover (25 cm långa) från kolumnen. Resultatet är sammanställt i graf 2.3 nedan som den procentuella nedgången i porositet. Reduceringen i permeabilitet är en oönskad egenskap under processen som skall bidra till en ökad hållfasthet hos jorden. Om jorden porositet och permeabilitet sänks för mycket så kan detta orsakar riktningsändringar i det naturliga grundvattenflödet, det kan även leda uppbyggnaden av portryck som resulterar i hög risk för hydraulisk spräckning (Whiffin et al., 2007). Baserat på resultaten i graf 2.3 så drar Whiffin et al. (2007) slutsatsen att ökningen i tryckhållfasthet är starkt beroende av jordens densitet samt innehållet av $CaCO_3$.



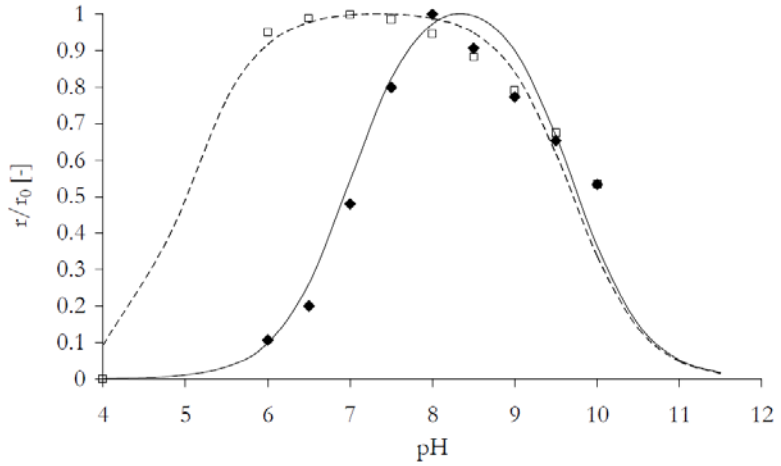

**Graf 2.3:** Minskningen i porositet indikeras med fyllda cirklar och $CaCO_3$ innehållet med kryss (Whiffin et al., 2007).

Enligt Paassen (2009a) så finns det ett antal förhindrande faktorer för utfällningen av $CaCO_3$ som hämmar aktiviteten på ureasreaktionen negativt. Dessa faktorer är:

***Effekten av pH –*** Batstone studie 2002 (citerad i Paassen 2009a) informerar att runt (över och uner) en viss pH nivå så kommer ureas aktiviteten att minska vilket skapar en klockformad kurva för den hämande effekten, (*den heldragna linjen i graf 2.5*), vilken analyserar ureasextrakt från bakterien Sporosarcina pasteurii. Denna kurva har sitt optimum runt pH 8.5 (Stocks Fisher et al. 1999). Whiffin (2004) visade något senare att hela celler i suspension hade sin optimala pH nivå runt 7, (*den streckade linjen i graf 2.5*). Dessa kurvor ger en klar indikation på att uraseextraktet är relativt känslitgt för förändringar i pH nivån, speciellt på den sura siden, till skillnad från de hela cellerna i suspension som uppvisade försummande effekt mellan pH 6 till 8.5. En anledning till att ureas aktiviteten går ner verkar vara att cellerna skyddar enzymet mot surhetsgraden (Paassen, 2009a). Wu et al. (2009) förklarar vidare att kalcit är en mineral som fäller ut frekvent som en konsekvens av ökat pH och alkalinitet, men å andra sidan så sjunker aktiviteten hos bakterierna mycket med högt pH (pH över

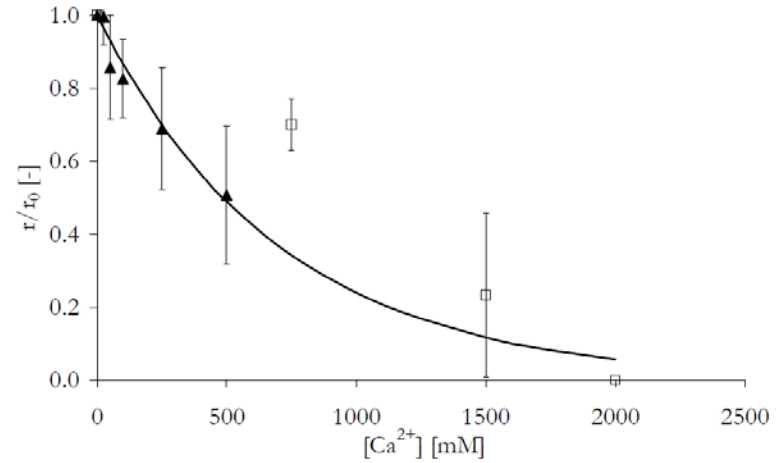
12) (Wang et al., 2012). Bundeleva et al. (2012) tillägger att det existerar ett tröskelvärde runt pH 8.5 över vilket levande celler/bakterier fäller ut $CaCO_3$.

De Muynck et al. (2010a) redogör genom deras experiment att om koncentrationen av kalciumklorid överskrider konncentrationen av ammoniak producerande föreningar så är det möjligt att produktionen av ammoniak reduceras kraftigt. Genom tidigare laborationer så fann De Muynck et al. (2010b) också att pH värdet förblev ca 7 och att vid dessa värden så är ammoniak det vanligaste förekommande. Ett neutralt pH kan vara effekten av att kalciumkarbonat fäller ut vilket i sin tur skulle leda till en sänkning i pH värde. Utfällningen av kalciumkarbonat kan motverka ökningen i pH som ett resultat av att ammoniak avges (De Muynck et al., 2010a).




**Graf 2.5:** pH's effekt på aktiviteten hos ureas. Underökt är: utvunnet ureasextrakt från Sporosarcina pasteurii (♦; Stocks-Fisher et al., 1999) och hela Sporosarcina pasteurii celler i susension (□; Whiffin, 2004). $r/r_0$ är hydrolyshastigheten. Enligt Paassen (2009a) är dessa aktiviteter normaliserade och den absoluta specifika ureas aktiviteten i mol-urea L-1 h-1 gDW-1 betydligt högre för det utvunna cellextraktet.

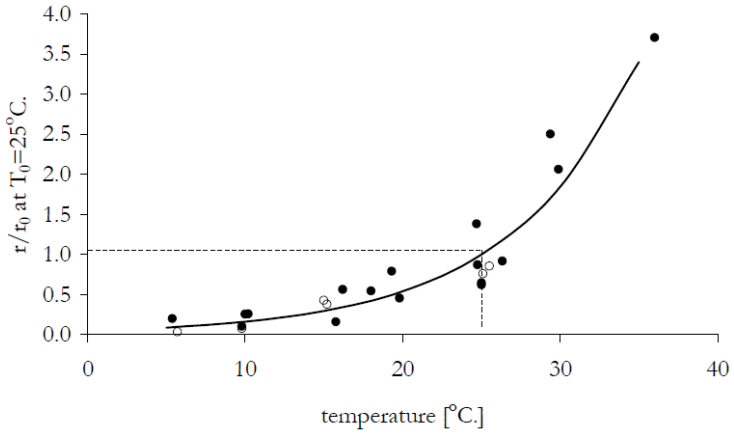
***Effekten av kalcium (eller andra salter)*** **–** Mängden och förekomsten av vissa salter påverkar ureasaktiviteten negativt (Paassen, 2009a). Whiffin (2004) upptäckte att små mängder kalciumkloridkoncentration (upp till 50 mM) hade ringa effekter på ureasaktiviteten men ökades denna koncentration så minskade aktiviteten hastigt till dess att aktiviteten var nästan försummbar vid halter av 1 eller 2 Mol av kalciumklorid eller kalciumnitrat lösning. En annan upptäckt som Whiffin (2004) gjorde var osannolikheten att ureas aktiviteten skulle påverkas av ammoniumklorid nivåer under 3 Mol.




**Graf 2.6:** Effekten på ureas aktivitet av olika kalciumklorid koncentrationer, (▲; kalciumklorid, Paassen 2009a) och (□; kalciumnitrat. Whiffin, 2004).

***Effekten av temperatur*** **–** Paassen (2009a) pekar på att marktemperaturen har en betydande roll för hydrolysen av ureas. Han fortsätter med att redogöra att mellan 5 och 35°C med intervall om 10°C så ökar ureas

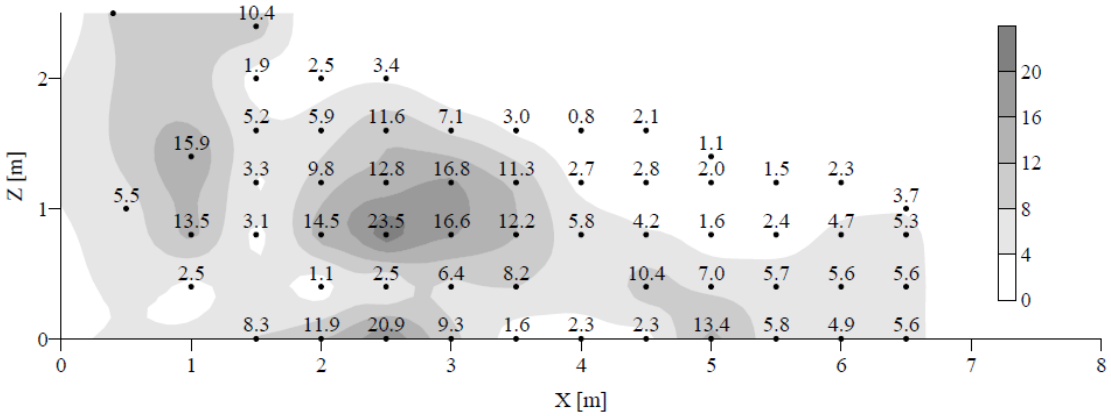
aktiviteten med en faktor på 3.4 gånger (*graf 2.7*) och med en marktemperatur under 5°C så har ingen ureasaktivitet registrerats.




**Graph 2.7:** Temperaturens effekt på ureas aktiviteten mättes i ett experiment av Paassen (2009a) med en konstant tillförsel av bacterier i konsentrationer av endera ●; 0.5 mol urea or ○; 0.5 mol urea med $CaCl_2$. Temperaturen varierades.

***Utförda tester –*** Ett antal storskaliga experiment har utförts och utvärderats angående MICP under det senaste decenniet. Det största utfördes i en 100 $m^3$ ([8.0x5.6x2.5] $m^3$) stor behållare med tre injekteringspunkter samt tre utlopp (*figur 2.2*). Paassen (2009a) sammanfattar hans observationer angående innehållet av $CaCO_3$ i graf 2.4 med samma slutsats som Whiffin et al. (2007) diskuterade i paragrafen ovan, med den högsta mängden utfällt kalciumkarbonat återfunnet närmas injekteringspunkten vilket resulterade i att den högsta tryckhållfastheten även den återfanns på samma ställe.

**Figur 2.2:** *vänster:* 100$m^3$ storskaligt experiment med injekteringsbrunnar till vänster och utlopp till höger. *Höger:* den cementerade sandkroppen, flödesmönstret är klart synligt, speciellt i närheten av utloppet (van Paassen, 2009a).




**Graf 2.4:** Längsgående sektion mellan inloppet (x=1.5m) och utloppet (x=6.5m). $CaCO_3$ innehåll är redovisat i % av total torr vikt (Paassen, 2009a).

### 2.2.3 Osäkerheter med MICP

Den kemiska processen som styr MICP är en komplex reaktion där flödesfördelningen av bakterie samt $CaCO_3$ är väldigt viktigt (Sarda et al., 2009). Barkouki et al. (2011) fortsätter förklara att det finns ett fåtal tekniska svårigheter att överkomma genom fortsatt forskning, dessa är bland annat injekteringshastigheten och vätskekemin (t.ex. kalcium, karbonat, urea, pH buffert och mikrobiella näringsämnen). Dessa behöver vidare studier för att en noggrannare kontrollering och uppskattning skall kunna utföras angående utfällt $CaCO_3$.

För att lyckats hålla kostnaderna så låga som möjligt och upprätthålla en relativt hög flexibilitet så är det nödvändigt att odla dessa bakterier på platsen, med så litet avstånd som möjligt till den jord som behöver förstärkas. Vilket med största sannolikhet kommer att leda till icke sterila operativa förhållanden för den syresatta bioreaktorn (*figur 2.3*). Dessa förhållanden kan riskera bakteriehärden genom oönskad tillväxt av icke-ureasa bakterier (Wouter et al. 2009), vilket uppstod under ett kolumnexperiment utfört av Swedish Geotechnical Institute (2011), där de noterade att en infektion av oönskade bakterier hade uppstått.

**Figur 2.3:** Icke steril tillväxt av Sporosarcina pasteurii i en $5m^3$ reaktor. *Höger-ner*: det bakteriella tillväxtmediet (Wouter et al. 2009)

Paassen et al. (2009b) fortsätter förklara svårigheterna med att mäta och bedöma den bakteriella aktiviteten, vilken är starkt beroende av, och kan drabbas negativt av; om bakterierna redan har utsöndrat deras enzym, om de har följt med injekteringsvätskan ut (Harkes et al., 2010), om de har blivit inneslutna i kristaller eller på den bakteriella koncentrationen. Bakteriekoncentrationen är en direkt effekt av distributionen samt flödesmönstret och kan fluktuera över jordenvolymen som skall behandlas. En anledning till en ojämn distribution av bakterier har sin orsak i storleken av porerna och porkanalerna genom vilka mikroorganismerna måste passera (DeJong et al., 2010). Volodymyr and Chu (2008) tar vid och beskriver att begränsningen för den minsta porstorleken är

0.5-2 μm genom vilka mikroberna kan passera. Mindre porkanaler existerar i väldigt finkorniga jordar vilket kommer att hämma den fria passagen av bakterier (Rong et al., 2011).

Utfällningen av $CaCO_3$ i $100m^3$ behållaren är väldigt låg precis vid injekteringspunkten men ökar under första delen närmast inloppet för att sedan avta med minskat avståndet mot utloppet. Det lägre innehållet av $CaCO_3$ precis efter inloppet kan, enligt Van Paassen et al. (2009), förklaras med en högre flödeshastighet och störningar runt denna punkt. Samma författare fortsätter att förklara att kalciumkloriden och urean konverteras under transporten inom jordmatrisen vilket har sin förklaring till varför mer $CaCO_3$ fäller ut i början nära inloppet jämfört med i slutet. Detta resulterar naturligtvis i att de senare jordvolymerna nära utloppet erhåller mindre reagenter. Denna trend har observerats i både testet med en 5 meter kolumn (*graf 2.3*) och $100m^3$ behållaren (*graf 2.4*) (van Paassen et al., 2009b).

De ovan diskuterade omständigheterna kan eventuellt leda till svårigheter i att bedöma och skaffa sig en uppfattning om den uppnådda tillväxten i hållfasthet vid ett specifikt läge.

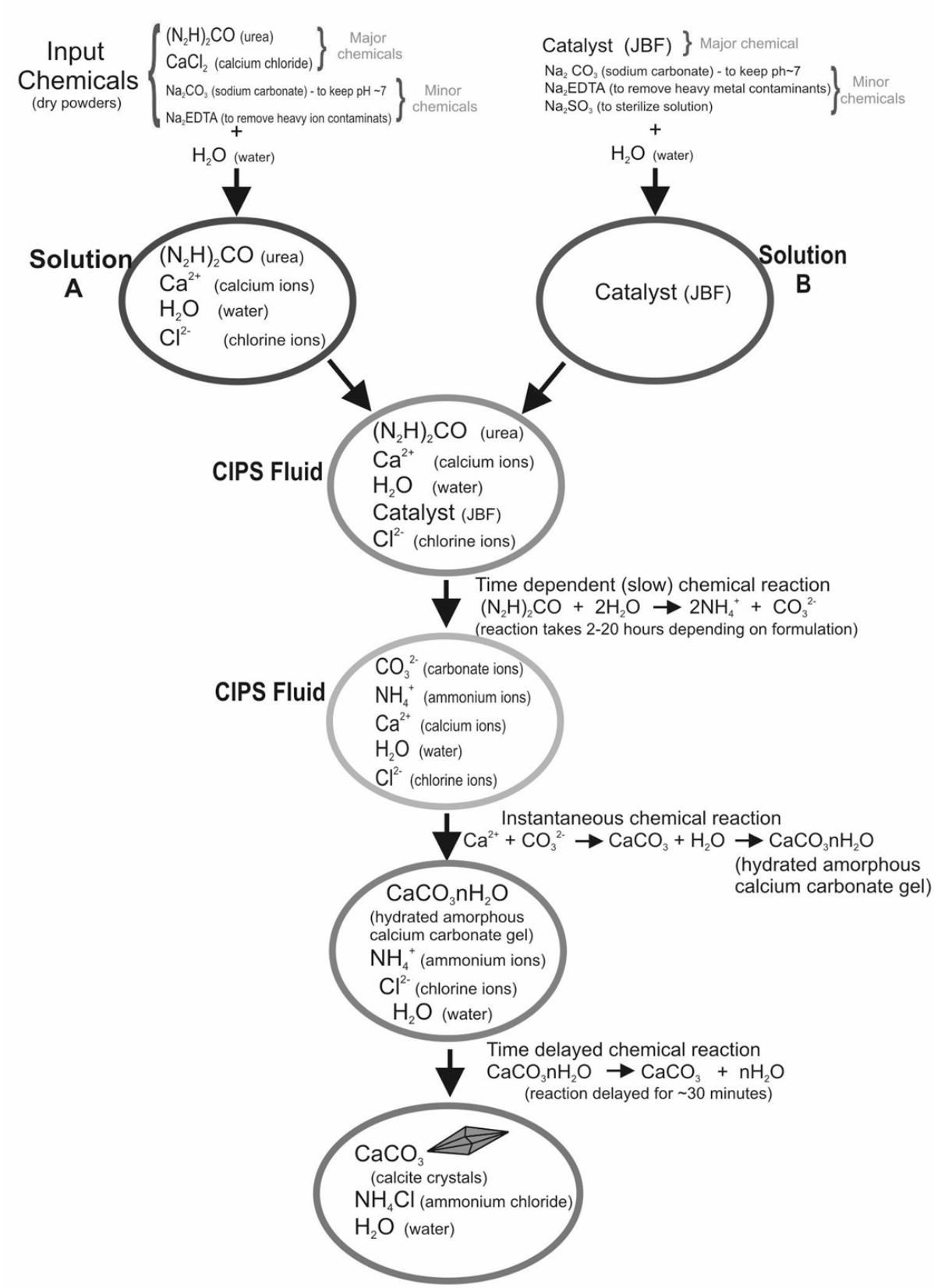
Suer et al. (2009) redogör för att det produceras en överskottsvätska som lämnas i marken vilken innehåller bakterier, $NH_4$ (ammoniak) and Cl (klorid) vilket höjer pH nivån i omgivningen till ca 9. Samma författare fortsätter att förklara att bakterierna inte är giftiga eller skadliga samt att övergödningen och försaltningen som uppstår genom $NH_4$ och Cl respektive har en väldigt lokal påverkan på naturen.

## 2.3 CIPS – Calcite In-situ Precipitation

### 2.3.1 Den kemiska processen

CIPS metoden sammanför två vattenbaserade lösningar (A och B) vilka inte är giftiga, inte bestående av några partiklar, låg begynnande viskositet och ett neutralt pH-värde (Kucharski et al., 1996b). Dessa två vätskor innehåller olika konstellationer av kemikalierna kalciumklorid, urea, di-natriumsalt, natriumkarbonat, Natriumsulfit och katalysatorn ureas vilket är ett enzym (Price, 2012). Den kemiska reaktionen (*figur 2.4*) startar när de två lösningarna A och B sammanförs och blandas noggrant. Enlighet Price (2012) så är detta en relativt långsam reaktion under vilken viskositeten av den blandade CIPS-vätskan kommer att öka gradvis och bilda en icke-kristallin form av kalciumkarbonat under den första timmen. Därefter, under den andra timmen, kommer en minskning i viskositet ske, samtidigt som den icke-kristallina formen av kalciumkarbonatet omvandlas till fasta kalcitkristaller som kommer att växa på ytan av jord kornen. Så fort som karbonatdioxid- och ammoniakmolekyler har börjat bildas så uppstår den omedelbara reaktionen där kalcit bildas. Denna bildning startar med hydratiserat amorft kalciumkarbonat gel vilket i sin tur kommer att ombildas till kalcitkristaller med tiden (Price, 2012).

Den ovan beskrivna kemiska processen för CIPS imiterar den naturliga processen (*beskriven i sektion 2.1*) för bildning av sandsten genom utfällning av kalcitkristaller runt jordkornen (Ismail et al. 2002b, Price 2012). Denna beläggning av kristaller runt jordkornen kommer att skapa en cementering och bygga hållfasthet vid kontaktytorna mellan kornen (*figur 2.7*) på samma sätt som den naturliga cementeringsprocessen för kalkhaltig jord erhåller sin ökade hållfasthet (Price, 1988).

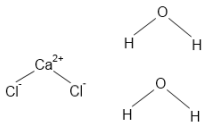



**Figur 2.4:** Den kemiska reaktionen för CIPS (Price, 2012).

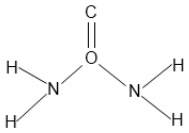
Dr Price (2012) förklarar vidare att på grund av den kemiska reaktion som är vanligt förekommande och på naturligt sätt bildar kalcit under temperatur och tryck tyder på att den kemiska sekvensen måste vara en robust reaktion. En robust kemisk reaktion innebär att förhållandena i vilka den äger rum inte är specifika, ömtåliga eller unika utan reaktionen kan uppstå okomplicerat (Price, 2012). De kemiska tillstånden för CIPS har därför designats till att ske under en robust reaktion för att med lätthet kunna appliceras med goda resultat även i fält. Den enda skillnaden mellan CIPS och den naturliga processen är att ”CIPS skapar under några dagar vad naturen skapar över tusentals år” (Price, 2012).

De kemiska ingredienserna som används i CIPS förklaras kortfattat i listan nedan där dagens användningsområden anges så väl som dess struktur.

***Kalciumkloride dihydrat $CaCl_2.2H_2O$ –*** Ett av huvudområdena där kalciumklorid dihydrat används är för bekämpning av is samt att motverka dammbildning på vägar (Wikipedia, 2012d). Tetra Chemicals Europe (2010) informerar att kalciumklorid är ett vitt kristallint salt och den typ som används för avisning levereras som flingor. DOW (1995) tillägger att saltet är lösligt i vatten och att det genererar en betydande mängd värme, därför är det viktigt att det vatten som används för att lösa kalciumklorid inte är varmt. Sverige förbrukar mellan 200 000 – 300 000 ton av olika avisningsprodukter årligen, där kalciumklorid är en av de betydande (Riehm, 2010).

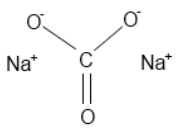



***Urea $CO(NH_2)_2$ –*** Ordet urea härstammar fån det grekiska ordet uron vilket betyder urin (Swedish Chemical Society, 2007a) och Wikipedia (2012c) skriver på deras hemsida att mer än 90 % av den producerade urean används som konstgödsel till jordbruksindustrin. Urea kan även användas som avisning av bland annat vägar och flygfält. Under åren 2010/2011 så producerades och såldes 1090 ton urea i Sverige (Jordbruksverket, 2012b).

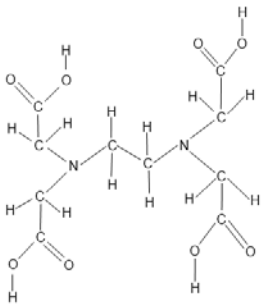



The Swedish Chemical Society (2007a) upplyser att urea levereras som färglösa kristaller utan lukt med en något salt, bitter och kall smak. När urea löses i vatten så hydrolyseras det mycket långsamt till ammoniumkarbamat, som så småningom sönderdelas till ammoniak och koldioxid (Swedish Chemical Society, 2007a). Jordbruksverket (2012a) förklarar att i de reglerande lagar för användning av urea som gödselmedel anges det att urean måste blandas i jorden inom de första 4 timmarna med syfte att förhindra ammoniumjoner från att avdunsta in i atmosfären som växthusgaser.

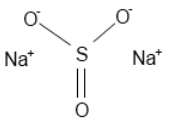
***Sodium Carbonate $Na_2CO_3$ –*** Även känt som målarsoda, är ett di-natriumsalt av kolsyra vilket är ett grå-vit färgat pulver, som är lättlösliga i vatten (Svenska Chemical Society, 2007b). The Swedish Chemical Society (2007b) fortsätter att förklara, natriumkarbonat löst i vatten resulterar i en alkalisk lösning och Wikipedia (2012e) uttrycker att på grund av dess alkaliska egenskaper har natriumkarbonat ofta används som en pH-regulator för att upprätthålla alkaliska betingelser. Andra användningsområden är, mjukgörare vid klädtvätt, tillsats i tandkräm, tillsatser i livsmedel och som en vanlig tillsats i kommunala pooler för att neutralisera den sura effekten av klor (Wikipedia, 2012e).



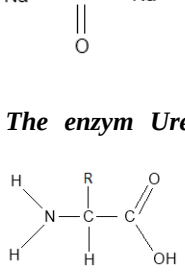

***EDTA, Tetra sodium $C_{10}H_{16}N_2O_8$ –*** Är en polyamine- karboxylsyra som har konsistensen av en färglös solid vilken kan lösas i vatten (Wikipedia, 2012p). Wikipedia (2012p) fortsätter rapportera om att EDTA ofta används för att binda metalljoner som finns i lösningar, de förblir fortfarande i lösningen men upphör att ha någon reaktiv aktivitet. EDTA används ofta som behandling för svår blyförgiftning eller för lokala behandlingar mot ormbett (National Encyklopedin, 2012a).

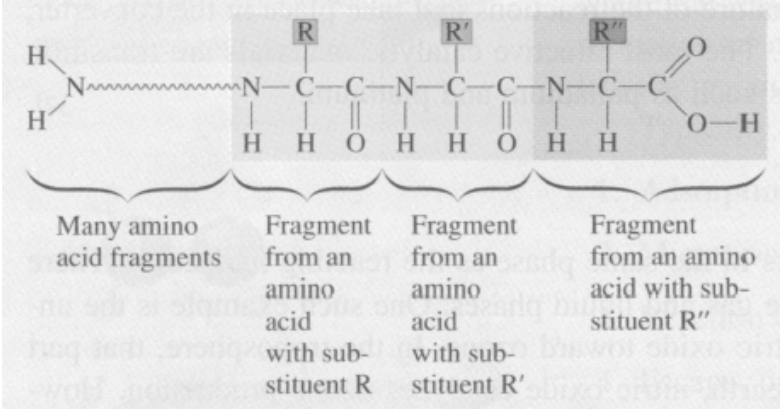


***Sodium Sulfit $Na_2SO_3$ –*** Är ett natriumsalt med karaktär av ett vitt fast ämne som är lösligt i vatten (Wikipedia, 2012g). Saltet används inom livsmedelsindustrin som konserveringsmedel till bland annat: förhindra torkad frukt från missfärgning samt att konservera kött. Inom livsmedelsindustrin är det allmänt känt som E221 (National Encyklopedin, 2012b).




***The enzym Urease*** – Är ett enzym som katalyserar hydrolysen av urea till koldioxid och ammoniak (Encyclopedia Britannica, 2012). Zumdahl och Zumdahl (2006) förklarar att enzymer är vanligtvis proteiner som är en viktig grupp av biomolekyler som skapats från aminosyror, dessa aminosyror har den allmänna kemiska strukturen som visas till vänster, där R representerar någon av 20 olika alternativ. Dessa aminosyror kan fästa till varandra för att bilda polymerer (polymerer står för "många delar") vilka kallas proteiner och den allmänna strukturen kan studeras i figur 3.5 (Zumdahl och Zumdahl, 2006). Sumner (1926) konstaterade att ureas är ett protein, han var även den förste att kristallisera ureas som finns i bakterier, jäst och flera växter. Encyclopedia Britannica (2012) meddelar att stora mängder av ureas kan hittas i vissa bönor, andra vegetabiliska frön och i vissa djurvävnader och mikroorganismer. Det faktum att vissa mikroorganismer kan bilda Ureas men inte människor gör det möjligt att använda den för diagnos av vissa infektioner (National Encyklopedin, 2012c).




**Figur 2.5:** Den allmänna strukturen av ett protein (Zumdahl och Zumdahl, 2006)

Som framgår i början av rapporten så är receptet för blandningen av CIPS en kommersiell produkt från Lithic Technology Pty Ltd (ACN 094 141 821), och kommer därför inte att avslöjas i detta dokument, men det måste klargöras att kunskapen om de olika kompositionerna av CIPS för olika temperaturer finns och har testats och verifierats.

### 2.3.2 Viktiga parametrar för ett gott resultat

***Temperatur*** - Temperaturen är en av de faktorer som styr storleken och antalet kalcitkristaller som bildas genom utfällning. Formen, storleken och mängden av dessa kristaller styr senare hur stor ökningen av hållfastheten blir. Aktiviteten hos Urease är beroende av temperaturen hos vätskan, en högre temperatur resulterar i att Urease får arbeta snabbare vilket i sin tur leder till att mindre ureas behövs för den korrekta reaktionshastigheten. Om ureasaktiviteten är hög (dvs. hög temperatur eller en stor mängd ureas) bildas kalcitkristaller snabbt och blir små, vilket kan leda till att kristallerna inte når över till angränsande partiklarna för att bilda en cementering. Motsatsen är: om temperaturen eller ureasmängden är låg så blir resultatet följaktligen en långsamt växande kristall vilket kan leda till att kristallerna växer till sig för stora och skjuter isär jordpartiklarna (Price, 2012).

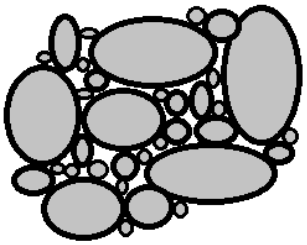
***Tid*** – På grund av den kemiska reaktionen för CIPS som orsakar bildandet av gel är tid en viktig faktor i distributionen av vätskan i den avsedda jordvolymen. Såsom angivet ovan så startar bildandet av gelén omedelbart efter blandning av de två vätskorna. Price (2012) poängterar att det finns en tidsgräns för injektering vilken styrs av den kemiska reaktion som bildar gel. Han fortsätter förklara att under de första 15

minuterna efter blandning av de två lösningarna så bildas gelén långsamt, vilket resulterar i en relativt låg viskositets ökning. Runt 30 minuter efter blandning, har viskositeten nått ett så högt värde att stora svårigheter uppstår i att förflytta och fördela CIPS-vätska i jordporerna. Dessa tider varierar något beroende på temperatur och CIPS recept (Price, 2012).

Ismail et al. (2002a) rapporterar att 5 timmar är en tillräcklig härdnings tid för att uppnå större delen av hållfasthetsökningen och för att merparten av kalcitutfällningen skall ha ägt rum. Pris (2012) meddelar att omkring 8 timmar är en acceptabel tid för att nå tillräcklig hållfasthet, men om möjligt bör den första behandlingen lämnas över natten innan den följande injekteringen utförs nästkommande dag.

***Jordart*** – Ismail et al. (2002a) meddelar att utfällning av kalcitkristallerna endast belägger ytan av jordpartiklarna istället för att reagera med partiklarna, detta resulterar i att vilket material som helst kan cementeras med denna metod (Konstruktion News, 2001). Dr Pris (2012) anger att CIPS även kan cementera lera dock är problemet att få CIPS-vätskan distribuerad i leran på grund av dess mycket låga (eller obefintliga) permeabilitet. Price (2012) fortsätter beskriva att han även behandlat stolsdynor med CIPS vilket har resulterat i att de blivit styvare som resultat av en cementerande effekt.

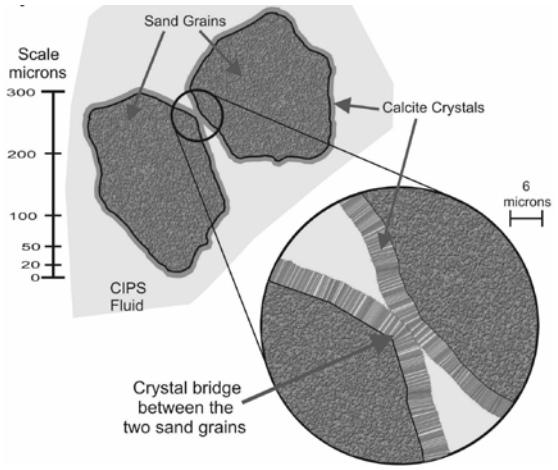
***Kornstorlek*** – Rong et al. (2011) sammanfattar att lösa partiklar konsoliderade med hjälp av mikrob-baserat cement har fram till detta datum endast testats på sand eller jord. Det har även visat sig i all forskning gjort för denna uppsats att ensgraderad sand har varit den enda undersökta jordarten för alla tester som utförts hittills. Pris (2012) anger att hållfastheten ökar på grund av materialets egenskaper och att ett samband mellan porositet, antal kontaktpunkter hos jordpartiklarna och hållfasthet existerar. Ett välgraderat genomsläppligt material där små partiklar fyller tomrummen mellan större partiklar (*figur 2.6*), kommer att leda till en ökning av sammanlänkningen av kalcitkristaller vilket leder till att hållfastheten i marken kommer att öka (Ismail et al., 2002a).



**Figur 2.6:** En 2D-skiss av ett väl graderat friktionsmaterial med en tydlig koppling mellan partiklarna.

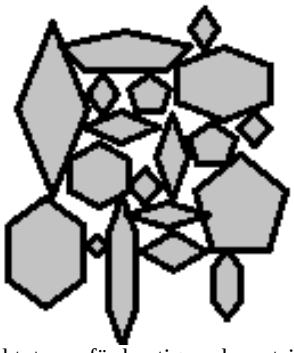
***Densitet*** – En högre densitet kommer att ha en positiv effekt på hållfasthetsökningen efter behandlingen (Ismail et al. 2000a, van Paassen 2009a, Ismail et al. 2002a). Packning av jorden kommer att positionera partikeln bättre i förhållande till varandra vilket kommer att förbättra jordens interlocking effekt. Dock kommer en alltför väl packad jord med en mycket hög densitet att hämma permeabiliteten i marken, vilket gör det svårt även för vatten att flöda genom joden. Men Ismail et al. (2002a) drar slutsatsen att endast mängden utfällda kalcitkristaller i själva verket inte räcker för en hög hållfasthetstillväxt. Även mängden kontaktytor samt en optimal densitet verkar vara avgörande.

***Kontaktytorna*** – Kalcitkristaller använder jordpartiklarnas ytor som kärnbildningssäten (dvs. där kristallerna kan växa) och kommer att skapa bindningar vid de punkter där kornen är i kontakt med varandra (van Paassen 2009a, Rong et al., 2011, Pris 2012). Pris (2012) tillägger att flera behandlingar med CIPS resulterar i att dessa kontaktytor blir större och starkare för varje behandling (*figur 2.7*).



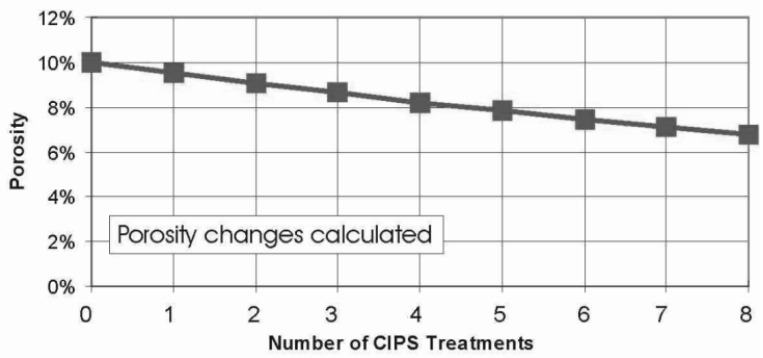

**Figur 2.7:** Illustration över hur kalcitkristallerna täcker ytorna runt jordpartiklarna och hur en skapa kontaktpunkt kan se ut (Price, 2012).

***Form och kantighet hos jordpartiklarna***– Ismail et al. (2002a) förklarar att formen och kantigheten hos jordpartiklarna har ett stort inflytande i hållfathetsökningen. Ju rundare och smidigare partiklarna är desto större blir kontaktytorna, vilket resulterar i ett lägre behov av mängden kalcitkristaller för att uppnå samma styrka som för ett material som endast innehåller spetsiga partiklar. Figur 2.8 visar hur små kontaktytorna kan bli om partiklarna är kantiga i stället för rundade som visas i figur 2.6.



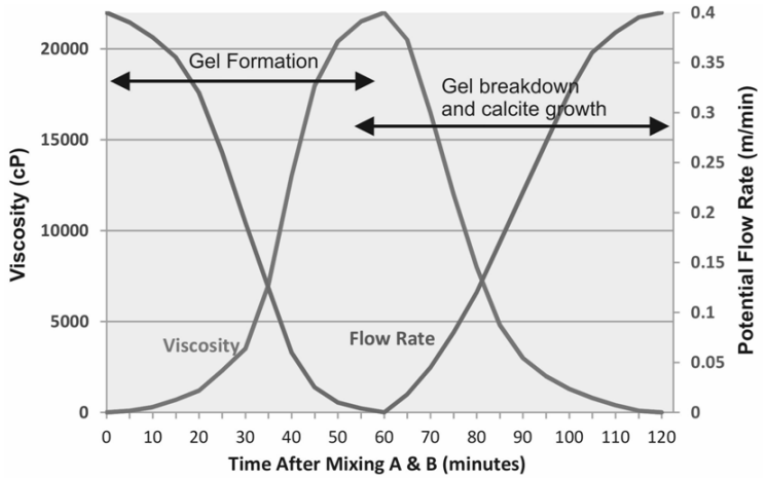
**Figur 2.8:** Kontaktytorna för kantiga och spetsiga jordpartiklar.

***Porositet*** – Det är ganska uppenbart varför porositeten är av stor betydelse för vätskors förmåga att tränga in i porerna. Ju högre viskositeten är, desto större betydelse har en god porositet och öppna porkanaler. Tatzki (2003) anger att CIPS cementering nästan fungerar för oavsett material så länge som vätskan kan tränga in och fylla hålrummen. Price (2012) visar genom experiment på finkornig kvartssand med en initial porositet på 10 % att förändringen i porositeten är ganska linjär, med en minskning på cirka 0,4 % per CIPS behandling (*diagram 2.8*). Detta bevisar att porositeten kommer att förbli relativt oförändrad från en behandling till nästa vilket styrker argumentet att CIPS endast orsakar en väldigt liten förändring porositet.

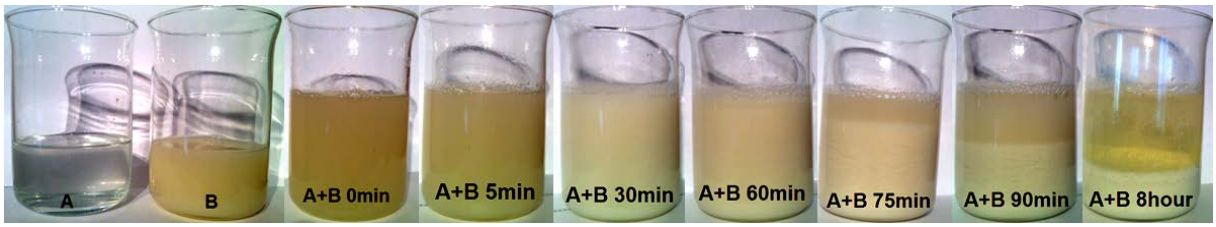



**Graf 2.8:** Förändring i porositet för finkornig kiselsand (ursprunglig porositet 10 %) med antalet CIPS behandlingar (Price, 2012).

***Viskositet*** – Viskositet för vatten är knappt 1 cP och standard receptet för CIPS (för 20-25 ºC) har, enligt Kucharski et al. (1996a), efter blandning en viskositet av 3 cP. Detta är mycket nära vatten eftersom olivolja, som en jämförelse, har 81 cP (Wikipedia, 2012a). Price (2012) förklara vidare att viskositeten hos CIPS kommer att öka till cirka 10-20 cP efter ca 5 min på grund av bildning av gelé. Efter 10-15 minuter uppnås en viskositet av omkring 200 cP och efter 30 minuter kommer den att ha ökat ytterligare till omkring 3000 cP. Toppen uppnås efter ca 60 min med en viskositet på omkring 20 000 cP. Därefter följer en minskning av viskositeten när kalcittillväxten startar. Sekvensen för ökningen och minskningen i viskositet kan studeras i figur 3.9. Price (2012) fortsätter att förklara genom sina experiment att den initiala flödeshastigheten för vätskan är ca 0.4 meter per minut, denna flödeshastighet kommer att avta allt eftersom viskositeten hos vätskan ökar, efter en timme är flödet obefintlig på grund av den bildade gelén. Graf 3.9 visar förhållandet mellan viskositet och flödeshastighet som en funktion av tid som understryker hur viktig tiden är under injekteringsfasen. För kallare injekteringsförhållanden, runt 10 ºC, behövs mer av enzymet ureas för att uppnå samma resultat som för behandlingar i 20 ºC, och för detta recept för 10 ºC är den initiala viskositeten runt 5-7 cP (Price, 2012).




**Graf 2.9:** Förhållandet mellan viskositet, potentiell flödeshastighet och tid (Price, 2012).




**Figur 2.9:** Bilder på hur viskositeten ändras med tiden, det är uppenbart från bilderna att viskositeten är som störst runt 60 minuter efter blandning och sedan långsamt minskar igen. Redan vid 75 minuter är utfällningen synlig för ögat, och vid 8 timmar är den fullt utvecklad med kalcitkristaller som den tjockare koncentrationen vid botten av glasbehållaren och den förbrukade (överskott) vätska på toppen.

***Vätsketryck*** – CIPS är utvecklat för att fylla hålrummen i jorden med en lösning som sedan fäller ut kalcitkristaller, därför är det viktig att behålla den ursprungliga strukturen i marken (dvs. inte orsakar olika jordbrott). Följaktligen behöver trycket hållas under det rådande konsolideringstrycket vid injekteringspunkten, detta för att undvika hydraulisk spräckning (Price, 2012). Om injekteringen sker under grundvattennivån måste vätsketrycket vara högre än det hydrostatiska trycket men lägre än konsolideringstrycket (Price, 2012). Detta kommer att resultera i att vätsketrycket kan variera och måste fastställas i enlighet med varje enskilt byggarbetsplats där markprofilen avgör arbetstrycket.

***Flödeshastighet*** – Pris (2012) klargör att skapandet av en sfärisk hållfasthetsökning med en given radie kräver en specifik volym av CIPS, denna vätskevolym är lika med volymen av porerna inom den angripna jordvolymen. Flödeshastigheten måste därför vara tillräckligt hög för att fördela den önskade volymen CIPS-vätska inom den 30 minuters gräns som råder på grund av den kemiska processen som ökar viskositeten (Price, 2012). Pris (2012) fortsätter med att poängtera att flödet också påverkas i hög grad av vätsketrycket eftersom trycket måste hållas lägre än konsolideringstrycket. Andra faktorer som påverkar flödeshastigheten är jordens kornstorlek och permeabilitet. Större jordkorn kan leda till större porer vilket kommer att resultera i en högre

flödeshastigheter samtidigt som viskositeten är en funktion av temperatur och CIPS recept, vilka i sin tur kommer att påverkar tidsfristen för injekteringen (Price, 2012).

***Distribution av CIPS*** – Price (2012) beskriver att för att uppnå en jämnt fördelad hållfasthetsökning krävs att CIPS vätskorna är väl blandade och jämnt spridda i den behandlade jordvolymen. Han fortsätter att meddela att om alla porutrymmena fylls, kommer kristallerna därmed växa, jämnt fördelade, med en storlek stor nog att nå mellan angränsande partiklar samt åstadkomma en homogen cementering.

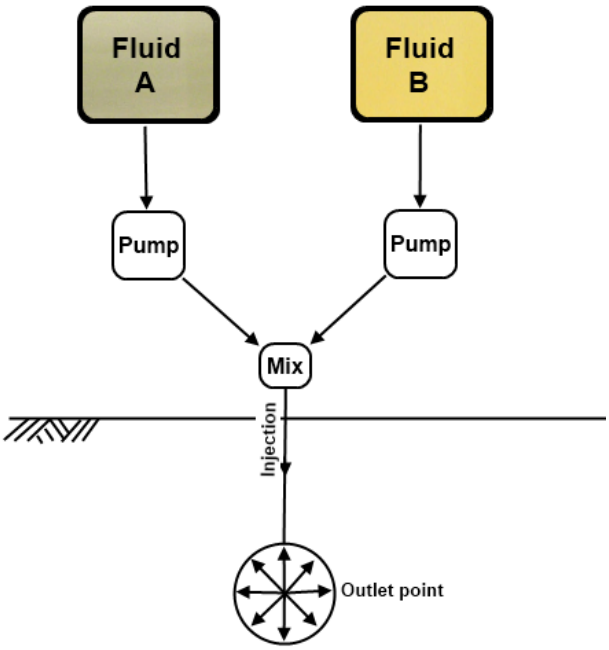
***Grundvatten*** – Det är möjligt att använda CIPS teknologin även under grundvattennivån. Den enda skillnaden är att det hydrostatiska trycket måste tas i beaktning under injekteringsfasen. CIPS-vätskan kommer att driva grundvattnet utåt i en sfärisk form från injekteringspunkten (Price, 2012). Ferris et al. (2003) fortsätter att förklara att ureahydrolys under grundvattnet är effektiv på grund av grundvattnets stödjer utvecklingen av en övermättad lösning på ett fördelaktigt sätt. När lösningen har nått det kritiska värdet av mättnad så kommer kalcit att fälla ut.

***Packning av jorden*** – Price (2012) meddelar att oljeförorening i marken kan ha negativa effekter på CIPS cementeringen på grund av att kalcitkristallerna inte kommer att ha möjlighet att fästa på jordpartiklarna på grund av oljans smörjande effekt.

### 2.3.3 Applikationsprocessen, In-situ

Den operativa processen (*figur 3.10*) att tillämpa CIPS för att stabilisera marken är en ganska okomplicerad process som inte kräver någon omfattande, tung eller avancerad utrustning som andra tillgängliga markstabiliseringsmetoder. De två olika vätskorna (A och B) beredas separat en dag i förväg efter lämpligt recept som baseras på den temperaturprognos för tiden då behandlingen skall ske. Efter lagring över natten (för att ge tillräckligt med tid för vätskor att sätta sig) levereras vätskorna, i tillräckligt stora separata tankar, samma morgonen som behandlingen skall utföras.

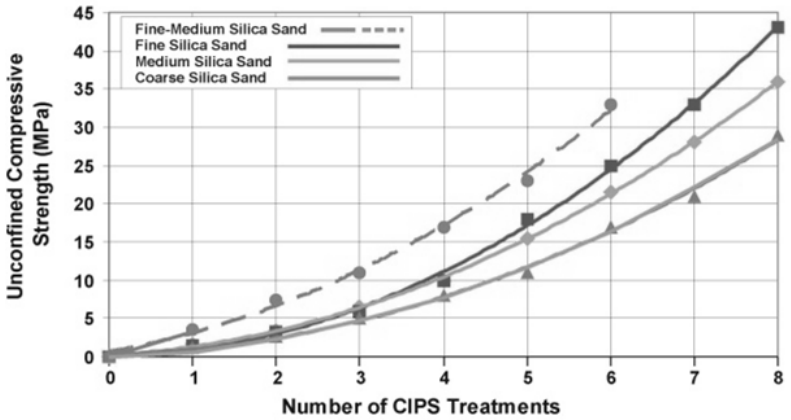
Den korta tid mellan blandning av vätska A och B tills det tillstånd där CIPS-vätskans genomträngande förmåga är liten, på grund av ökningen i viskositet, resulterar i behovet av placera blandningspunkten så nära injekteringspunkten som möjligt. Därför kommer två pumpar att behövas för detta utförande (Price, 2012).




**Figur 2.10:** Den operativa processen för att injektera CIPS In-situ

### 2.3.4 Hittills uppnådda resultat

Ett antal tester och experiment har tills detta datum utförts i Australien av Dr Graham Pris och hans medarbetare under de senaste 20 åren. De har under denna tid samlat testresultat och data för att bevisa den goda förmågan hos CIPS. Graf 2.10 visar enaxiell tryckhållfasthet för olika sandarter i relation till antalet CIPS behandlingar. Man kan tydligt studeras att tryckhållfastheten ökar med antalet behandlingar, men också att kornstorleken spelar en viktig roll i hållfasthetsökningen. Finkornig sand visar en större ökningar jämfört med grovkornig sand.




**Graf 2.10:** Enaxiell tryckhållfasthet för Silicasand i olika storlekar som resultat av antalet CIPS behandlingar (Price, 2012).

Price (2012) beskriver att hittills har det mest framgångsrika tekniken för att uppnå en jämn hållfasthetsökning i marken varit genom att utföra singulära injekteringer genom rör, vilket kan studeras i figur 2.11. Den vänstra bilden visar sfärer som skapats i lagrad sand med en uppenbar skillnad i densitet eller permeabel förmåga, vilket resulterar i skillnader i hur CIPS Fluid tränger ut genom sandlagren (Price, 2012). Bilden till höger illustrerar en relativt ideal sfär med diameter 25 cm. Rörinjekteringar är processen som det Australiensiska företaget Earth Bond Solutions Pty Ltd använder sig av för att injektera CIPS lösningen i marken.

**Figur 2.11:** *Till höger:* CIPS cementerade sfärer i lagrad sand med olika densitet. *Till vänster:* en mindre sfär med diametern 25 cm (Price, 2012).

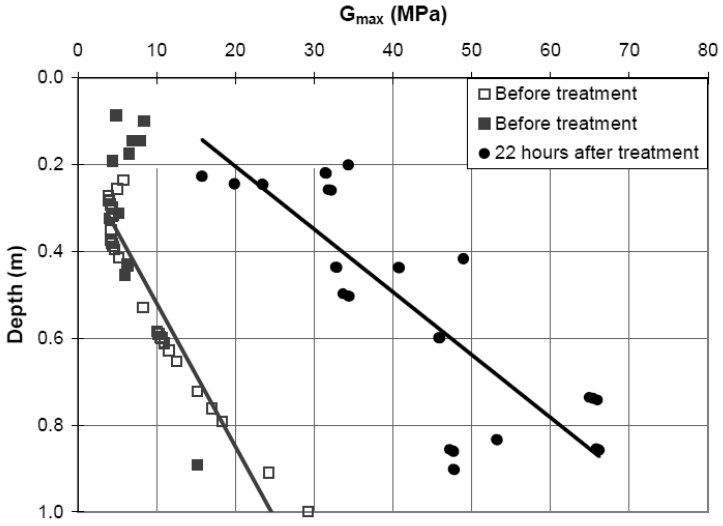
År 1999 utfördes ett experiment i Kent, Storbritannien, med syfte att undersöka om CIPS kan användas för att stabilisera de gamla järnvägsbankarna i Londons tunnelbanesystem som konstruerats av kolaska. En modell av dessa järnvägsbankar konstruerades i ett temperatur kontrollerat rum med måtten 1 meter hög, 3 meter bred och 10 meter lång. 40 ton aska användes och delades in i 2 meter långa segment med ett vattentätt geo-membran som avskiljare. Askan var löst deponerad utan mekaniska packningsinsatser i en temperatur av 10 °C. Fyra sektioner besprutades med olika recept av CIPS och en sektion behandlas endast med vatten. Den maximala

skjuvhållfastheten hos jorden utvärderades genom mätning av Rayleigh-vågs hastigheten (Vr) och med användning av ekvationen 2.1 nedan beräknades skjuvhållfastheten (Kucharski et al. 2000).

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (3.1)$$

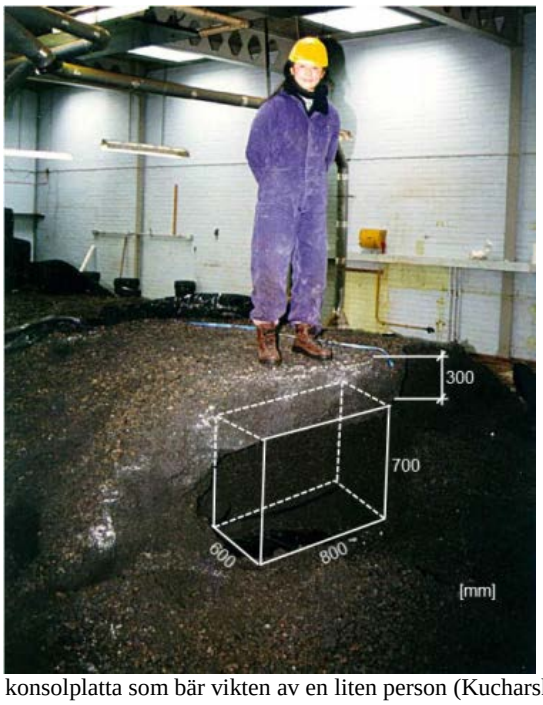
$\rho$ = Bulkdensitet av jorden [ton/m$^3$]
$V_S$ = Skjuvvågshastighet [m/s], $V_S \approx V_R/0.95$

Det mest framgångsrika CIPS receptet resulterade i en fyrfaldig ökning av askans skjuvhållfasthet jämfört med den obehandlade sektionen av testbanken (*graf 2.11*) (Kucharski et al., 2000).



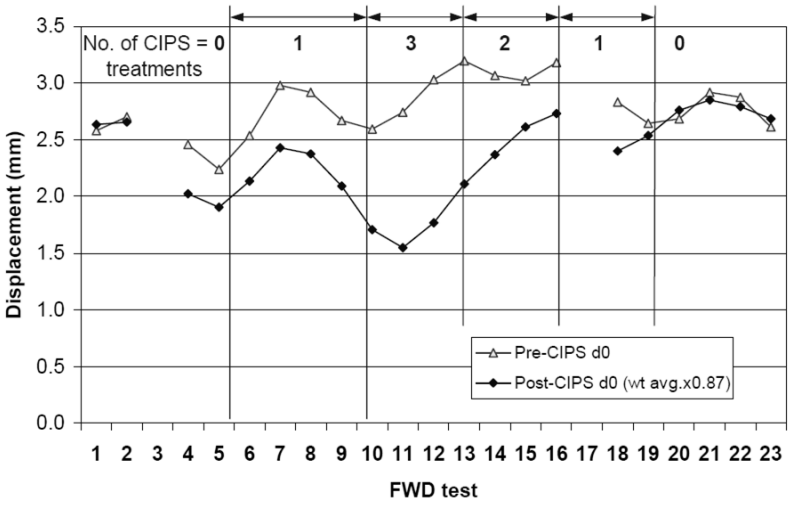

**Graph 2.11:** Den maximal ökning av askans skjuvhållfasthet, $G_{max}$, efter en behandling med CIPS vid en temperatur på 10 ºC (Kucharski et al., 2000)

Under nedmonteringen av testbanken skapades ett överhäng där den utskjutande konsolens tjocklek var 0.3 meter. Denna konsol var stark nog för att kunde bära vikten av en liten person (*figur 2.12*) (Kucharski et al., 2000).




**Figur 2.12:** En konsolplatta som bär vikten av en liten person (Kucharski et al. 2000).

På grund av de resultat som uppnåtts i försöket på askbanksmodellen i Kent, som förklaras ovan så beslutades det att utföra en fullskalig testbehandling med CIPS på en aktiv järnvägsbank som används inom Londons tunnelbanesystem. CIPS-vätskan applicerades med två metoder, en där vätskan sprutades från ett handhållet rör som bars längs rälsen och en där ett rutnät av plaströr monterats under rälsen mellan sliprarna. Ett fallviktsdeflectometer-test (FWD test) utfördes på varannan sliper efter behandling från de olika metoderna för att registrera sättningsskillnaden innan och efter behandlingen. Resultaten från dessa mätningar visas i graf 2.12 vilket ger en tydlig indikation på att sättningen minskar efter behandling med CIPS (Vaughan et al. 2001).




**Graf 2.12:** Förändring i sättning uppmätt genom användning av fallviktsdeflektometer-test (FWD test) längs testsektionen av järnvägsbanken i Londons tunnelbanesystem. (Vaughan et al., 2001)

## 2.3.5 Fördelarna med CIPS

Det finns ett antal fördelar med att förstärka jordens egenskaper genom behandling med CIPS, listan nedan presenterar de idag kända positiva aspekterna inklusive en kortare förklaring.

**Lätta och smidiga maskiner –** Utrustningen som behövs för att utföra dessa platsinjekteringer är liten och väger lätt. Konsolideringstrycket måste alltid överskrida den pumpade CIPS-vätskans tryck för att motverka att hydraulisk spräckning uppkommer. Detta resulterar i ett pumpsystem som kan leverera väldigt små volymer med låga tryck föra att fylla porerna mellan kornen. Dessa pumpar är oftast väldig behändiga och kan lätt transporteras till väldigt trånga utrymmen eller till platser där jorden inte är stark nog för tunga grundläggningsmaskiner. Förutom pump och injekteringsrör så behövs två vätskebehållare och en mindre kompressor.

**Kontrollerbar hållfasthetsökning –** På grund av att uppbyggnaden av hållfasthet sker gradvis med antal injekteringer utförda på samma plats så kan hållfastheten regleras i ungefärliga steg. Detta ger möjligheten att sikta in sig på en särskild hållfasthetsskala vilket kan leda till reducerade kostnad då inte konstruktionerna byggs överstarka.

**Billig metod –** De ingående kemikalierna är vanligt förekommande och oftast till låga kostnader, den enda negativa aspekten är att en av kemikalierna inte går att få tag på i Sverige och måste skickas från utrikes. Desto lägre hållfasthetsökningen som är eftersökta desto billigare blir metoden, etableringskostnaden för de små maskinerna är även den relativt låg.

**Kort härdningsprocess –** Tiden för att den behandlade jorden ska ha utvecklat större delen av hållfastheten uppnås mellan ca 3-14 dagar.

**Jorden behåller sin permeabilitet –** Jorden kommer bibehålla sin permeabilitet efter att den har blivit behandlad med CIPS, vilket inte kommer påverka grundvattenströmningen negativt eller skapa något portryck.

**Kan appliceras över och under grundvattenytan –** CIPS fungerar lika effektivt både över och under grundvattenytan. Den enda skillnaden är att vid injektering under grundvattenytan så måste injekteringstrycket överskrida det hydrostatiska trycket och tränga undan vattnet.

**Samma process som naturlig sandsten** – Denna process som skapar artificiell sandsten är samma process som den naturliga processen där naturen bildar sedimentära stenarter.

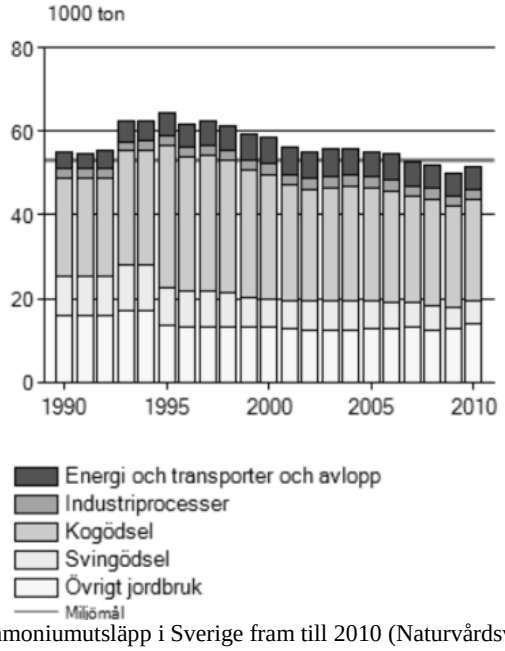
**Inga farliga ingående kemikalier** – Alla ingående kemikalier är redan ofta förekommande i den byggda miljön, jordbruket samt i matindustrin (läs vidare i del 2.3).

**Robust kemisk reaktion –** Den kemiska reaktionen som styr denna process är en så kallad robust reaktion. En robust reaktion innebär att den inte är så känslig för om de ingående parametrarna skulle ändras något. Detta är väldigt förmånligt för implementerandet i byggproduktionen på fältet.

**Luft/syre –** CIPS tar ingen skada eller negativ påverkan i att exponeras för luft eller syre under härdningsprocessen. Den enda påvisade effekten av luft och syre är att den behandlade jorden uppnår ännu högre hållfasthetsvärden.

### 2.3.5 Osäkerheter med CIPS

En osäkerhet med CIPS metodiken är den vätska som skapas som en överskottsprodukt efter att utfällningen av kalcitkristallerna. Överskottsvätskan innehåller ammoniumklorid löst i vatten, $NH_4Cl + H_2O$. Osäkerhet råder kring vilka lagar och förordningar som existerar i där Naturvårdsverket eventuellt reglerar handskande av ammoniumklorid i naturen. Naturvårdsverket (2012) redovisar att den totala produktionen av ammonium som en avfallsprodukt i Sverige nådde 52 000 ton för året 2010, av vilket jordbruksindustrin stod för 85 % (diagram 2.13). Att döma av detta diagram är det ganska acceptabelt att medge viss frisättning av ammonium, så länge det inte omvandlas till ammoniak som är en växthusgas.




**Graf 2.13:** Ammoniumutsläpp i Sverige fram till 2010 (Naturvårdsverket, 2012)

### 2.3.7 Sammanfattning

Som nämnts tidigare CIPS har varit under forskning och utveckling under de senaste 20 plus åren. Denna forskning och utveckling har huvudsakligen genomförts inom Australien, där det enda existerande företag som utför jordstabiliserande genom användning av CIPS har sitt hem. CIPS metoden har visat under dessa år att den kan leverera ett konsekvent, pålitlig och förutsägbar hållfasthetsökning både i laboratorieförsök och i fältförsök. För att utöka denna metod och öka medvetenheten om dess potential i världen, är det av stort intresse att genomföra både laboratorie-och fältförsök utanför Australien (med sitt varma klimat och ganska jämnt graderade sandjordar). Men tonvikten ligger inte bara i undersökningen av de fysiska klimatskillnaderna, utan också i att öka medvetandet om denna metod i världen, vilket kan generera mer forskning i ämnet och därmed optimera metoden vidare.

Följande kapitel testar CIPS metoden i både laboratoriemiljö samt att den testas i ett litet fältförsök. Det främsta fokusen har legat på att bedöma förändring av några av de viktigaste parametrarna, en förändring som uppstår när denna metod exporteras internationellt för att möta olika klimat och markförhållanden. Dessa parametrar är huvudsakligen lägre genomsnittliga marktemperaturen och skillnaden i jordens sammansättning. Förhoppningsvis kommer denna studie att kunna ge en grov uppskattning av möjligheterna med CIPS metoden utifrån ett skandinaviskt perspektiv samt belysa vissa områden som innehåller osäkerheter och kommer att vara i behov av ytterligare forskning och utveckling.

# Kapitel 3

# Laboratoriet utvärdering

Laboratoriearbetet har utförts vid Kungliga Tekniska Högskolan där ett stort temperatur kontrollerat rum har använts för att styra blandnings- och cementeringsförutsättningar för proverna. CRS utrustning har använts för att utföra enaxliga tryckhållfasthetstester vilken även den har tillhandahållits av samma universitet.

## 3.1 Temperatur förhållanden

De olika CIPS recepten baseras på den temperatur vid vilken den kemiska reaktionen är avsedd att ske (dvs. temperaturen i jorden vid dagen för injekteringen). Där utav är det väsentligt att undersöka den årsmedeltemperaturen på ett djup där temperaturen närmar sig något av ett stabilt tillstånd över året. Enligt Price (2012) är den lägsta temperaturen där CIPS kan verka aktivt runt 5-10 °C vilket förmodligen kommer att begränsa tillämpningssäsongen i Sverige till slutet av våren till början/mitten av hösten.

Temperaturen vid ett djup som håller en jämn temperatur över året kan uppskattas till ungefär densamma som årsmedeltemperaturen för lokalisering av byggarbetsplatsen (SGU, 2012). SMHI (2012) redovisar på deras hemsida att den genomsnittliga medeltemperaturen för Stockholm var 8 ºC under 2011, vilket är nära temperaturen 8.6 ºC som Svenska Geotekniska Institutet (2001) rapporterar som den genomsnittliga marktemperaturen för Stockholm. Om medeltemperaturen istället beräknas för perioden april 2011 till oktober 2011, vilket skulle vara applikationssäsongen för CIPS blir den 13.4 ºC (baserat på SMHI:s medeltemperatur för varje enskild månad under 2011). Temperaturens utbredning i marken är mycket komplex och beroende av många olika faktorer vilka beskrivs i Jansson (2009), dessa faktorer resulterar i en fasförskjutning för marktemperaturen jämfört med de temperaturförändringar som sker i atmosfären. Detta leder till att markmedeltemperaturen som redovisas ovan inte stämmer exakt, speciellt med djupet.

Antagandet om den begränsade applikationssäsongen för CIPS resulterar i en ungefärlig laboratorietemperatur av (8 +13.4) / 2 = 10.7 °C. Därför har CIPS receptet anpassats till temperaturspannet 5-10 °C.

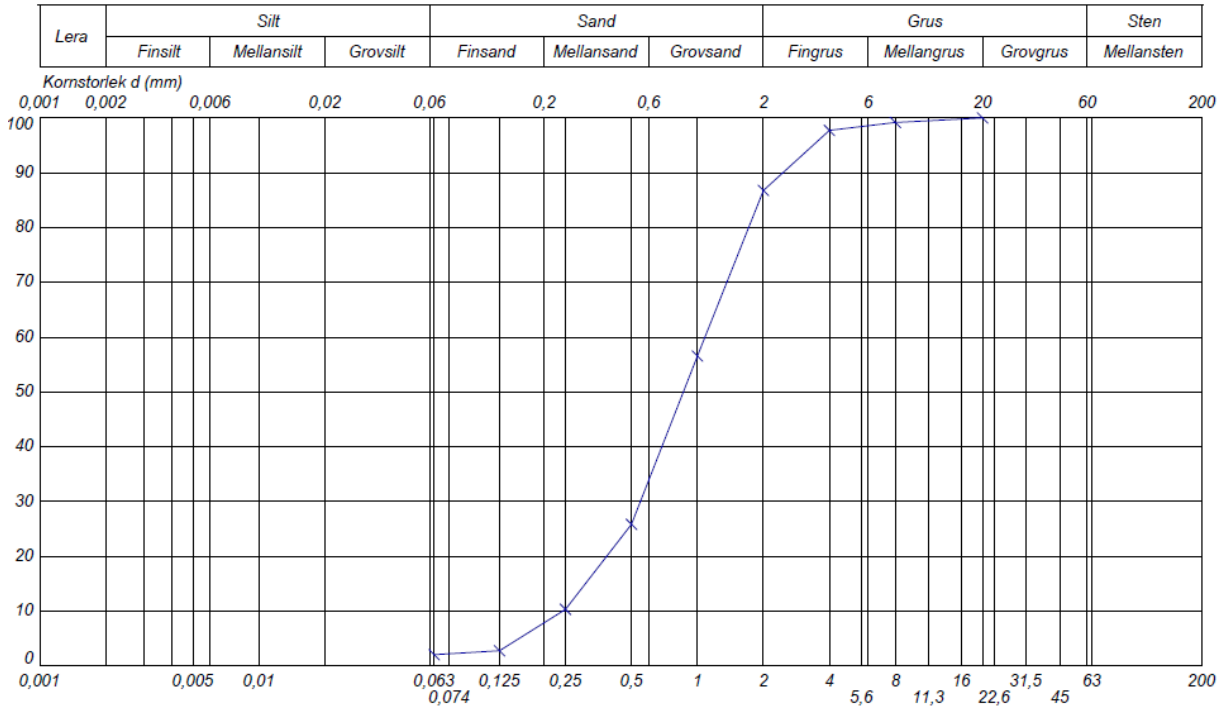
## 3.2 Jordparametrar In-situ

Tyngdpunkten i denna studie är att undersöka om CIPS är användbar för tillämpningar i Svenska jordar och de temperaturer som råder här. Dessutom har många laboratorietester utvärderats på olika sandarter i Australien vilket gör det ganska ointressant att testa liknande jordar igen. Därför har fokuseringen för dessa laboratorietester legat på en friktionsjord som hämtats från ett lokalt bygge i Stockholmsregionen. Jordens In-situ parametrar utvärderas mot ett djup av 1 meter under marknivå och resultaten från laboratorietesterna kommer att utvärderas mot dessa parametrar.

En viktig del i undersökningarna av lämpligheten för att använda CIPS i Skandinaviska förhållanden är slutförandet av en större mängd enaxliga tryckhållfasthetstester. En annan faktor som påverkar denna utvärdering är den osäkerheten och variansen av varje jordparameter i fält. Denna variation är i allmänhet större än variationen och noggrannheten i att isolera varje jordparameter i omfattande parameterstudier i laboratoriet. På grund av betydelsen av antal utförda tester och variansen inom fältparametrarna så har några av nedanstående parameter undersökningar utförts i enlighet med något förenklade och snabbare metoder.

***Kornstorlek*** – Kornstorleken har analyserats genom användning av siktar för att bestämma mängden av varje kornstorlek. Vidare har den maximala kornstorleken satts till 1/10 av kärnprovets diameter vilket resulterar i en maximal kornstorlek av 5 mm (Larsson, 1989).

Kornfördelningskurvan av jorden som har hämtats in från byggplatsen har bestämts genom en sikt analys som utförts av Sweco Geolab i Stockholm. Kornfördelningen har fastställts till d10 = 0.242 mm, D60 = 1.082 mm och d90 = 2.454 mm, för vidare studier av siktanalys se graf 3.1 nedan, eller bilaga A för hela den redovisade siktanalysen.




**Graf 3.1**: Siktanalys av materialet som hämtats från byggplatsen vid Vallagränd, Haninge (*bilaga A*)

***Kantighet hos jordpartiklarna –*** Såsom nämnts ovan, är ökningen i styrka delvis beroende av kantigheten hos materialet. De flesta av kornen har analyserats genom en petrografi sammansättningsanalys vilket visar på en något kantig form av kornen (*bilaga B*).

***Packning av jorden –*** Samma petrografiska analys som nämns i stycket ovan visar att den mest frekvent förekommande bergarten av den undersökta sanden är Kvarts och Granit, men även fraktioner av diabas, fältspat och Biotit har också påträffats, (*bilaga B*).

***Densitet, ρ –*** In-situ densitet av jorden beräknades genom en okomplicerad metod där toppskiktet på 0.5 meter ute i naturen först täcktes av. Efteråt så grävdes en liten grop vilken hade dimensionen (270*250*83) mm. Denna grop täcktes sedan med en tunn plastfolie och fylldes med vatten för att fastställa volymen av den avlägsnade jorden till 4.275 liter. Den avlägsnade jorden vägdes och en In-situ densitet av 1921 kg/m$^3$ bestämdes. Detta stämmer väl överens med de In-situ mätningar som registrerade en densitet av runt 1900 kg/m$^3$ 1 meter under markytan. Denna undersökning utfördes genom en CPT sondering vid punkten 12GT05 som ligger nära platsen där fältförsöket kommer att genomföras (*bilaga C*).

Slutligen torkades den fuktiga sanden (6.9151 kg fuktig sand) genom en något enklare metod där sanden spreds ut i et tunt, tunt lager på en plastfolie i solen. Den torra vikten av jorden registrerades till 6.5178 kg och den torra densiteten kunde beräknas till 1810 kg/m$^3$ genom användning av ekvation 3.1 (Larsson, 2008).

$$\rho_D = \frac{W_S}{V} \qquad (3.1)$$

$\rho_D$ = *Torrdensietet [kg/m$^3$]*
$W_S$ = *Vikt, torkad sand[kg]*
$V$ = *Total volym [m$^3$]*

***Vattenkvot, ω –*** Den naturliga vattenkvoten bestämdes till 6.1% genom användande av ekvation 3.2.

$$\omega = \frac{W - W_s}{W_s} * 100 \qquad (3.2)$$

*ω = Naturlig vattenkvot [%]*
*W = Vikt av sanden i markfuktigt tillstånd[$m^3$]*

***Porositet, n –*** Porositeten av jorden bestämdes genom att placera den avlägsnade jorden från den lilla gropen som förklarats ovan i en behållare med vatten, därefter registrerades ökningen i volym. Denna volymökning är volymen av den avlägsnade jorden och porositeten beräknades till 24.7 % med användning av ekvation 3.3 (Larsson, 2008).

$$n = \frac{V - V_S}{V} = \frac{V_V}{V} \qquad (3.3)$$

*n = Porositet [%]*
*$V_S$ = Volym solider [$m^3$]*
*$V_V$ = Volym porer [$m^3$]*

***Friktionsvinkel, ϕ*** – De geotekniska undersökningarna som utförts med hjälp av CPT sondering indikerar en okorrigerad friktionsvinkel på mellan 38 till 44 grader ner till ett djup av 3 meter med ett spetstryck på mellan 5-11 kPa. Bergdahl et al. (1993) fastställer att med ett spetstryck på mellan 5-20 kPa kan sandens densitet antas vara mellan medelhög till hög med en friktionsvinkel på mellan 35-40 grader (*tabell 3.1*). I detta fall har friktionsvinkeln fastställd till 37 grader där både de tidigare nämnda CPT sonderingarna samt expertis från erfarna geotekniska ingenjörer har vägts in i bedömningen. Collins och Sitar (2009) anger att friktionsvinkeln för cementerad sand liknar den för ocementerade sand, men kohesionen är oftast en funktion av både typ av cement samt kantigheten hos jordpartiklarna.

| Relativ consistency | Pyramide penetration test, $q_t$ [MPa] | Friction angle, $\phi^0_k$ | Young modulu's, $E_k$ [MPa] | Weight sounding, Vimk [hr/0.2m] | Ram sounding, HfA $(netto)_k$ [ram/0.2m] |
|---|---|---|---|---|---|
| very low | 0-2.5 | 29-32 | <10 | 0-10 | 0-4 |
| low | 2.5-5.0 | 32-35 | 10-20 | 10-30 | 2-8 |
| medium high | 5-10 | 35-37 | 20-30 | 20-50 | 6-14 |
| high | 10-20 | 37-40 | 30-60 | 40-90 | 10-30 |
| very high | >20 | 40-42 | 60-90 | >80 | >25 |

**Table 3.1**: Karakteristiska värden för marksonderingar (Bergdahl et al., 1993).

***E-Modulen, E –*** E-modulen av 21.7 MPa härrör också från samma CPT sondering som nämnts ovan vid ett djup av 1.0 meter.

## 3.3 Beredningstekniker för kärnprover

För att kunna testa CIPS-behandlade jordar i laboratorium så har två typer av kolvprovhylsor skapats för att kunna cementera sanden till önskade dimensioner. Den ena typen av kolvprovshylsa bör vara anpassad för upprepade behandlingar, medan den andra typen skall användas för prover skapade genom endast en omrörd behandling. Den sistnämnda kolvprovshylsan har ordnats så att processen med att skapa en provkropp är snabb och lätt att använda och så att många prover kan beredas med relativ stor säkerhet på att de är varandra lika.

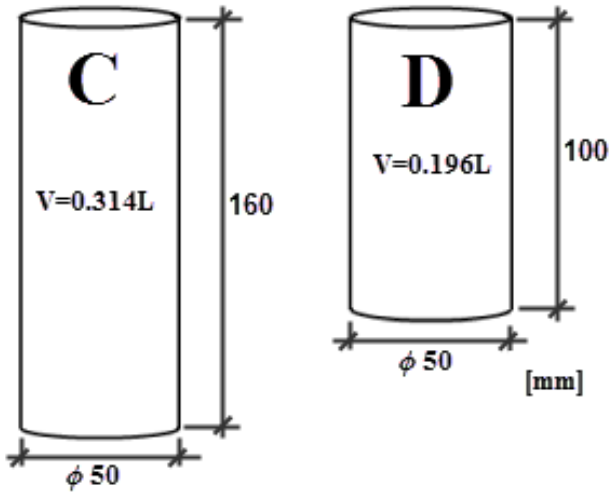
***Kolvprovhylsa för singulär behandling –*** Genom att modifiera den standardiserade Svenska kolvprovhylsan så att den blev kortare så skapades en hylsa som lätt och snabbt kunde användas för att skapa många prover med stor upprepningssäkerhet (*figur 3.1*). Tanken är att blanda den beräknade torrvikten av sand (beräknad för den målvolym, och CIPS-vätska i en skål) varefter blandningen del för del placeras i cylindern under vibrering. Cylindern är helt tätad med hjälp lock och eltejp. Skälet för att bygga prover på detta sätt är att säkerställa att samma mängd CIPS kan kontrolleras och fördelas jämnt genom hela provet och att skapandet av proverna är lätta att upprepa med en hög säkerhet att alla prover är homogent cementerade. Dimensionen för denna modifierade kolvprovhylsa visas i figur 3.3, cylinder D.

**Figur 3.1:** Modifierad kolvprovhylsa med tätande lock för singulär behandling.

***Kolvprovhylsa för multipla behandlingar –*** För att kunna utsätta standardiserade Svenska kolvprovhylsorna för flera CIPS behandlingar så byggdes en speciell provberedningscell (*figur 3.2*). I denna provberedningscell så sker injekteringerna från botten för att vara säker på att all luft drivs ut och inte blir instängd i porerna i sanden. Denna cell konstruerad på ett sådant sätt att de Svenska standardiserade kolfiberhylsorna (*höger cylinder i figur 3.2*) skulle passa. Dessa standardiserade kolfiberhylsor valdes så att avlägsningen av den cementerade kroppen kunde ske med hjälp av en kolvprovsuttryckare (*figur 3.4*), vilken ser till att provet blir så lite stört som möjligt. Dimensionen för denna standardiserade kolvprovhylsa visas i figur 3.3, cylinder C.

**Figur 3.2:** *Vänster*: kolvprovhylsa i akrylplast. *Mitten*: akrylplasthylsa med fyllning av sand. *Höger*: Svensk standardiserad kolvprovhylsa i kolfiber.

***Volym –*** Två olika kolvprovhylsor har använts, en längre en, C, för att konstruera prov genom injekteringer och en kortare en, D, för att skapa prover där CIPS och sand blandas i en skål bredvid (*figur 3.3*). Volymen av den stora kolvprovhylsan är 0.314 liter och den lilla har en volym av 0.196 liter. Volymen av hylsa C också verifieras genom att mäta det vatten som fyllde kammaren vilket visade 0.316 liter.




**Figur 3.3:** Dimensionerna av de två olika kolvprovhylsorna som konstruerats för laboratorietesterna.

***Densitet, $\rho_{core}$*** – Torrdensiteten av de skapade proverna måste överensstämma med torrdensiteten i fält. För att kontrollera att rätt mängd sand används så vägs sandens för att överensstämma med det samband som redovisas nedan i ekvation 3.4.

$$\rho_{dry} * V_{core} = W_{core} \quad (3.4)$$

$\rho_{dry}$ = *Torrdensiteten i fält[kg/m$^3$]*
$V_{core}$ = *Volym för respektive kolvprovhylsa [m$^3$]*
$W_{core}$ = *Vikten av den behövda sanden [kg]*

Kolvprovhylsa C och D behövde 0.578 kg och 0.3552 kg respektive.

Massan av den behövda mängden sand är nu känt. Packningsförfarandet som beskrivs nedan användes därefter för att säkerställa att de ovan beräknade massorna får plats i respektive kolvprovhylsa med en lämplig kompakteringsgrad. Enligt Larsson (2008) så används torrdensiteten främst för att kontrollera och säkerställa en korrekt kompakterings grad i de prover man vill skapa (Larsson, 2008).

***Porositet, n*** – Porositeten hos det skapade provet bestämdes genom att fylla den tomma kolvprovhylsan med vatten, tillsätta jorden i ett mycket torrt tillstånd, vibrerande hylsan för kompaktering och sedan mäta det undanträngda vattnet. Skillnaden mellan volymen av kolvprovhylsan och den undanträngda volymen vattnet blir porositeten hos varje enskilt jordprov.

***Kompaktering*** – Kompakteringen av proverna utfördes med hjälp av en metod där den beräknade torrvikt sand förblandades i en skål med lite mer CIPS-vätska än volymen porer vilket gjorde att provet erhöll något mera vätska än vad som behövdes för att skapa full vätskemättning. Blandningen omrördes noggrant under ca 2 minuter sedan placerades 60 gram färdigblandad sand och CIPS-vätska i hylsan, varefter cylindern vibreras under ca 3 minuter så att alla luftfickor och luftfyllda porer hade lämnat. Nästa sats av 60 gram CIPS-mättad jord tillsattes och vibrerades igen, samma procedur upprepas tills hela blandningen hade fyllt hylsan och den önskade densitet lika med In-situ densitet hade uppnåtts (Shambhu et al. 2006 ).

***Kolvprovsurtryckning –*** Några tester har utförts för att hitta den bästa och enklaste sättet att extrahera den cementerade provkroppen från kolvprovhylsan utan att orsaka skada genom spänningar, tvärkrafter eller för mycket friktion mellan jord och den inre väggen av hylsan. Ett gummimembran användes först mellan hylsan och jorden. Svårigheter uppstod snabbt om hur man extraherar luften mellan den inre väggen av cylindern och gummimembranet. En metod som visade sig fungera mycket bättre var att applicera ett tjockt skikt Vaselin till insidan av cylindern, detta skikt fungerade väl genom att minska mantelfriktionen hos hylsan till obetydliga nivåer. Den cementerade sanden kunde sedan extraheras utan nästan några överförda krafter in i materialet. Figur 3.4 visar den typ av kolvprovsuttryckare som användes i dessa utvärderingar.

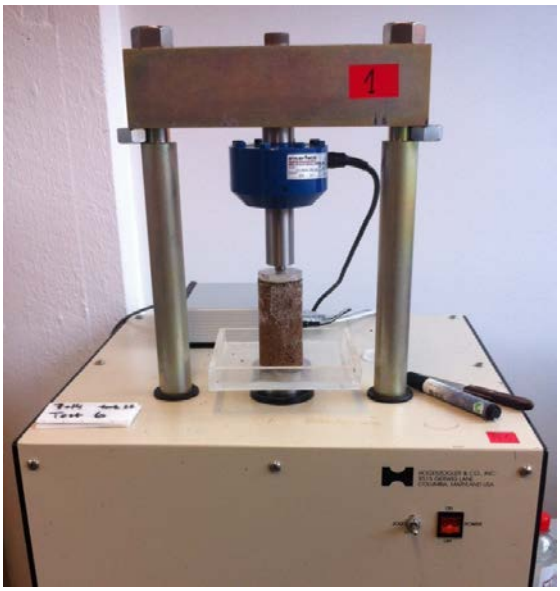
**Figur 3.4:** Kolvprovsuttryckare.

***Injekteringen –*** Packningsmetoden är viktig för att driva ut all luft ur porerna i provkolven. Därför injicerades vatten från botten inloppet vilket fyllde provet gradvis med ett tryck tillräckligt låg för att undvika hydraulisk spräckning. När hela provet var vattenmättat så injicerades CIPS med samma förfarande, från botten till toppen för att ersätta vattnet.

***Temperatur, T*** – För att uppnå samma temperatur som marken In-situ framställdes kolvproverna i ett temperatur kontrollerat rum som hölls vid en stabil temperatur av 10 °C. Hela processen, från att låta varje enskild kemikalie anpassa sig till temperaturen till att utvinna de färdigcementerade proverna utfördes i detta rum.

## 3.4 Enaxliga tryckhållfasthetstester, UCS

Enaxliga tryckhållfasthetstester är enligt Åhnberg et al. (1995) relativt lätta att genomföra och ansedda vara en av de mest lämpade metoderna för att utföra en större mängd prover under en kortare tidsperiod. Testerna i denna undersökning har utförts i en CRS (Constant Rate of Strain) testutrustning, men utan CRS portryckscellen (*figur 3.5 visar en CRS apparat*). Denna metod genomfördes för att erhålla spännings/töjnings diagram från vilka elastisitetsmodulen och maximal tryckhållfasthet kunde utvärderas.




**Figur 3.5:** CRS utrustningen för undersökning av UCS.

60 prover framställdes med längd:diameter förhållandet 2:1 vilket resulterar i en längd av 100 mm och en diameter av 50 mm. Vidare hölls förhållandet kornstorleken:diameter till högst 1:10 (*kornstorleksfördelningskurva kan studeras i bilaga A*). Deformationshastighet sattes till 1 % av provet höjd vilket är jämförbart med deformationshastighet UCS tester på kalkcementpelare (Åhnberg et al., 1995).

Tabell 3.1 visar jordmatrisen över hur laboratorieutvärderingen har genomförts. X-axeln representerar den tid som jordprovet har varit inneslutna i kolvprovshylsan mättade med CIPS-vätska och y-axeln representerar den tid som proverna låtits torka efter att ha avlägsnats från hylsan.

| | Time in CIPS saturated state [days] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Drying time [days] | 22°/10° | 1 | 3 | 7 | 17 | 21 |
| | 0 | -/5 | -/5 | -/5 | -/5 | |
| | 3 | | 5/5 | | -/5 | |
| | 7 | | | | | |
| | 14 | | 5/5 | 5/5 | -/5 | |

the number symbolize how many tested soil samples of each temperature

**Tabell 3.1:** Matris över cementeringstid samt torktid.

**Figur 3.6**: Brottsmekanismer för UCS testerna. *Vänster:* skjuvbrott, *Mitten:* bulk brott, *Höger:* spjälkning

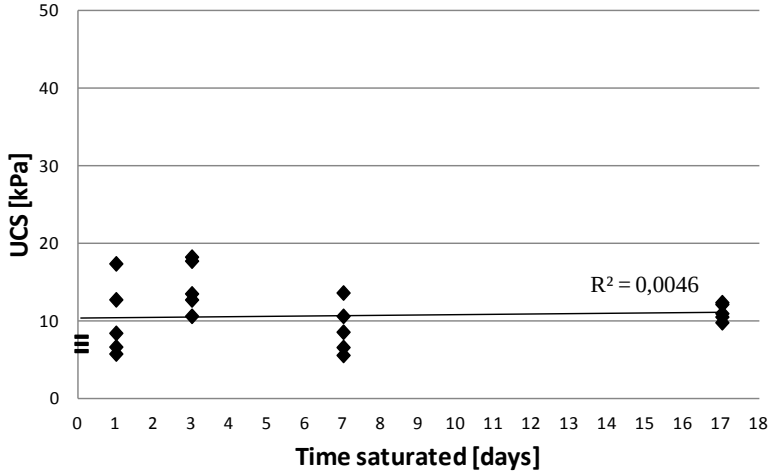
Bortsett från dessa 60 prover konstruerades ytterligare ett prov (*figur 3.7*). Detta prov är något unikt eftersom det byggdes i kolvprovshylsan som är avsedd för multipla behandlingar och visas i figur 3.2, provet utsattes för fem injekteringer alla med 24 timmars intervaller. Före varje injektering injicerades vatten genom sanden för att ersätta all gammal överskottsvätska. Under hela denna process kom provet aldrig i kontakt med luft och det var vätskemättat hela tiden, antingen med CIPS-vätska eller med vatten tills dess att provet avlägsnades ur kolvprovshylsan. De gröna delarna på toppen och botten som visas i figur 3.7 är Plastic Padding vilket är tillsatt för att göra ändytorna helt plana så att provet inte utsätts för ytterligare spänningar genom ojämnheter.

**Figur 3.7:** Provkropp konstruerad genom 5 injekteringer med CIPS. Plastic padding har placerats på topp och botten för att göra ytorna plana.

## 3.5 Resultat

De olika serierna har utvärderats mot varandra för att bilda diagram som ett verktyg för att illustrera förekomsten av eventuella trender i de olika testade parametrarna. Detta har gjorts för att få en förståelse för uppkomsten av den hållfasthetsökning som UCS testerna visar.

***Effekten av härdningstiden –*** Den första parametern som skall utvärderas är om cementeringstiden har en tydlig effekt på hållfasthetsökningen. Graf 3.2 illustrerar fyra olika serier, vardera med 5 testade provkroppar, som har hållits fullständigt mättade med CIPS-vätska under olika cementeringstider i en temperatur av 10 °C. Det är ganska uppenbart att ingen trend i hållfasthetsökning uppstår när proverna har lämnats att cementera en längre tid. Noterbart är även att nästan ingen hållfasthetsökning kan urskiljas vid jämförelse med de provkroppar som har skapats av endast vattenkompakterad sand och provtryckta i vattenmättat tillstånd (*se linjerna i graf 3.2*). Avsaknaden av en trend stöds också av det faktum att korrelationskoefficienten närmar sig noll, R2 = 0,0046 som styrker antagandet att det inte finns något samband mellan tiden i CIPS mättade tillstånd och hållfasthetsökning.

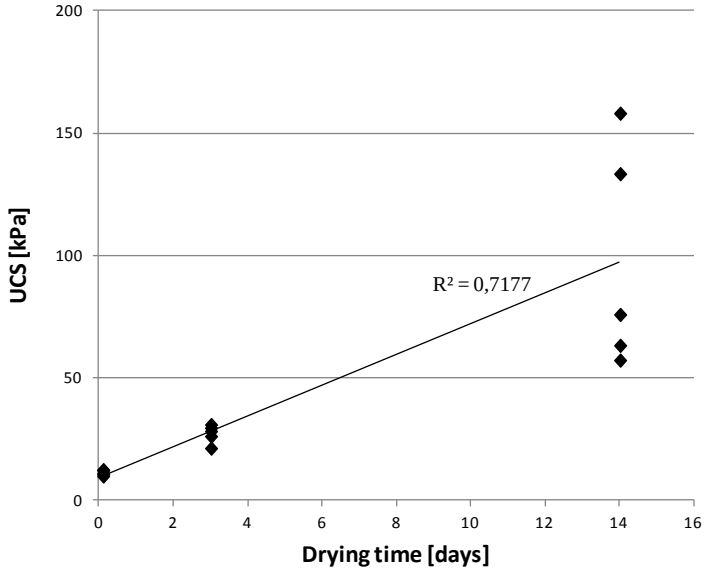



**Graf 3.2:** Förhållandet mellan enaxlig tryckhållfasthet och antalet dagar i CIPS mättat tillstånd. Linjerna till vänster i diagrammet är testresultaten som grundas endast på vattenmättad vattenkompakterad sand.

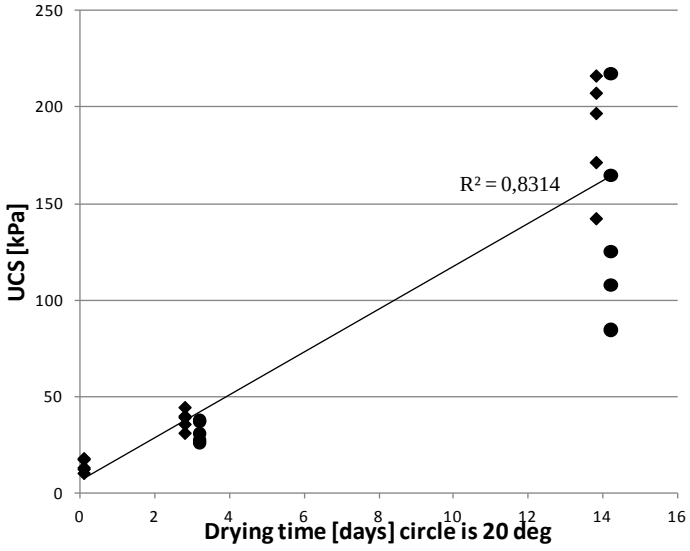
***Effekten av exponeringstiden i luft –*** Eftersom en minimal hållfasthetsökning orsakas av cementeringstiden blir exponeringen för luft och temperatur intressant. Graf 3.3 och 3.4 visar provkroppsserier som har olika cementeringstid (alla serier i varje diagram har samma cementering tid, men cementeringstiden skiljer mellan

graferna) men samma exponeringstid för luft och temperatur. Det finns ett uppenbart samband att tiden där provkropparna utsätts för luft har en positiv effekt på ökningen i hållfasthet, de två grafernas korrelationskoefficienter är $R^2$ = 0.72 och $R^2$ = 0.84 vilket också indikerar också ett starkt positivt samband mellan tid exponeras för luft och hållfasthetsökning. Noterbart är att graf 3.4 kan ha två olika trendlinjer beroende på de två olika torkningstemperaturerna. Det är lätt att se och förstå att det skulle vara bara en ringa skillnad i korrelationskoefficienten om två trendlinjer skulle införas, därför har endast en trendlinje valts.

En likhet mellan kurva 3.3 och 3.4 stärker även beviset för den ovan förklarade trenden att en längre cementeringstid kommer att ha liten effekt på hållfasthetsökningen. Denna förklaring baseras på det fakta att graf 3.3 och 3.4 har 14 dagars skillnad i CIPS mättat tillstånd men ändå uppvisar liknande hållfasthetsökningar.



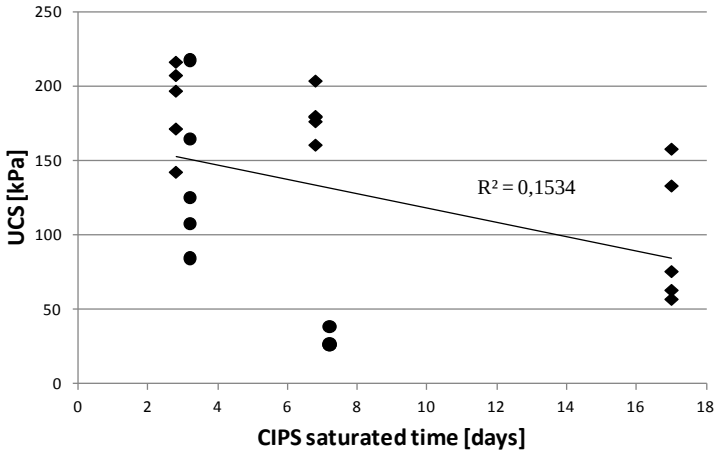

**Graf 3.3:** Förhållandet mellan enaxlig tryckhållfasthet och antal dagar i torkning i 10 °C. Samtliga tester har lämnats i CIPS mättnad tillstånd i **17 dagar** i 10 °C, därefter exponering för luft och temperatur 10 °C.




**Graph 3.4:** Förhållandet mellan enaxlig tryckhållfasthet och antal dagar i torkning i 10 °C (♦) och 20 °C (●). Samtliga tester har lämnats i CIPS mättnad tillstånd i 3 dagar i 10 °C, därefter exponerats för luft och torkning.

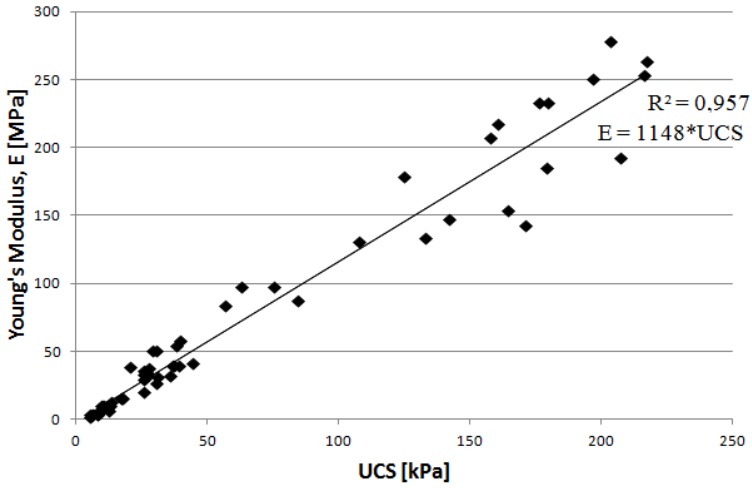
***Effekten av olika härdningstiden men samma torktid*** **–** För att belysa fler bevis för avsaknaden av hållfasthetsökning på grund av längre cementeringstid så redovisas och utvärderas graf 3.5. De olika provserierna i detta diagram har alla utsatts för luft under 14 dagar men i två olika temperaturer, 10 °C och 20 °C, skillnaden mellan serien är cementeringstiden innan exponering. Nästan alla prover visar en nästan tiofaldig ökning i hållfasthet på grund av de 14 dagar de lämnats exponerade för luft. Detta kan jämfört med de provkroppar som har testas i mättade förhållanden (graf 3.2), där ingen indikation på att längre cementeringstid

skulle ha någon effekt på hållfasthetsökningen. En reservation behövs för de fyra plottade resultaten under 50 kPa vid 7 dagar (ser ut som två punkter). Dessa prover visade sig vara något fuktiga under komprimeringstesterna och något kan ha gått fel. Skulle dessa fyra prover bortses från så kommer resultatet bli att korrelationskoefficienten närmar sig noll vilket styrker det redan etablerade resultatet från grafen 3.2 där ingen korrelation mellan tid i CIPS mättade tillstånd och hållfasthetsökning existerar.



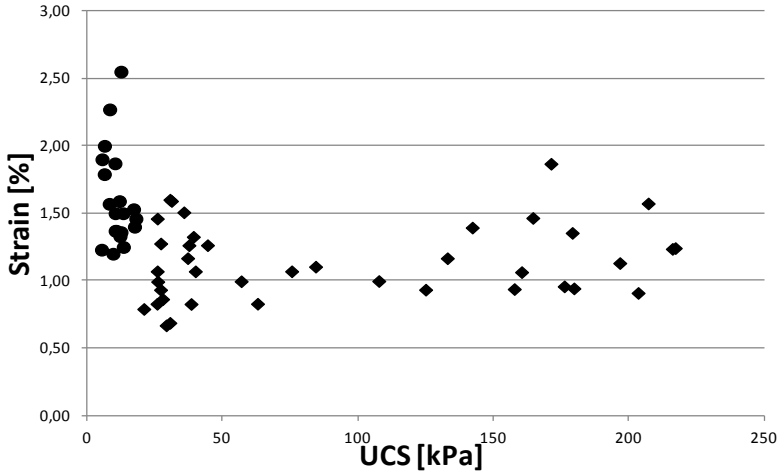

**Graf 3.5:** Förhållandet mellan enaxlig tryckhållfasthet och olika antal dagar kvar i CIPS mättat tillstånd. Samtliga prover har lämnats 14 dagar för att torka, men i olika temperaturer, 10 °C (♦) och 20 °C (●).
** proverna nedanför 50 kPa vid 7 dagar kan ha varit utsatt för en yttre faktor som orsakar dem att misslyckas. Dessa prover upplevdes något våta under provtryckningen.*

***E-modulen –*** Plottas elasticitetsmodul mot den enaxliga tryckhållfasthet (*graf 3.6*) uppstår ett tydligt samband mellan de två som är ungefär E50 = 1150*UCS med en korrelationskoefficient $R^2$ = 0.96, denna korrelationskoefficient förklarar att det positiva sambandet är nästan maximalt.



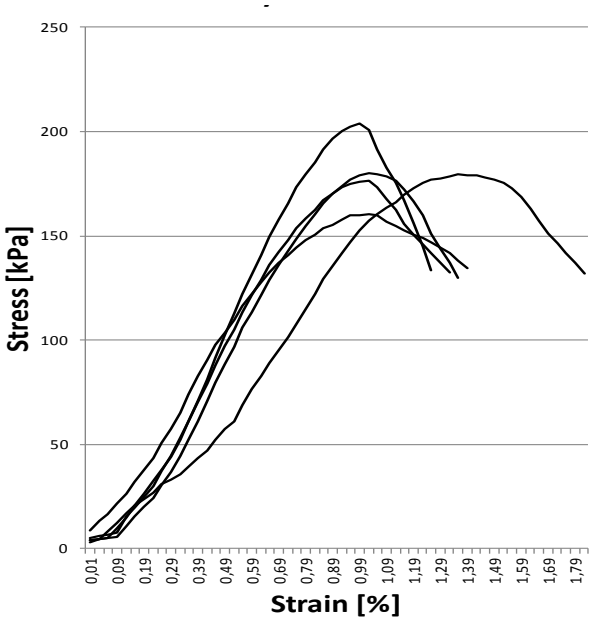

**Graf 3.6:** Samband mellan elactisitetsmodul, E, och enaxlig tryckhållfasthet.

**Deformation –** Deformationen vid maximal tryckhållfasthet för dessa resultat plottas i grafen 3.7. Cirklar (●) är provkroppar som har testats i CIPS mättat tillstånd och diamanter (♦) är de torkade provkropparna. Denna graf visar en töjning som sträcker från 0.7 till 2.6 % för både CIPS mättade provkroppar och torkade provkroppar. De som utsatts för luft varierar uteslutande från 0.7 till 1.9%.




**Graf 3.7:** Förhållandet mellan töjning och enaxlig tryckhållfasthet. Prover testades i CIPS mättat tillstånd indikeras med (●) och proverna som exponerats för luft och temperatur indikeras med (♦).

***Exempel av en test serie –*** Graf 3.8 är ett exempel på resultat från fem provkroppar vilka utsattes för en cementering tid på sju dagar och därefter 14 dagar exponerades för luft med en temperatur av 10 °C. Dessa prover ger en tydlig indikation på att en hållfasthetsökning kan uppnås genom endast en behandling med CIPS. Alla grafer som är de underliggande data för dessa utvärderingar kan studeras i bilaga D.




**Graf 3.8:** Spänningstöjning diagram för en serie av 5 prover som har lämnats 7 dagar i 10 °C i CIPS mättnad tillstånd därefter exponering för luft i 14 dagar i 10 °C.

***Tryckhållfastheten av en multipelt behandlad provkropp –*** Provkroppen (*figur 3.7*), som har konstruerats genom fem CIPS behandlingar med injekteringer från botten, testades i en större UCS testmaskin jämfört med de andra mindre cementerade prover som beskrivs i tabell 3.1 ovan. Den maximala tryckhållfastheten mätt 2.6 MPa. Upplägget av provet kan studeras i figur 3.8 nedan.

**Figur 3.8:** Enaxligt tryckhållfasthetstest av en provkropp som konstrueras genom fem CIPS behandlingar. UCS mattes till 2.6 MPa.

***pH nivån i överskottsvätskan –*** pH-nivån av överskottsvätskan som blir kvar upptill i bägaren som visas i figur 2.9 mättes efter 24 timmar till pH 6.7. Detta test utförs för att få en fingervisning om pH-nivån i de CIPS mättade provkropparna som visar knappt någon hållfasthetsökning alls när de trycks i fuktigt tillstånd (graf 3.2).

## 3.6 Diskussion

Av de laboratorietester som utförts på 60 provkroppar av CIPS behandlad sand som samlats in från ett bygge verkar det uppenbart att hållfasthetsökningen börjar vid tiden då det behandlade materialet utsätts för luft eller när överskottsvätskan har avgått. Antagandet att syre kan spela en viktig roll i bildandet av kalcitkristaller som leder till cementering kan försummas på grund av den höga hållfasthetsökningen som uppnåtts i den provkropp som konstruerades genom fem CIPS behandlingar. Denna provkropp kom aldrig i kontakt med luft eller syre under cementering processen och uppvisar ändå ett mycket högt UCS värde.

Antingen spelar torkningsprocessen en stor roll i hållfasthetsökningen efter kalcitutfällning eller att överskottsvätskan påverkar proverna negativt till dess att den avgått. Paralleller kan eventuellt dras till utvinning av havssalt, när saltet är upplöst i vatten finns inga kristaller men utsatt för torkning (eller minskning av vatten) bidrar till att saltkristallerna bildas. En möjlig förklaring skulle kunna vara att kalcitkristallernas initiala cementeringsförmåga först inträffar när överskottsvätskan avlägsnas vilket så småningom orsakar hållfasthetsökningen.

Som diskuterats i avsnitt 2.2.2 finns det några olika faktorer som påverkar utfällningen av kalcit negativt under Biogrout processen. Till exempel, om pH-värdet i omgivningen för behandling antingen blir för låg eller stiger för högt resulterar i en hämmande inverkan på ureasaktiviteten, där utfällning av kalcit påverkas negativt under behandling med Biogrout. Eftersom CIPS och Biogrout kan ses som närbesläktade metoder, båda med ureas (även om utvunnet från olika källor) som katalysator, skulle det inte vara alltför långsökt att anta att en sänkning eller höjning av pH-nivån till ogynnsamma nivåer skulle påverka ureasaktiviteten hos CIPS negativt. Detta skulle vara en möjlig förklaring till varför provkropparna som testades i CIPS-mättat tillstånd visade nästan ingen cementering alls. Ett prov som är mättad med CIPS lösning kommer fortfarande efter utfällningen att innehålla överskottsvätska innehållande ammoniumklorid ($NH_4Cl$) (*figur 2.4*) med en surheten kring pH 9.25 (Wikipedia, 2012h). Mätningarna av pH 6.7 i överskottsvätskan i detta experiment, som beskrivs i avsnitt 3.5, är nästan neutral i jämfört med ammoniumklorid som innehar pH 9.25. Detta neutrala pH-värde kan ha sin förklaring i att kalcitutfällningen orsakar en motverkande effekter till ökningen av pH-nivå som förklaras i

avsnitt 2.2.2. Att jämföra dessa två pH-värden av 9.25 och 6.7 till kurvan i graf 2.5 skulle stärka antagandet om en hämmande effekt på ureasaktivitet så länge antingen överskottsvätskan eller ammoniumklorid finns i provkropparna. Som diskuteras i avsnitt 2.2.2, är kalcit utfällning en följd av en ökning i pH vilket skulle innebära att så länge överskottsvätskan med pH 6.7 finns i den behandlade jorden kommer utfällningen inte påbörjas. Det skulle också bidra till att förklara varför hållfasthetsökningen sker ju längre och torrare provkropparna blir, eller som i fallet med provkroppen som behandlades upprepade gånger (figur 3.8), som byggde en hel del hållfasthet (2.6 MPa) på grund av att den ständigt sköljas med vatten mellan injekteringerna. Det finns inte heller någon grund till antagandet att ammoniumklorid i sig är en faktor som hämmar ureasaktiviteten eftersom detta salt måste nå mycket höga koncentrationer innan de negativa effekterna utlöses (avsnitt 2.2.2). Oavsett så antas att överskottsvätskan måste avgå från den behandlade jorden för att hållfasthetsökningen skall äga rum.

En annan möjlig aspekt som behöver övervägas är ökningen av viskositeten i CIPS-vätskan efter blandning av vätska A och B i kombination med att skapa prover genom att blanda CIPS och sand (utan att använda injekteringer). Eftersom CIPS-vätskans viskositet snabbt stiger till mycket höga nivåer kan det leda till att jordpartiklar skjuter varandra isär under blandningsprocessen, en blandningsprocess som saknar ett begränsande allsidigt tryck. I denna laboratoriestudie tar det ca 15 minuter att skapa ett prov vilket skapas genom att fylla på CIPS och jord i upprepade satser under vibrationer till provcylindern är fylld. Ökningen i viskositet under denna process, särskilt med vibrationer kan eventuellt leda till att jordpartiklar mer och mer skjuts isär. Detta kan också vara en möjlig förklaring till den erfarna hållfasthetsökningen vilken är ett resultat av torkning av proverna. Kanske handlar det inte om torkningen, utan om överskottsvätskans avgången, vilket resulterar i jordpartiklar närma sig varandra, vilket i sin tur gör att avståndet mellan dem blir små nog för kalcitkristallerna att nå över till varandra och skapar en cementering.

Studeras graferna och resultaten ovan uppstår ett tydligt ett starkt samband mellan ökningen av hållfasthet och tiden proverna har lämnats utsatts för luft (torkning). Liten variation i hållfasthetsökning uppstår på grund av skillnaden i temperatur vid torkningsprocessen, och baserat på dessa resultat torde slutsatsen vara att temperaturen för torkning har liten effekt. Men temperaturen vid tidpunkten för blandningen och injektering spelar en stor roll för kalcit utfällningen och där av väljs olika recept baserat på prognostiserad eller faktisk temperatur för behandlingstillfället. Eftersom ingen ureasaktivitet registreras under 5 °C måste åtgärder vidtas för att kunna använda den här metoden under kalla förhållanden.

Vidare kan konstateras att hållfasthetsökningen inte tros ha något samband med cementeringstid i CIPS mättat tillstånd och på grund av resultaten i graf 3.2 vilket tydligt anger nästan ingen hållfasthetsökning med tiden.

# Kapitel 4

# Fältförsök

## 4.1 Positionen för fältförsöket

Platsen där fältförsöket har genomförts ligger vid gatan Vallagränd i Handen som är en del av Haninge kommun vilken är en förort i södra utkanten av Stockholms län (*figur 4.1*).

**Figur 4.1:** Platsen där fältförsöket har ägt rum (Eniro, 2012).

Placeringen av fältförsöksplatsen kan lokaliseras genom att ange koordinaterna i tabell 4.1. Det svenska koordinatsystem SWEREF 99 TM har använts vilket är baserad på Meridianen, 15 grader öster om Greenwich med en skalreduktionsfaktor på 0.9996. N-koordinaten börja från ekvatorn och E-koordinaten börjar från den tidigare nämnda Meridian, men med en tillägg av 500 000m. SWEREF 99 systemet bygger på det metriska systemet och konventionellt med X-koordinaten positiv i nordlig riktning och Y-koordinater positiv i östlig riktning (Lantmäteriet, 2010).

| SWEREF TM | | |
|---|---|---|
| X [m] | Y [m] | Z [m] |
| 6560400 | 157838 | 46.86 |

**Tabell 4.1:** Koordinater för fältförsöksplatsen mätt i det Svenska koordinatsystemet SWEREF 99 1800

## 4.2 Lokal positionering av fältförsöksplatsen

Den lokala platsen för fältförsöket har valts med omsorg för att säkerställa att marken innehåller sand, tillräckligt djup och med en lämplig densitet för fältförsöket. Provplatsen inrättades inom en befintlig byggarbetsplats som Peab Sverige AB kontrollerade. Ett antal CPT sonderingar var utförda över hela byggplatsen och efter att ha utvärderat sonderingar förlades provplatsen nära CPT sondering 12GT05, *se bilaga C*, som tydligt redovisar tillräckligt bra förutsättningar med medelhård till hårt lagrad sand ner till djup tillräckliga för dessa In-situ utvärderingar.

Det översta lagret av gräs och jord (jordmånen) avlägsnades med hjälp av en grävmaskin utan att generera något ytterligare konsoliderande tryck på den underliggande jorden. Detta område mätte fyra gånger fem meter och rymde tre olika tester där sanden skulle komma att behandlas på olika sätt och sedan utvärderas genom att utföra okulär bedömning och en eventuell CPT sondering. Om den okulära bedömningen visar en ökning i hållfasthet kommer en CPT sondering utföras för att verifiera denna ökning. En CPT sondering kommer även genomföras i den obehandlade sanden för att erhålla referensvärden som jämförelse.

**Figur 4.2:** Den lokala positioneringen för fältförsöksplatsen. *Vänster*, inget ytterligare konsoliderande tryck orsakades under schaktningen. *Mitten*, storleken på utgrävningen. *Höger*, **a** markerar en där kolumnen har skapats, **b** positionen för en sfär som har behandlats två gånger, **c** är platsen där sanden har grävts upp, blandat med CIPS och återfyllts, **d** där CPT sonderingen kommer att utföras i obehandlad sand.

### 4.2.1 De olika testerna

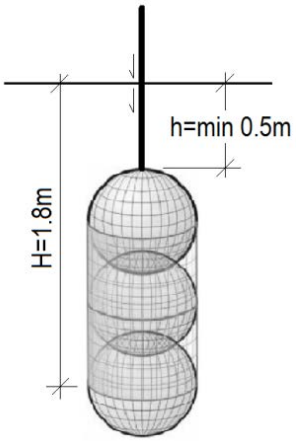
Detta avsnitt kommer att beskriva geometrin av testerna/injekteringerna som har utförts vid provplatsen som beskrivits ovan.

***Temperatur –*** Marktemperaturen 1.8 meter under ytan mättes genom att sänka ner en temperatursensor i röret som installerats vid position **a** (*figur 4.3*). Efter en viss tid hade temperaturen nått ett stadigt tillstånd av 10.6°C.

**Figur 4.3:** Temperaturmätningar vid djupet 1.8 meter under ytan.

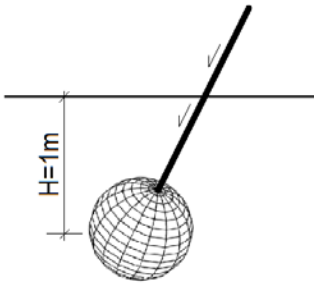
***Kolumn –*** Position a (figur 4.2 till höger), är platsen där försöket med att göra en kolumn ägde rum. Kolumnen byggdes som figur 4.4 nedan visar med den enda skillnaden att den verkliga kolumnen innehöll fyra sfärer

istället för tre som figuren visar. Avsikten var att utforma sfärerna med syfte att nå en radie av 0.25 meter. Detta skulle resultera i en total jordvolym på 65 liter per sfär med en antagen porositet på ca 30 % vilket resulterar i behovet av 20 liter CIPS-vätska för att skapa varje sfär. Dessa sfärer behandlades endast en gång med CIPS.




**Figur 4.4**: geometri för den avsedda sfären.

***Sfär, två behandlingar –*** Vid position B (figur 5,2) skapades en enda sfär. Den konstruerades med samma dimensioner som sfärerna i den beskrivna kolonnen ovan men med den enda skillnaden att denna utsattes för två CIPS behandlingar på exakt samma insprutningspunkt. Målet var att skapa en sfär (*figur 4.5*) med högre hållfasthet än den eventuella hållfasthetsökningen hos kolumnen.




**Figur 4.5**: Geometri för den enda sfär som behandlades med två injekteringer av CIPS.

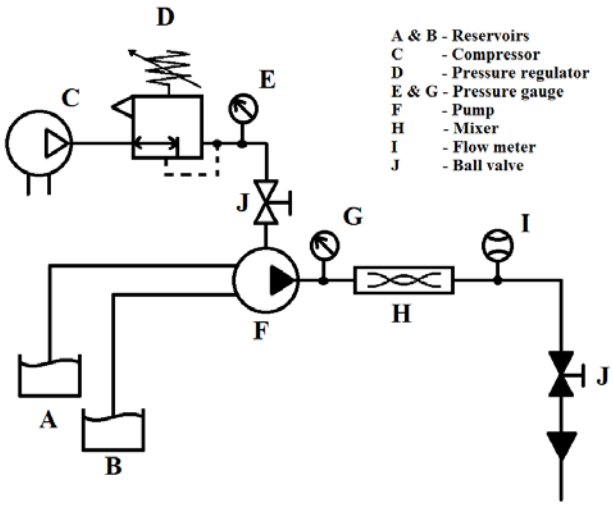
***Gräv, blanda och återfyll –*** Detta test genomfördes vid position **c**, (*figur 4.2*), i syfte att se till att CIPS-vätskan blev jämt fördelade i jorden. Först grävdes en 0.4 meter djup grop, i denna grop grävdes en andra mindre grop som mätt 0.3*0.3 meter och endast 0.2 meter djup, (*figur 4.6, uppe till vänster*). Sanden från denna mindre grop placerades i en behållare och blandas med CIPS-vätska tills fullständig mättnad uppnåddes, varefter blandningen återfyllas i den lilla gropen, (*figur 4.6, överst i mitten*). För att enkelt kunna lokalisera den behandlade sanden placerades en fiberduk ovanpå den behandlade sanden där träpinnar angav hörnen av den kvadratiska gropen, (*figur 4.6, uppe till höger*). Slutligen återfylldes den större gropen med packad sand för att rekonstruera det tidigare naturliga konsolideringstrycket.

Ytterligare tre gropar grävdes med hjälp av en jordborr med en diameter av 28 cm till ett djup av 1 meter, (*figur 4.6, nere till vänster*). Dessa tre gropar återfyllas på samma sätt som den lilla fyrkantiga gropen. De lämnades därefter för cementering med en formplyfa ovanpå för att skydda mot regn.

**Figur 4.6**: Geometri av gräv, blanda och återfyll testerna.

## 4.3 Utrustning

För att fullborda injekteringen av CIPS-vätskan i jorden behövdes viss utrustning konstrueras för att kunna leverera det exakta trycket för olika djup samt ett flöde tillräckligt låg för att inte orsaka hydraulisk spräckning. Ett pumpsystem utformades (*figur 4.7*) samt injekterings spjut (*figur 4.9*) genom vilken CIPS-vätskan injicerades.




**Figur 4.7:** Schematisk illustration över pumpsystemet

***Vätskebehållare, A & B –*** CIPS-vätskans två komponenter är lagrade i separata 0.5 $m^3$ tankar**.**

***Kompressor, C –*** Luftkompressor vilken leverera ett tryck tillräckligt för att driva pumpen.

***Tryckregulator, D –*** Tryckregulatorn mellan kompressorn och pumpen kontrollerar lufttrycket som driver pumpen. Trycket för den utgående CIPS-vätskan måste även hållas under konsolideringstrycket för platsen.

***Tryckmätare, E & G –*** tryckmätaren indikerar det existerande luft- och vätsketrycket.

***Pump, F –*** Pumpen som är vald för detta experiment är en membranpump i aluminium med två separata kammare men ett utlopp. Detta gjorde det möjligt att endast använda en pump, vilken enkelt kontrollerade volymerna av de två ingående vätskorna till att bli identiska. Denna pump behövde ett initialt tryck av 2 bar för att starta.

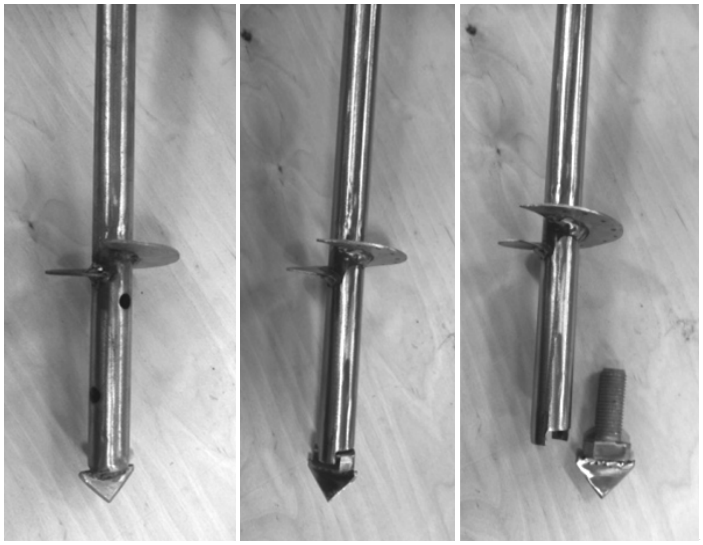
***Mixer, H –*** Denna blandningsanordning gjorde det möjligt att blanda de två vätskorna tillräckligt (*figur 4.8*).

**Figur 4.8:** Blandningsutrustning. En tryckslang med en plastkedja monterad inuti. En kulventil och flödesmätare är även synliga i bilden.

***Flödesmätare, I –*** Denna komponent installeras för att styra den levererade volymen och flödeshastigheten för injekteringen. Låga flödeshastigheter är stor betydelse för att sakta fylla hålrummen i sanden.

***Kulventil, J –*** Kulventilen innan pumpen används som en på/av knapp för att starta pumpen när alla korrekta inställningar är inställda. Ventilen efter blandningsanordningen har en flödesreglerande funktion, stängs den delvis kommer det bidra till att flödeshastigheten regleras till rätt nivå.

***Injekteringsspjut,*** (*figur 4.9*) **–** Injekteringsrören installeras i marken genom borrning. Två olika spjut har använts för dessa experiment, en med en fast ände och fyra horisontella utlopp nedanför skruven. Det andra spjutet har en lös ände konstruerat av en bult som frigörs vid punkten för injektering för att öppna det vertikala utloppet.



**Figur 4.9**: Injekteringsspjut, *vänster:* en skruv med fyra horisontella injekteringsutlopp. *Mitten och höger*, skruv med pilformad bult som öppnar för ett vertikalt utlopp.

## 4.4 Metod

Som förklaras i avsnitt 2.3.3 ovan är processen för att leverera CIPS-vätskan en så kallad *pumpa och blanda*-process som verkade vara den mest effektiva till följd av tidens betydelse (tiden mellan blandningen av vätskorna och injekteringsutloppet) att vara så kort som möjligt. Pumpsystemet kalibreras först för att säkerställa att rätt tryck och flöde ställts in, innan det anslöts till spjutet. Den beräknade vätskevolymen för att skapa den önskade sfären injicerades vid den första nivån, varefter spjutet drogs upp till nästa nivå för att skapa följande sfär, och så vidare.

Dessutom, såsom beskrivits ovan, utfördes några gräv och återfylls tester där sand avlägsnades för att blandas med CIPS för att sedan återfylla samma grop. Dessa gropar täcktes därefter med formplyfa för att skydda den nyligen behandlade sanden från vind, regn och eventuella djur.

Nedan följer en tidslinje över hur fältet prov har utförts.

***Injektering och behandling av jorden (27:e & 28:e juli) –*** Den första injekteringen utfördes med hjälp av ett injekteringsrör vid dessa datum. Sandvolymen som utsattes för två behandlingar fick sin andra behandling utförd den 28 juli. Det första lilla ”gräva och återfylla” testet skedde också den 27 juli.

***Okulär besiktning av “gräv och återfylla” testet (7:e augusti)*** – Den första okulära bedömningen av det lilla ”gräv och återfylla” testet utfördes detta datum. Eftersom ingen hållfasthetsökning var synlig beslöts det att lämna de injicerade sfärerna att härda en längre tid. Beslutet togs att genomföra ett större ”gräva och återfylla” test denna dag.

***Behandling av det större “gräv och återfylla” testet (8:e augusti) –*** Det större ”gräv och återfyll” testet utfördes.

***Okulär bedömning (23:e augusti) –*** Okulär undersökning av båda ”gräva och återfyll” testerna utfördes. Testerna avslöjar fortfarande inte någon hållfasthetsökning.

***Installation av genomsköljningsmekaanism (30:e augusti) –*** Effekten av genomsköljning av den behandlade jordvolymerna med vatten för att spola bort överskottsvätskan och förhoppningsvis uppnå en hållfasthetsökning behövde undersökas. Därför har en stor presenning formad som en kon installerats för att samla regnvatten, detta vatten leddes därefter ner i centrum av de behandlade ”gräv och återfyll” kolumnerna. Denna kon visas i figur 4.10 och uppsamlade regnvatten under hela september.

***Okulär besiktning och framgrävning (3:e oktober) –*** Under denna sista okulär granskning avlägsnades presenningen och kolonnen undersöktes. Dessutom grävdes de volymer som behandlades med injekteringer fram och bedömdes.

**Figur 4.10:** Presenning formad som en kona för att samla upp regnvatten under September månad

## 4.5 Resultat

Samma recept för CIPS har använts för fältförsöket som för laboratorieexperimenten. De två komponenterna i CIPS har blandats kvällen innan och lämnats över natten för att sätta sig innan de används för injekteringen följande dag. Före injekteringen utfördes togs prover från vätska A och vätska B i syfte att verifiera receptet genom ett utfällning prov (*figur 2.9*), där vätskorna blandas samman och utfällningen klockas för att kontrollera att den sker inom den förväntade tiden. En liter av vardera vätska insamlades även för att användas till att bygga provkroppar för laboratorietester som senare kom att användes i kapitel 4 - Laboration utvärdering. Dessa provkroppar visade liknande resultat som de andra laboratorietprovkropparna. Detta verifierar en god kvalitet av det valda receptet och den blandade CIPS-vätskan som är avsedd för fältförsöket.

***Gräv, blanda och återfyll test –*** Efter en visuell bedömning med ögon, händer och fingrar för att känna effekten av CIPS blir det tydligt att ingen hållfasthetsökning har skett. Denna undersökning gjordes genom noggrant och varsamt trycka ett finger ner i den behandlade sanden och jämföra effekten med att göra samma sak i naturligt konsoliderad sand. Inspektionen genomfördes två och fyra veckor efter CIPS behandlingen utförts med samma slutsats; den behandlade sandens beteende visar endast attributen för naturligt våt packad sand där ingen hållfasthetsökning kunde registreras. En klump av sand uppsamlades fyra veckor efter behandling och tilläts torka inomhus, så snart torkningen startade var det lätt att följa den långsamma ökningen i hållfasthet. Efter några dagars torkande hade sanden byggt tillräckligt med hållfasthet för att kunna ta emot relativt hårda knackningar med fingrarna och förbli intakt. Detta kunde inte göras med endast vatten packad sand som hade lämnats att torka.

På grund av den ovan nämnda visuella slutsatsen beslutades det att inte gå vidare med en dyr CPT sondering. En sådan undersökning skulle bara bekräfta antagandet att ingen hållfasthetsökning har skett och skulle därför vara något onödigt.

Den behandlade volymen, som hade sköljts med regnvatten uppvisade samma egenskaper som förklarats ovan. Denna bedömning gjordes åtta veckor efter behandlingen. Den enda synliga effekten var förändringen i färgen av sanden (figur 4,11).

**Figur 4.11:** Det behandlade sandvolym som har genomgått sköljning med regnvatten.

**Figur 4.12:** Konsistensen av sanden har förändrats i detta skede, 0.5 meter under ytan och en tydlig cirkel har skapas av saltet.

***Injekterade testvolymer*** - De behandlade volymerna som bildats genom injekteringar uppvisade en ökning i styrka på grund av att en cementering uppstått. Där försöket att skapa en pelare skedde var det uppenbart att en hållfasthetsökning hade skett, detta genom att undersöka hålet efter injekteringsröret. Höljet av hålet (figur 4.15) visade en vitaktig färg och genom att knacka med ett finger avslöjades en viss hållfasthetsökning.

Under schaktningen djupare och djupare mot mitten av den dubbelt behandlade sfären så blev hållfastheten av sanden något hårdare. Ett annat tecken på att ett sfäriskt objekt hade bildats var den vita cirkeln som visas i figur 4.12 och 4.13. Prover nära centrum av denna volym samlades in för undersökning och uppvisning. "Bollen" i det övre vänstra hörnet av figur 4.13 har lyfts ur gropen. Storleken av denna "boll" är något större än en fotboll och har en uppskattad vikt på ca 10 kg. Fler insamlade prover kan studeras i figur 4.16.

Den okulära undersökningen av injekteringen som syftade till att skapa en pelare kan studeras i Appendix E.

**Figur 4.13:** Fastheten hos sanden ökar ytterligare då utgrävningen närmar sig injekteringens centrum. Den tydliga cirkeln skapad av saltet är även här synlig.

**Figur 4.14:** En pelare bildad av materialet från kärnan I den dubbel-injekterade sfären.

## 4.6 Diskussion

Resultaten av fält-testen blev något olika beroende på typen av in-situ-test som utfördes. De injekterade testerna visade sig vara mer framgångsrika i ökningen av hållfasthet än ”gräva och återfyll” testerna.

Behandlingen av den avsedda pelaren skapades med röret (till höger i figur 4.9) med en lös bult i slutet. Detta verkar vara ett mindre effektivt injekteringsrör jämfört med spjutet med horisontella injekteringshål, speciellt för att skapa flera injekterade sfärer över varandra för att bilda en pelare. På grund av injekteringsutloppet är vertikalt kommer de högre injekteringspunkterna att förlora det mesta av deras avsedda vätska rakt ner till de lägre belägna sfärerna. Detta kommer att inträffa på grund av den kanalen som uppstått i sanden efter att röret har dragits upp till nästkommande nivåer.

Som nämnts i avsnittet 4.5 ovan; den behandlade sanden, som hade blandats och återfyllts i gropar och skyddats från yttre påverkan som vind och regn, visade samma egenskaper som våt sand. Detta var en ganska nedslående upptäckt vid den tidpunkten, men samtidigt som denna slutsats gjordes så avslöjades ett annat intressant resultat. Vid den punkt där injekteringsspjut drivits ned och en förmodad hydraulisk spräckning inträffat vilket ledde CIPS-vätskan tillbaka upp till ytan för att täcka marken. Detta område var bara lämnat täckt med CIPS-vätska och inga ytterligare tankar eller avsikter formulerades vid tidpunkten för injekteringen. Senare, under uppföljningen fyra veckor senare upptäcktes en 5 mm tjock skorpa på denna plats. Denna skorpa cementerades genom att CIPS-vätska hade trängt ner i det översta lagret av sanden, men mer intressant är att denna yta är det enda behandlade sanden som har utsatts för regn, därför sköljas vilket lett till att pH-nivån har anpassas till jämvikten i marken. Detta orsakat en högre ureasaktivitet som sedan måste ha lett till utfällningen av kalcitkristaller och en hållfasthetsökning.

En annan möjlig förklaring till den uteblivna hållfasthetsökningen i ”gräva och återfyll” testerna kan ha sin orsak i den högre viskositeten av CIPS-vätskan. Så snart de två komponenterna av CIPS-vätskan blandas ökar viskositeten. När denna vätska blandas med sand kan svårigheter uppstå för sandpartiklar att positionera sig tillräckligt nära varandra för att bygga hållfasthet genom cementering. Den högre viskositet skulle kunna ha effekten av att hålla sandpartiklarna isär vilket gör avståndet för stort för kalcitkristaller att binda två jordpartiklar.

Även om resultaten, särskilt från "gräva och återfyll" testerna har varit något avvikande från förväntningarna, var slutresultatet fortfarande positivt där en ökning i styrka tydligt uppnåddes i den injekterade jordvolymerna. Ökningen i hållfasthet i de injicerade sfärerna upplevdes vara minst lika hög som den uppnådda ökningen i hållfasthet vilket påvisades i laboratorietesterna. Denna hållfasthetsökning skulle kunna vara en indikation på den positiva potentialen i marken för att hantera den förbrukade vätskan på ett sådant sätt att kalcit utfällningen tillåts skapa den eftertraktade bindningen mellan jordpartiklar.

Även om fälttesterna utförda genom injektering spjut och pumpsystemet visade sig vara något komplicerade att kalibrera för att uppnå rätt tryck och flöde, så uppnåddes en klar hållfasthetstillväxt. Mer tid och ansträngningen behövs för att utforma ett mer anpassat pumpsystem som kan leverera rätt mängd CIPS-vätska till jorden i den långsamma och konstanta hastighet som är viktig för att erhålla de eftersökta resultaten. Om ett system med bättre noggrannhet och kontroll kan erhållas, kommer en högre hållfasthet kunna uppnås. På grund av det förmodade jordbrottet där vätskan rann ut vid oönskade ställen kunde dessa prov ge en nyttig erfarenhet och känsla för den tid och ansträngning som krävs för att utforma ett mera lämpat pumpsystem. Klara resultat av att metoden fungerar in-situ här i Sverige där den skapar en hållfasthetsökning har också erhållits.

Trots att den främsta svårigheten var att utforma ett system som kunde leverera CIPS-vätskan på effektivt sätt så uppvisades en tydlig hållfasthetsökning till följd av cementering vid kontaktytorna av jordpartiklarna in-situ. När detta pumpsystem har optimerats och de osäkra aspekterna (diskuteras i avsnitt 3.6) utretts vidare kommer denna metod äntligen kunde visa upp sin fulla potential. En potential som inte bara har praktiska och konstruktionsmässiga fördelar som tillgänglighet i trånga utrymmen, släntstabillitet eller kostnadsminskningar, det kan också ha en stor fördel i att eventuellt minska energiförbrukningen då i vissa fall vara ett fullgott alternativ till dagens cementbaserade injekteringsmetoder. Det kan också vara ett billigare alternativ till sprutbetong vilket används på slänter och sluttningar, slänter som kanske inte alltid mobiliserar betongens fulla kapacitet. Istället skulle CIPS kunna bli en mer lämpad metod för att leverera en mera anpassad hållfasthet vilket gör konstruktionen mera optimerad. Fler potentiella användningsområden kan studeras under avsnitt 5.2.

Mänskligheten kan inte värja sig mot det faktum att vi använder för mycket energi, att vi göra världen mindre hållbara än vad den kunde vara med smartare lösningar och klokare metoder. Mänskligheten behöver bara erkänna det faktum att vi måste minska vår miljöpåverkan genom att göra allt i vår makt för att göra världen till en bättre och mer hållbar plats för framtiden. Det är därför CIPS kan vara ett litet steg framåt för att minska energiförbrukningen i vissa sektorer. Även om det inte kommer att bli någon stor energi revolution, men det kommer visa vägen framåt genom att införa och introducera naturens egna processer för att skapa material i den byggda miljön för mänskligheten.

**Figur 4.15:** Injekteringshålet till sandvolym där pelaren försökte att skapas. Den vita ytan är en hård skorpa som har bildats genom att CIPS-vätskan sipprat upp längs injekteringsröret.

**Figur 4.16:** In situ prover från den sfär som har behandlats två gånger med CIPS-vätska.

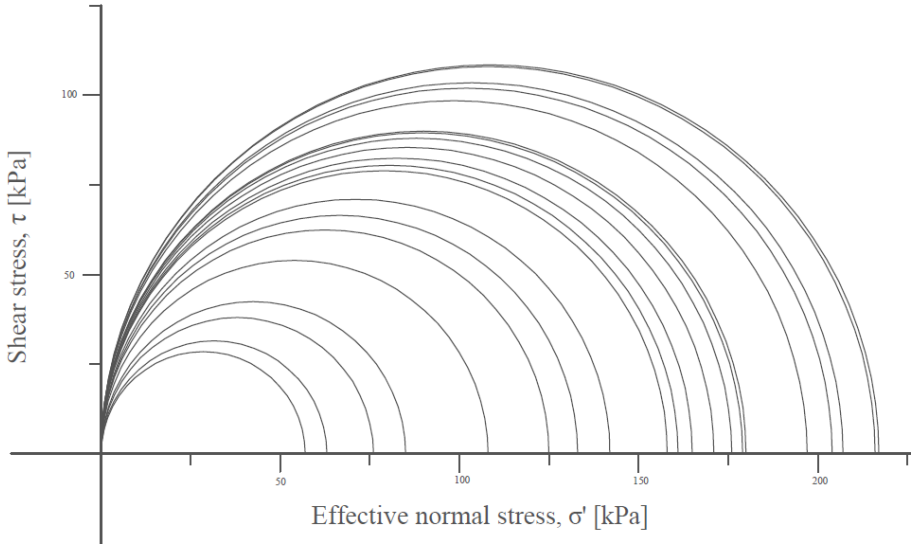
# Kapitel 5

# Allmän Diskussion

Denna nya metod/teknik med CIPS är mycket intressant med stora potentialer om svårigheterna kan övervinnas och osäkerheter förtydligas. Det är ingen tvekan om att resultatet från laboratorietesterna är gångbara och ger en hållfasthetsökning. En hållfasthetsökning tillräckligt stor för täcka behovet från antingen tillfälliga konstruktioner där en lägre hållfasthet är efterfrågad eller mer permanenta grundkonstruktioner där en högre hållfasthetsökning krävs. Svårigheterna ligger i anpassning av laboratorieförfarandet, som att utforma en lämplig och användbar fältmetod för tillämpningar i stora byggprojekt i Sverige där olika markförhållanden råder jämfört med Australien. Australien som har en årsmedeltemperatur av 18 °C på ett djup av 5 meter.

## 5.1 Potentiell ökning i kohesion och dess effekt på släntstabillitet

Eftersom dessa test är enaxliga tryckhållfasthetstester kan Mohr's cirklar ritas med $\sigma_3 = 0$ i alla tester, graf 5.1 illustrerar resultaten från graf 3.5 i form av Mohr-Coulomb's diagram. Eftersom de fyra lägre resultaten i graf 3.5 är lite tveksamma, har dessa resultat försummats i nedanstående graf.




**Graph 5.1:** Resultat från graf 4.5 presenterade i ett Mohr-Coulomb diagram.

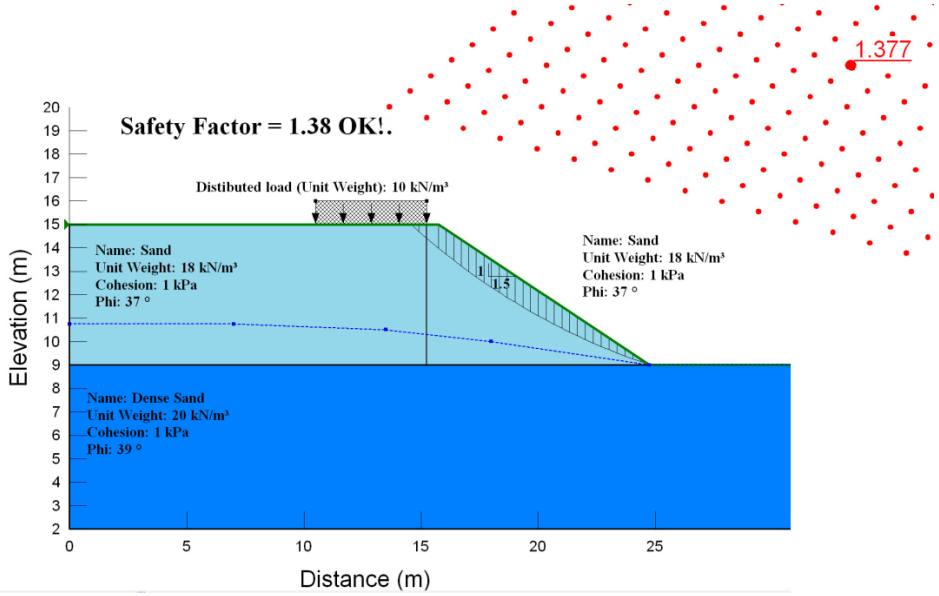
Beräknas medelvärdet av alla Mohr-Coulomb cirklar resulterar det i en normal effektivspänning på 150 kPa (*graf 5.2*). Eftersom friktionsvinkeln för sanden antas variera från 36° som lägst till 40° som högst, på grund av den cementerade effekten av CIPS har dessa värden illustrerats i grafen som ett grått område (*graf 5.2* ). Detta har gjorts för att indikera variationen av kohesion som uppstår på grund av den möjliga förskjutningen i friktionsvinkel.

Friktionsvinkeln för dessa demonstrationer har satts till 37° på grund av erfarenhet och faktiska mätningar i och omkring byggplatsen av intresse. Som även diskuteras i avsnitt 3.2 så förändras friktionsvinkeln inte mycket med de cementerande effekterna. Därför kan man anta att friktionsvinkeln förblir ungefär densamma (37 grader) efter en eventuell cementerande effekt. Passas 37graders-linjen in mot Mohr's cirkel kommer resultatet bli en medelkohesion av 38 kPa.

Om ökningen av medelkohesionen som uppnås i laboratorietesterna även kan erhållas under fältapplikationer så kan stora fördelar förtjänas, såsom kostnadsminskningar, förkortade byggtider och tillgängligheten vid trånga utrymmen. Dessa fördelar kan uppnås i jämförelse med de markförstärkningmetoder som vanligtvis används idag, såsom jet-grouting eller spontväggar.

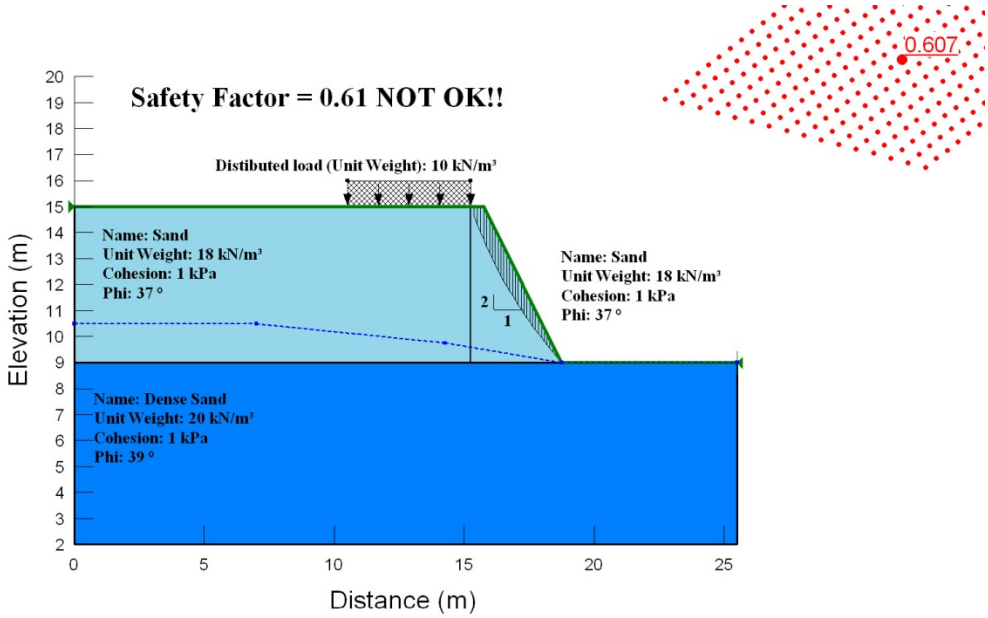
Figurerna nedan är ett illustrativt exempel på en möjlig ökning av säkerhetsfaktor för släntstabillitet för tillfälliga byggskeden, detta till följd av förändring och förbättring av kohesionen i marken. Exemplen nedan är utformade utifrån förenklade metoder för att visa hur kohesionsökningen kommer att resultera i förmågan att konstruera slänter med brantare lutning. Beräkningarna av säkerhetsfaktor utförs i enlighet med den äldre totalsäkerhetsfilosofin för tillfälliga konstruktioner under kort tid och inte i enlighet med de nyare Eurokoderna. På grund av detta har säkerhetsfaktorn för dessa exempel satts till 1.3.

På grund av säkerhetsbestämmelser för säkra arbetsförhållanden, så måste oftast sluttningar som innehåller friktionsmaterial konstrueras med en lutning av 1:1.5 (Sveriges byggindustrier 2012). Figur 5.1 nedan visar en säkert konstruerad, sex meter hög schakt med säkerhetsfaktor 1.38. En utbredd last på 10 kN/m$^3$ (eller 10 kPa) har placerats 0.5 meter från släntkrönet och symboliserar entreprenadmaskiner såsom grävmaskiner eller tunga lastbilar. Det är uppenbart att detta schakt kommer att vara säker och uppfylla de ovan nämnda kriterierna med säkerhetsfaktor av minst 1.3. Nackdelen med en sådan lutning (*figur 5.3*) är det utrymme som krävs och kostnaden för avlägsnande av stora mängder massor. Lösningen nedan kräver 9 meter i x-led, bara för själva slänten, lägg därtill utrymme som behövs för maskiner vid krönet.



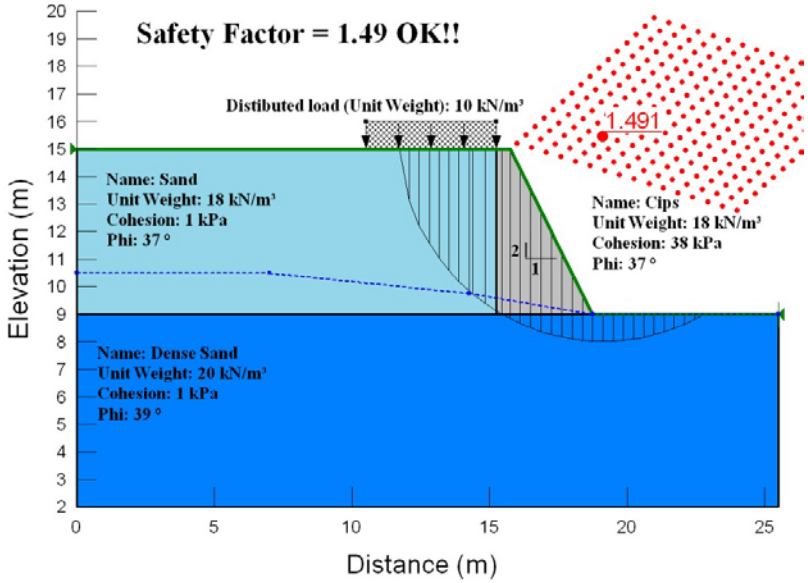

**Figur 5.1:** En säkert konstruerad schakt i ocementerad natursand med säkerhetsfaktor 1.38, lutning 1:1.5 och en utbredd last på 10 kPa som verkar 0.5 från släntkrönet.

Schaktplatser som saknar utrymmen för stora utrustningar och maskiner kommer att kräva en dyr spont för att uppnå stabilitet samtidigt som det avsedda schaktdjupet nås. Om det skulle finnas tillräckligt med utrymme för att använda en släntlösning med lutning 2:1 och ändå nå ner till det avsedda schaktdjupet, skulle det resultera i behovet av vissa stabiliserande lösningar för schakten så att den möter säkerhets- och stabillitetskriterierna. Figur 5.2 visar en schakt konstruerad ocementerad natursand med lutning 2:1 som går till brott och kommer att skreda på grund av en säkerhetsfaktor av låga 0.61.



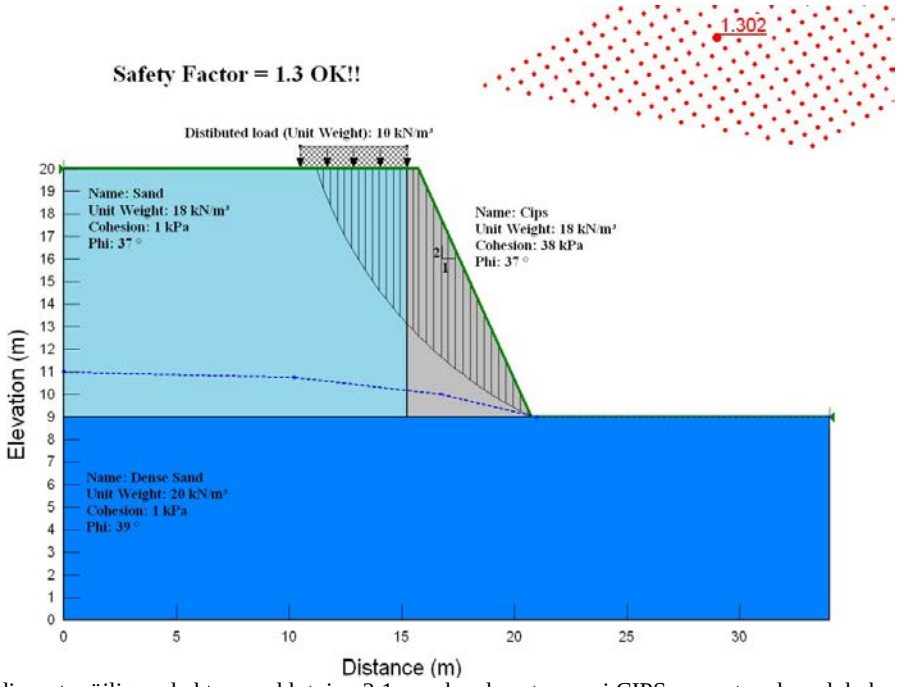

**Figur 5.2:** Skred! Denna lutning klarar inte säkerhets- och stabillitetskriterierna i ocementerad natursand. Den har en säkerhetsfaktor på 0.61, lutning 2:1 och en utbredd last på 10 kPa som verkar 0.5 från släntkrönet.

Figur 5.3 visar effekten av att utföra en enda CIPS behandling före den avsedda schaktningen av samma slänt som ovan. Denna behandling skulle resultera i en antagen kohesionsökning till 38 kPa (*visas i diagram 5.2*), vilket skulle orsaka en cementering av sanden och att fungera mer som en stödmur. Detta skulle motverka det aktiva jordtrycket samt bryta de aktiva glidytorna och bidra till en betydligt säkrare schakt med en säkerhetsfaktor på 1.49. Som illustreras i figuren 5.3 så kommer grundvattnet fortfarande att kunna tränga igenom den behandlade jorden, vilket resulterar i att inget ytterligare porvattentryck verkar på "stödmuren".




**Figur 5.3:** En säkert konstruerade schakt i CIPS cementerad sand med en säkerhetsfaktor på 1.49, lutning 2:1, kohesion 38 kPa och en utbredd last på 10 kPa som verkar 0.5 från släntkrönet.

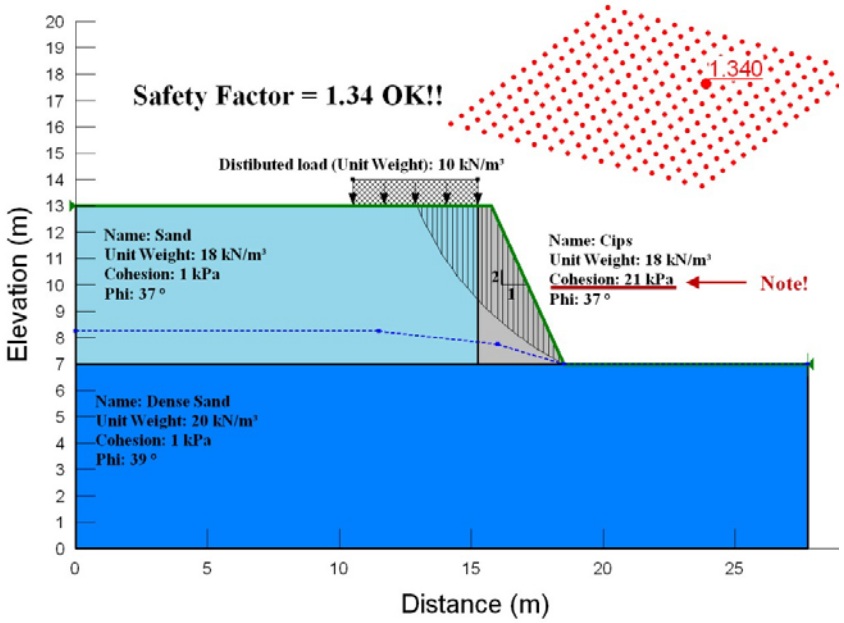
Om den ovan diskuterade figuren 5.3 skulle utökas så djupt som möjligt utan att säkerhetsfaktorn skulle sjunka under den tillåtna nivån så skulle det se ut som i figur 5.4 nedan, där schaktdjupet har utökats från 6 meter till 11 meter, kohesionen är fortfarande den samma, 38 kPa, men säkerhetsfaktor är nu strax över den tillåtna 1.3 för en tillfällig schakt.




**Figur 5.4:** Den djupast möjliga schakten med lutning 2:1 som kan konstrueras i CIPS cementerad sand, kohesion på 38 kPa och säkerhetsfaktor på 1.3 och en utbredd last på 10 kPa som verkar 0.5 m från släntkrönet.

Eftersom spridningen av effektivspänningen i Mohr-Coulomb diagrammet (*graf 5.1*) varierar från 57 till 217 kPa och det kan hävdas att medelvärdet av normaleffektivspänningen på 150 kPa kan vara något hög så har ett nytt medelvärde beräknats baserat på de 25 % lägsta resultaten i graf 5.1. Detta betyder att det "nya" lägre medelvärdet för normaleffektivspänningen är 86 kPa. Än en gång, passas 37°-linjen in för friktionsvinkel vilket i detta fall skulle leda till en ny medelkohesion av 21 kPa.

Medelkohesionen på 21 kPa som precis beräknas ovan skulle resultera i en mindre stabil schakt där schaktdjupet skulle minska. Om släntlutning fortfarande skulle hållas till 2:1 på grund av arbetsutrymme så skulle det nya uppnådda schaktdjupet bli 6 meter, vilket i sin tur skulle betyda att konstruktionerna i figur 5.3 och 5.5 skulle vara desamma bortsett från den lägre kohesionen i figur 5.5 vilket resulterar i en lägre säkerhetsfaktor. Slutsatsen är därför att en kohesion av 21 kPa krävs för en sådan schakt skall erhålla en säkerhetsfaktor av minst 1.3, vilket är tillräckligt hög säkerhetsfaktor för en tillfällig konstruktion i byggskedet.



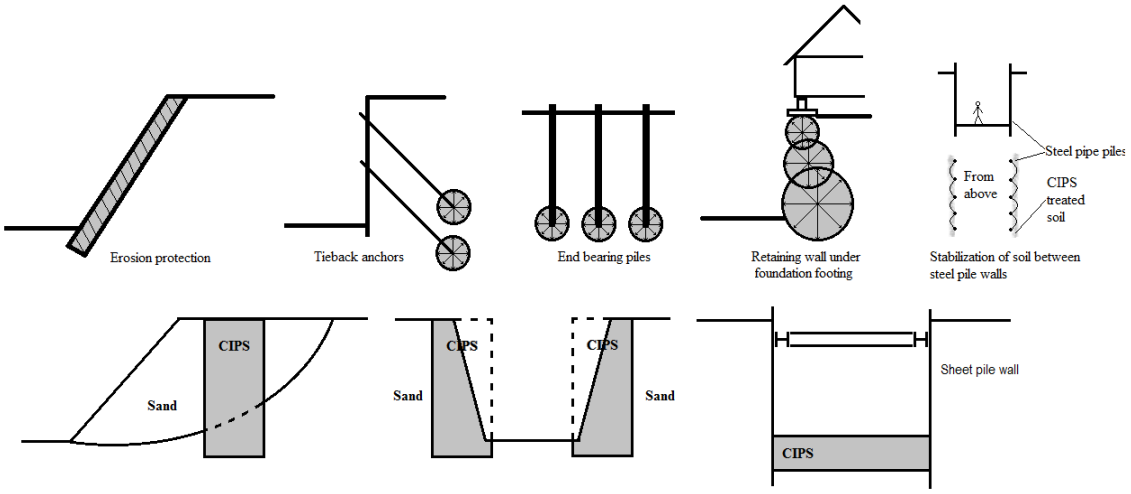

**Figur 5.5:** Släntstabilitet för CIPS cementerad sand med säkerhetsfaktor 1.34, lutning 2:1, kohesion 21 kPa och en utbredd last av 10 kPa som verkar 0.5 m från släntkrönet.

Om paralleller dras till laboratorieundersökningarna där provkropparna visade ett samband mellan hållfasthetsökning och torktid så kan det antas att hållfasthetsökningen In-situ inte kommer att nå de nivåer som motsvarar fullt torkade laboratorieprover. Detta antagande är baserat på det faktum att den behandlade sanden In-situ kommer ställa in sig mot naturliga vattenkvoten för den valda platsen, för detta fall omkring 6 %. Detta kan jämföras med en laboratorieprovkropp som inte torkas till fullo vilken skulle visade en lägre hållfasthetsökning på grund av det något fuktiga tillståndet. Ett sätt runt detta problem kan vara antingen att spola den behandlade jordvolymen med vatten efter 24 timmar för att avlägsna överskottsvätskan. En annan lösning skulle kunna vara att invertera pumpen och suga tillbaka överskottsvätskan och lite av den behandlade jordvolymens omgivande grundvatten. Detta skulle utföras efter den förväntade utfällningen av kalcit kristallerna har ägt rum (efter cirka 24 timmar).

När CIPS processen har utvecklats ytterligare för Skandinaviska förhållanden och osäkerheten angående den kemiska processen utretts så att samma hållfasthetsökningar även kan uppnås i fält så kan det konstateras att de ingående kemikaliepriserna är låga. Kemikaliepriserna för detta experiment (bortsett alla transportkostnader och eventuella mängdrabatter) för behandling av en kubikmeter summeras till 850 SKR/$m^3$ ($ 123/m3 AU) för en friktionsjord med en porositet på ca 30 %. Eftersom det inte finns behov av större maskiner eller hög energianvändning så kan etableringskostnaderna antas vara låga i jämförelse med andra existerande jordstabiliserande metoder som kräver stora och dyra maskiner. CIPS metoden kommer att kräva ett relativt litet pumpsystem innefattande en kompressor som kan leverera mycket låga tryck och låga flödeshastigheter vilket kommer att hålla etableringskostnaderna låga.

## 5.2 Möjliga användningsområden för cementering med kalcitutfällning

Områdena där CIPS kan användas är många och beror mycket på de rådande jordförhållandena samt kreativiteten hos olika konstruktörer. En skiss (*figur 5.6*) och en punktlista presenteras nedan med principerna för olika applikationer där CIPS möjligen kan vara användbar med ekonomiska fördelar. En ökning i hållfasthet nås genom en cementering av sandkornen vilket bidrar till att en positiv ökning i kapacitet vilket kan nyttjas av olika konstruktiva byggelement.




**Figur 5.6**: Möjliga användningsområden för CIPS. Nedre raden behandlar mer totalstabilitets lösningar.

I tillägg till skissen ovan så kan CIPS även användas till:

**Jordförvätskning (liquifaction) –** högre hållfasthet men fortfarande permeabelt med CIPS gör det möjligt att behandla jord för att motverka jordjordförvätskning. (Lithic Technology, 2012).

**Friktionspålar –** en ökning i bärförmåga hos friktionspålar kan uppnås genom ökad effektiv area vilket leder till ökad mantelfriktion (Price, 2012).

**Stabilisering av sättningsbenägna rörledningar –** Redan befintliga rör som är utsatta för pågående sättningar kan stabiliseras genom CIPS injekteringer runtom det kritiska området. Detta skulle eliminera behovet av att schakta fram rören i dagen för att utföra stabiliserande åtgärder (Price, 2012).

**Restaurering av historiska monument och byggnader**– Jroundi et al. (2010) förklarar att många av världsarvslistade byggnader är byggda av sedimentära stenarter. Dessa stenarter, speciellt marmor och kalksten är väldigt känsliga för fysisk erosion, kemisk erosion (föroreningar) samt biologisk vittring (makro- och mikroorganismer), vilket leder till att många av dessa historiska och kulturella byggnader är utsatta för fara (Jroundi et al. 2010). Detta problem går att avhjälpa genom att skapa nya byggblock för att ersätta de skadade och vittrade stenarna. CIPS kan även appliceras direkt på fasadytorna för att stärka och öka cementeringen vilket motverkar en eventuellt pågående erosion.

# Kapitel 6

# Vidare studier

Metoden är, som summerats ovan lovande, men det finns ett antal olika ämnesområden som behöver ytterligare studier och forskning i syfte att åstadkomma en metod som lämpar sig för markförstärkning i Skandinaviska jordar, eller jord som inte helt kommer att torka ut.

Den första stora frågan som behöver förtydligande är varför hållfasthetsökningen sker och vad som påverkar cementering på ett negativt sätt. Har hållfasthetsökningen uppstått på grund av effekten av syre eller uppstår den som en följd av avgången av överskottsvätskan från provkroppen. När detta är utrett kommer en bättre förståelse uppstå för In-situ beteende av CIPS-systemet.

För att simulera in-situ förhållanden i de Skandinaviska jordarna skulle det vara intressant att göra en laboratoriestudie där överskottsvätskan i provkropparna ersattes av vatten efter behandlingen och sedan torkades till samma naturliga fuktkvot som återfinns i naturligt lagrad sand. De enaxliga tryckhållfasthetstesterna skulle därefter utföras på provkroppar som hade ett något fuktigt tillstånd. Antagandet skulle vara att mindre hållfasthet har åtkommits jämfört med de provkroppar som har lämnats för att torka helt.

Eftersom bevis pekar på att överskottsvätska vilken blir kvar i provkropparna har en hämmande effekt på hållfasthetsökningen i sanden uppstår ett behov av en djupgående undersökning av denna vätska. Anledningen till den hämmande kemiska effekten av överskottsvätskan måste kartläggas och förstås. När detta är utrett blir det lättare att utforma en fältmetod för CIPS som riktar sig mot fuktiga markförhållanden.

Dessutom, på grund av stränga miljöregler och skydd av grundvattenreservoarer i Sverige är det viktigt att fastställa effekterna av överskottsvätskan som innehåller ammoniumklorid. I vilka koncentrationer förekommer denna vätska och vilka nivåer kan tolereras av det Svenska Naturvårdsverket? Denna överskottsvätska kan också ha en positiv inverkan på miljön i form av inkapsling av tidigare föroreningar i marken, eller arbeta som gödningsmedel. Detta är också frågor som har uppstått under dessa utvärderingar.

Det finns många frågor som rör applikationsprocessen här i Skandinavien. Klimatet är mycket kallt och under noll grader under långa perioder. Kan en metod utvecklas som gör det möjligt att använda denna metod även under vintermånaderna, skulle det gå att förvärma vätskan, injicera varmt vatten i marken före injektering av CIPS eller kanske använder vissa tillsatser?

# Referenser


Airey, D., W. 1993. “Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil.” *Journal of Geotechnical Engineering* 119 (9): 1379-1398

Al-Thawadi, S. M. 2008. “High Strenth In-Situ Biocementation of Soil by Calcite Precipitating Locally Isolated Ureolytic Bacteria” Doctor of Philosophy, Murdoch University.

Bachmeier, K. L., Williams, A. E., Warmington, J. R. and Bang, S. S. 2002. “Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation.” *Journal of Biotechnology* 93 (2): 171-181

Barkouki, T. H., Martinez, B. C., Mortensen, B. M., Weathers, T. S., DeJong, J. D., Ginn, .T. R., Spycher, N. F., Smith, R. W. and Fujita, Y. 2011. “Forward and Inverse Bio-geochemical Modeling of Microbially Induced Calcite Precipitation in Half-Meter Column Experiments.” *Transport of Porous Media* 90 (1): 23-39

Bang, S. S., Lippert, J. J., Yerra, U., Mulukutla, S. and Ramakrishnan, V. 2010. ”Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation.” *International Journal of Smart and Nano Material.*1 (1): 28-39

Bergdahl, U., Ottosson, E. and Stigsson Malmborg, B. 1993. Plattgrundläggning. ISBN: 91-7332-662-3.

Bundeleva, I. A., Shirokova, L. S., Bénézeth, P., Pokrovsky, O. S., Kompantseva, E. I. and Balor, S. 2012. ”Calcium carbonate precipitation by anoxygenic phototrophic bacteria” *Chmical Geology* 291: 116-131

Chou, C.W., Seagren, E. A., Aydilek, A. H. and Lai, M. 2011. “Biocalcification of Sand through Ureolysis.” *American Society of Civil Engineering* 137 (12): 1179-1189

Collins. Brian. D. and Sitar, N. 2009. “Geotechnical Properties of Cemented Sand in Steep Slopes.” *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering* 135 (10): 1359-1366

Construction News. 2001. “*Nip and tuck for historic buildings.”* http://www.cnplus.co.uk/news/cutting-edge-nip-and-tuck-for-historic-buildings/887404.article (Accessed 2012-04-20).

CSIRO, the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. 2011. *North-West Shelf gas platform.* http://www.csiropedia.csiro.au/display/CSIROpedia/North-West+Shelf+gas+platforms, *Access 2012-02-23*

De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. 2010a. ”Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review.” *Ecological* Engineering. 36 (2): 118–136.

De Muynck, W., Verbeken, K., De Belie and N., Verstraete, W. 2010b. ”Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone.” Ecological Engineering. 36 (2): 99–111.

DeJong, J. T., Fritzges, M. B. and Nüsslein, K. 2006. “Microbially Induced Cementation to control Sand Response to Undrained Shear” *ASCE. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132 (11): 1381-1392.

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Nelson, D. C. 2010. ”Bio-mediated soil improvment” *Ecological Engineering* 36 (2): 197-210.

DOW. 1995. “*Calcium Chloride ACS”* http://www.dow.com/product-line/calcium-chloride/product/calcium-chloride-acs/

Encyclopedia Britannica. 2012. *"Urease."* http://www.britannica.com/EBchecked/topic/619665/urease (Accessed 2012-04-27)

Eniro. 2012. *"kartor – Vallagränd, Handen."* http://kartor.eniro.se/ (Accessed 2012-05-30)

Fauriel, S. Laloui, L. 2011. "A Bio-hydro-mechanical Model for Propagation of Biogrout in Soils." *Geo-Frontiers 2011 Conference, ASCE, Dallas, Texas, USA.*

Ferris, F.G., Phoenix, V., Fujita, Y., Smith, R.W. 2003. "Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10–20 ºC in artificial groundwater." *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 68 (8): 1701–1722.

Fujita, Y., Ferris, F. G., Lawson, R. D., Colwell, F. S., Smith, R. W. 2000. "Calcium carbonate precipitation by ureolytic subsurface bacteria." Geomicrobiology Journal. 17: 305–318.

Gonsalves, G. M. 2011. "Bioconcrete – A sustainable substitute for concrete." Master Thesis Barcelona: Polytechnic University of Catalonia.

Harkes, M. P., Paassen, L. A., Booster, J. L., Whiffin, V. S. and Loosdrecht, M. C.M. 2010. "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement." *Ecological Engineering* 36(2): 112-117

Ismail, M., Joer, H., and Randolph, M. F. 2000a. ''Sample preparation technique for artificially cemented soils.'' *Geotechnical Testing Journal* 23 (2): 171–177

Ismail, M. A., Joer, H. A., Randolph, M. F., and Meritt, A. 2002a. "Cementation of porous materials using calcite." *Géotechnique* 52 (5): 313-324

Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., and Randolph, M. F. 2002b. "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil." *Journal of Geological and Geoenviromental Engineering* 128 (6): 520-529

Jansson, P.-E. 2009. *"Temperatur Tjäle."* ftp://www.lwr.kth.se/CoupModel/Reports/ (Accessed 2012-05-10)

Jroundi, F., Fernàndez-Vivas, A., Rodriguez-Navarro, C., Bedmar, E. J. and Gonzàlez-Mu ñoz, M. T. 2010. "Bioconservation of Deteriorated Monumental Calcarenite Stone and Identification of Bacteria with Carbonatogenic Activity." *Enviromental Microbiology* 60 (1): 39-54

Jordbruksverket. 2012a "*När du sprider gödsel – bestämmelsersom gäller i hela landet*" http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/odling/vaxtnaring/spridagodselmedel (Access 2012-05-25)

Jordbruksverket. 2012b "*Statestik från Jordbruksverket*" http://www.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/Amnesomraden/Statistik%2C%20fakta/Annan%20statistik/Statistikrapport/Statistikrapport2012_2/201202._tabeller1.htm (Access 2012-05-25)

Karol, R., H. 2003. *Chemical grouting and soil stabilization.* 3rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc.

Kucharski, E., Chow, F., Price, G., Vaughan, P., McGinnity, B., 2000, "Investigations into the stabilisation of ash using the calcite in situ precipitation system." *GeoEng 2000*, November 2000, Melbourne, Australia.

Kucharski, E., Price, G., Li, H. and Joer, H.A. 1996a. "Laboratory Evaluation of CIPS Cemented Calcareous and Silica Sands". Proceedings 7th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Adelaide, South Australia, July, M.B. Jaksa W.S. Kaggwa and D.A. Cameron Eds., pp. 102 - 107.

Kucharski, E., Price, G., Li, H. and Joer, H.A. 1996b. "Engineering Properties of CIPS Cemented Calcareous Sands". Proceedings 30th International Geological Congress, Beijing, China, August, Wang Sijing and P. Marinos Eds., pp. 449 - 460.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V. 1979. *Soil Mechanics, SI Version*. U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.

Lantmäteriet. 2010. *Tvådimensionella system – SWEREF 99, projektioner.* www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=4219 Access 2012-05-30.

Larsson, R. 1989. *Hållfasthet i friktionsjord*. Linköping. Statens Geotekniska Institut.

Larsson, R. 2008. *Jords egenskaper*. 5th ed. Linköping. Statens Geotekniska Institut

Lithic Technology Pty Ltd. 2012. Ground improvement the way nature does it – but a million times faster. Turn sand into rock. www.lithic.com.au

Molenaar, N., and Venmans, A. A. M. 1993. "Calcium carbonate cementation of sand: A method for producing artificially cemented samples for geotechnical testing and a comparison with natural cementation processes." *Engineering Geology* 35(1) 103–122

Naturvårdsverket. 2012. *"Miljömål – Ammoniakutsläpp"* http://www.miljomal.se/Miljomalen/Alla-indikatorer/Indikatorsida/?iid=5&pl=1 (Accessed 2012-05-07).

National Encyklopedin. 2012a. *"EDTA."* www.ne.se (Accessed 2012-04-27)

National Encyklopedin. 2012b. *"Natriumsulfit."* www.ne.se (Accessed 2012-04-27)

National Encyklopedin. 2012c. *"Ureas."* www.ne.se (Accessed 2012-04-27)

Neumeier, U. 1999. "Experimental modeling of beachrock cementation under microbial influence." *Sedimentary Geology* 126 (1): 35–46

Okwadha, G. D.O., Li, J. 2010. "Optimum conditions for microbial carbonate precipitation." *Chmosphere* 81 (9): 1143-1148.

Oxford Earth Science Image Store. 2004. *"Rocks under the Microscope"* http://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/micro/ (Accessed 2012-07-03)

van Paassen, L. A., van Loosdrecht, M. C. M., van den Eijnden, A. P., Mulder, A., Verwaal, W., Ngan-Tillard, D. J. M., Harkes, M. P., Bekendam, R. F. 2008. "Reinforcement of calcarenite room and pillar mines by microbially induced carbonate precipitation." EuroEngeo 2008, pp. 1-6

van Paassen, L. A. 2009a. "Biogrout: Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation". PhD Delft: Delft University of Technology

van Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieten, G. A., van der Zon, W. H., van der Star W. R. L., van Loosdrecht, M. C. M. 2009b. "Scale up of Biogrout: a biological ground reinforcement method." *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* 5-9 October 2009, Alexandria, Egypt.

van Paassen, L. A., van Loosdrecht, M. C. M., Pieron, M., Mulder, A., Ngan-Tillard, D. J. M., van der Linden, T. J. M. 2009c. "Strength and deformation of biologically cemented sandstone." *Proceedings of the ISRM Regional conference EUROCK 2009, Rock engineering in difficult ground conditions, Soft rocks and karst*, 29-31 October 2009, Dubrovnik, Croatia

van Paassen, L. A., Daza, C. D., Staal, M., Sorokin, D. Y., Zon, W. and Loosdrecht, M. C.M. 2009d. "Potential soil reinforcement by biological denitrification." *Ecological Engineering* 36 (2): 168-175

van Paassen, Heimovaara, T., Hicks, M. and M. v. Loosdrecht. Project: 11337. http://geo.citg.tudelft.nl/~leon/Biofix%20project%20proposal.pdf

Price, G. 1988. "Fabric of Calcareous Sediments at North Rankin 'A,' North West Shelf," *Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments*, R. J. Jewell and M. S. Khorshid, Eds., Balkema, Rotterdam, Vol. 2. 367–376.

Price, G. 2012. Interview. Melbourne, Australia

Riehm, M. 2010. *"Så ska väghalkan bekämpas."* http://www.kth.se/aktuellt/sa-ska-vaghalkan-bekampas-1.68805 (Accessed 2012-04-26)

Rong, H., Qian, C. and Wang, R. 2011 "A cementation method of loose particles based on microbe-based cement" *Science China* 54 (7): 1722-1729

v. d. Ruyt, M. and v. d. Zon, W. 2009. "Biological in situ reinforcement of sand in near-shore areas." *Geotechnical Engineering*. 162 (GEI): 81-83.

Sarda, D., Choonia, H. S., Sarode, D. D. and Lele, S. S. 2009. "Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: a novel application." *Journal of industrial microbiology & biotechnology* 36 (8): 1111-1115

SGU. 2012. *"Förnybara energikällor i Sverige."* http://www.sgu.se/sgu/sv/samhalle/energi-klimat/fornybar-energi_info.html (Access 2012-05-10).

Sharma, S. S., Ismail, M. A. 2006. "Monotonic and Cyclic Behavior of Two Calcareous Soils of Different Origins*." ASCE. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132 (12): 1581-1591

SMHI. 2012. *"Lufttemperatur – Året 2011"* http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/temperatur (Access 2012-05-10).

Stockes-Fisher, S., Galiant, J. K. and Bang, S. S. 1999. "Microbiological precipitation of $CaCO_3$" *Soil Biology and Biochemistry* 31 (11): 1563-1571.

Suer, P., Hallberg, N., Carlsson, C., Bendz, D., Holm, G. 2009. "Biogrouting compared to jet grouting: Enviromental (LCA) and economical assessment." *Journal of Enviromental Science and Health.* 44 (4): 346-353.

Sumner, J., B. 1926. "The isolation and crystalization of the enzyme urease." *J. Biol. Chem.* 69:435-441

Swedish Chemical Society. 2007a. *"Urea"* http://apps.kemi.se/flodessok/floden/kemamne_eng/urea_eng.htm (Accessed 2012-04-26)

Swedish Chemical Society. 2007b. *"Sodium Carbonate."* http://apps.kemi.se/flodessok/floden/kemamne_eng/natriumkarbonat_eng.htm (Accessed 2012-04-27)

Swedish Geotechnical Institut. 2011. *Jordstabilisering med bioteknologi – En förstudie*. Varia 622. Linköping

Swedish Geotechnical Institut. 2001. *System för värme och kyla ur mark – En nulägesbeskrivning*. Varia 511. Linköping

Tatzki, T. 2003. "CIPS – A new permeation grouting system." Carbo Tech Fosroc GmbH. Essen, Germany

Tetra Chemicals Europe. 2010. *"Solids Properties."* *http://www.tetrachemicalseurope.com/Resources/Physical_Properties/Solids.aqf* (Accessed 2012-04-26)

Vaughan, P. R., Kucharski, E. S., Chow, F. C., Armitage, R., Okundi, E. and Fitch, T. R. 2001. "Experimental treatment of an old track-bed using CIPS." London Underground Ltd and Infraco JNP Ltd.

Volodymyr I., Chu, J. 2008. "Application of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ."*Enviromental Science and Bio/Technology* 7 (2): 139-153

Wang, J., Tittelboom, K. V., Belie, N. D. and Verstraet, W. 2012. "Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete." *Construction and Building Materials* 26(1): 532-540

Waterton C and Price GP, 1994, "Carbonate sediment stability around an offshore pipeline." *Proceedings of International Conference on Soil Mechanics, New Delhi*, 243-252. QCAT T624.15

Whiffin, V. S. 2004. "Microbial $CaCO_3$ Precipitation for production of Biocement." Doctor of Philosophy in Biotechnology, Murdoch University.

Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., Harkes, M. P. 2007. "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique." *Geomicrobiology Journal* 24 (5): 417-423

Wijngaarden, W. K. , Vermolen, F. J., Meurs, G. A. M. and Vuik, C. 2012. "A Mathematical Model and Analytical Solution for the Fixation of Bacteria in Biopgrout" *Transport in Porous Media* doi:10.1007/s11242-011-9937-0 pp. 1-20

v. Wijngaarden, W. K., Vermolen, F. J, Meurs, G. A. M. and Vuik, C. 2011. "Modelling Biogrout: A New Ground Improvment Methode Based on Microbial-Induced Carbonate Precipitation." *Transport in Porous Media* 87 (2): 397-420

Wikipedia. 2012a. *"Viscosity."* http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity#Viscosity_of_water (Accessed 2012-04-20)

Wikipedia. 2012b. *"Urease."* http://en.wikipedia.org/wiki/Urease (Accessed 2012-04-26)

Wikipedia. 2012c. *"Urea."* http://en.wikipedia.org/wiki/Urea (Accessed 2012-04-26)

Wikipedia. 2012d. *"Calcium Chloride."* http://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_chloride (Accessed 2012-04-26)

Wikipedia. 2012e. *"Sodium Carbonate."* http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_carbonate (Accessed 2012-04-27)

Wikipedia. 2012f. *"Ethylenediaminetetraacetic acid."* http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylenediaminetetraacetic_acid (Accessed 2012-04-27)

Wikipedia. 2012g. *"Sodium Sulfite."* http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_sulfite (Accessed 2012-04-27)

Wikipedia. 2012h. *"Ammonium chloride."* http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_chloride (Accessed 2012-08-24)

Wouter, R. L., van der Star, W. R. L., E. Taher, M. P. Harkes, M. Blauw, M. C. M. Van Loosdrecht and L. A. Van Paassen. 2009. "Use of waste streams and microbes for in situ transformation of sand into sandstone," *Geotechnical Society of Singapore - International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories*, ISGI2009, pp 177-182

Wu, Y., Hubbard, S., Williams, K. H. and Ajo-Franklin, J. 2010. "On the complex conductivity signatures of calcite precipitation" *Journal of Geophysical Research* 115, G00G04, doi:10.1029/2009JG001129

Zumdahl, S. S., and Zumdahl, S. A., 2006. *Chemistry*. 6th eds. U.S.A: Houghton Mifflin Company

Åhnberg, H., Johnasson, S. E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmquist, L., Holm, G. 1995. *Cement och kalk för djupstabilisering av jord – En kemisk- fysikalisk studie av stabiliseringseffecter.* Report 48. SGI. Linköping

# Bilagor

Sid.

Bilaga A: Kornfördelning 58

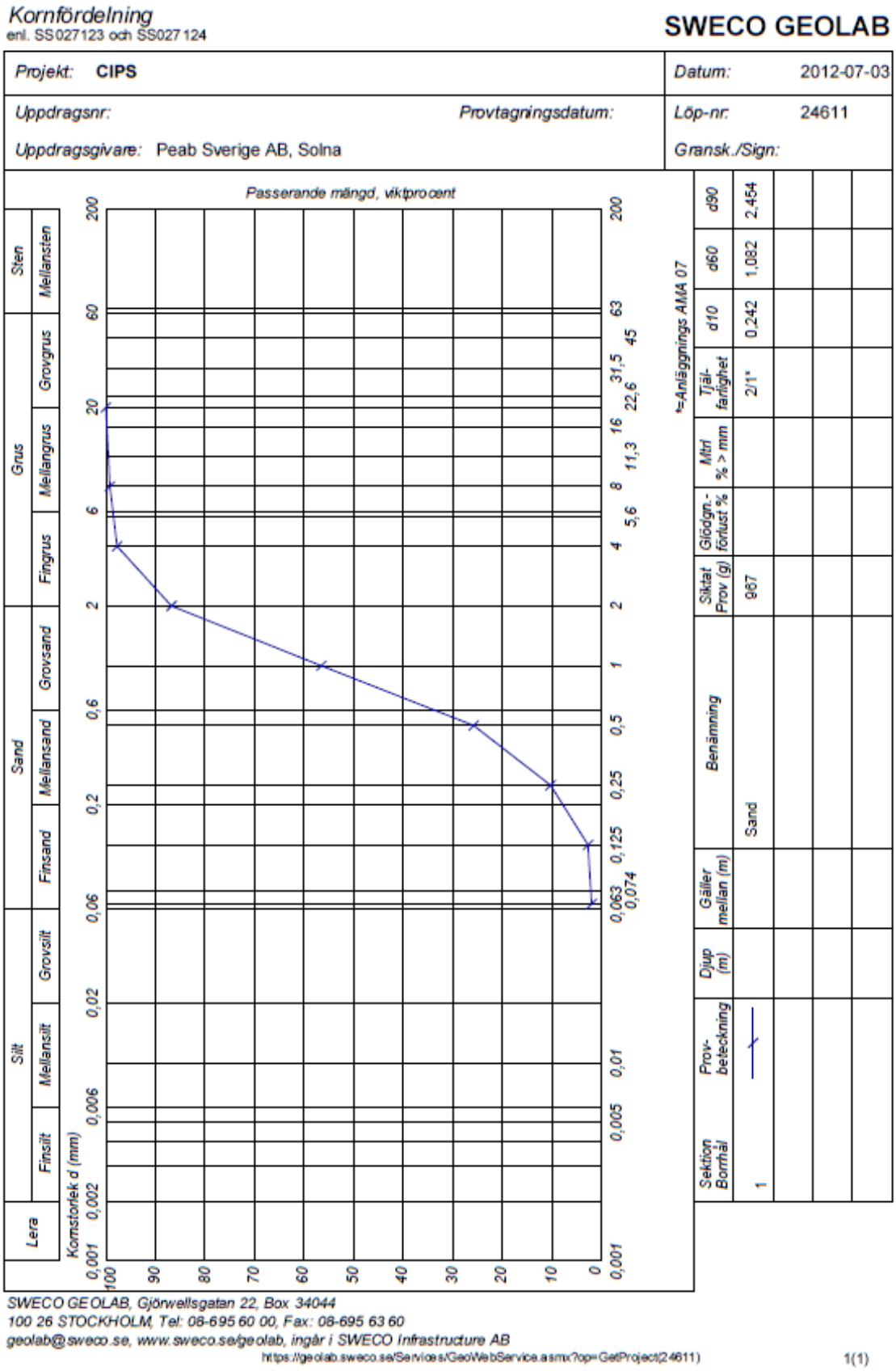
Bilaga B: Petrografisk sammansättning 59

Bilaga C: CPT sondering 12GT05 61

Bilaga D: Enaxliga tryckhållfasthetsresultat 64

Bilaga E: Bilder från den visuella undersökningen 71

## Bilaga A: Kornfördelning



## Bilaga B: Petrografisk sammansättning

**SWECO GEOLAB**

*Petrografisk sammansättning*

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Projekt* **CIPS** | | | |
| *Uppdragsnummer* | *Uppdragsgivare* Peab Sverige AB, Solna | *Gransk./Tabell* | |
| | | *Löp-nr* | 24611 |
| *Provtagningsdatum* - | *Provtagningsredskap / Analysmetod* Stereomikroskop | *Datum/Sign* | 2012-07-03 |
| | | *Undersökningsdatum* | 2012-07-02 - |

| Prov / Fraktion [mm] | Beskrivning | Antal partiklar [%] | Partikel form |
|---|---|---|---|
| 8,0 | Bergfragment: granit | 100 | kantig |
| 4,0 | Bergfragment: granit | 84 | kantiga |
| | Bergfragment: diabas | 4 | kantiga |
| | Begrfragment: porfyr? | 2 | kantiga |
| | Kvarts | 10 | |
| 2,0 | Begrfragment: granit | 74 | kantiga |
| | Bergfragment: diabas | 6 | kantiga |
| | Kvarts | 17 | Kantiga |
| | Kalifältspat | 3 | kantiga |
| 1,0 | Bergfragment: granit | 53 | kantiga |
| | Bergfragment: diabas | 3 | rundade |
| | Kvarts | 42 | kantiga / rundade |
| | Kalifältspat | 2 | kantiga / rundade |
| 0,5 | Bergfragment: granit | 37 | kantiga / rundade |
| | Begrfragment: diabas | <1 | rundade |
| | Kvarts | 52 | kantiga / rundade |
| | Kalifältspat | 10 | rundade |
| 0,25 | Kvarts | 92 | kantiga / rundade |
| | Kalifältspat | 6 | rundade |
| | epidot? | 1 | rundade |
| | Biotit | <1 | flisiga |
| 0,125 | Kvarts | 95 | kantiga / rundade |
| | Kalifältspat | 3 | rundade |
| | biotit | 2 | flisiga |

P:\2172\Uppdrag 2012\24611\[Petro 120702.xlsx]

SWECO

SWECO GEOLAB, Gjörwellsgatan 22, Box 34044,
100 26 STOCKHOLM, Tel: 08-695 60 00, Fax: 08-695 63 60,
geolab@sweco.se, www.sweco.se/geolab, Ingår i SWECO Infrastructure AB

1(2)

**SWECO GEOLAB**

*Petrografisk sammansättning*

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Projekt* **CIPS** | | | |
| *Uppdragsnummer* | *Uppdragsgivare*<br>Peab Sverige AB, Solna | *Gransk./Tabell*<br>*Löp-nr* 24611 | |
| *Provtagningsdatum*<br>- | *Provtagningsredskap / Analysmetod*<br>Stereomikroskop | *Datum/Sign* 2017-07-03<br>*Undersökningsdatum*<br>2012-07-02 - | |

| Prov / Fraktion [mm] | Beskrivning | Antal partiklar [%] | Partikel form |
|---|---|---|---|
| 0,063 | Kvarts<br>Biotit | 99<br>1 | kantiga<br>flisiga |

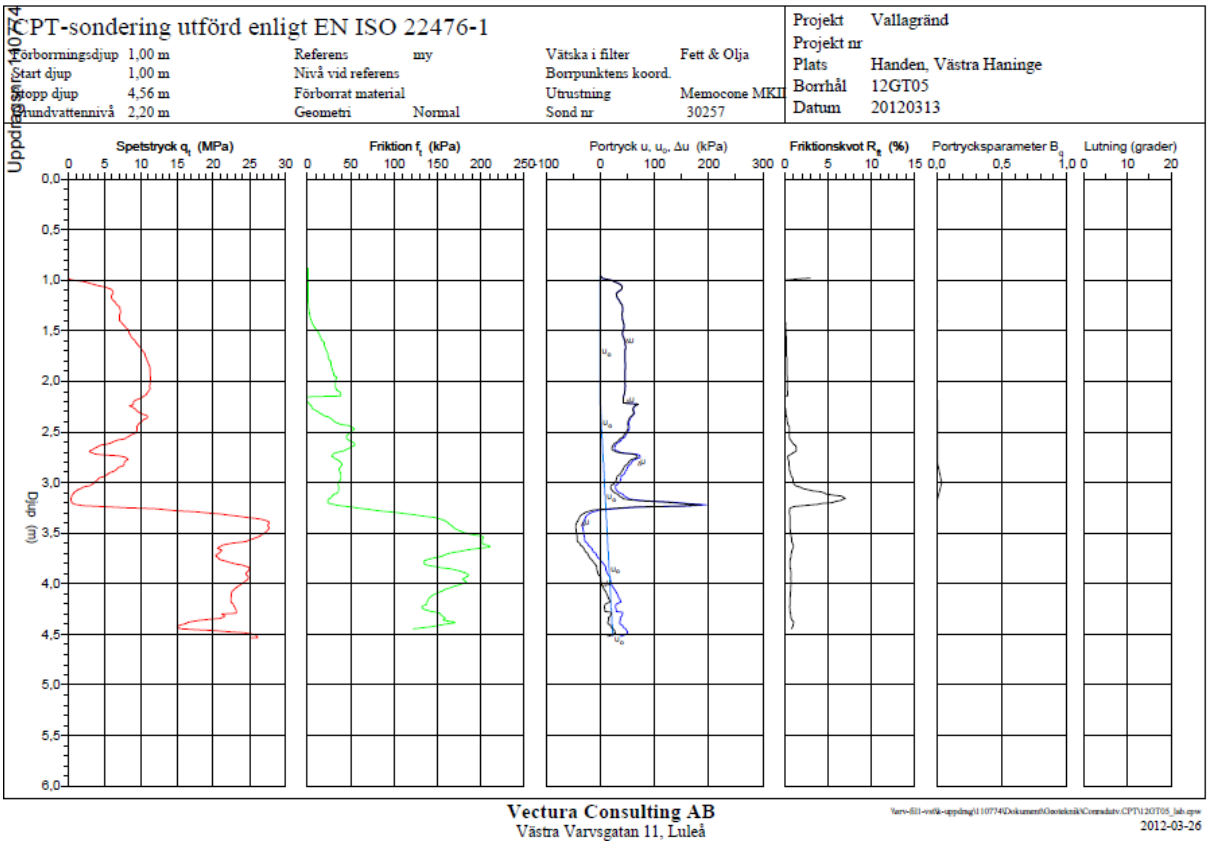
P:\2172\Uppdrag 2012\24611\[Petro 120702.xlsx]

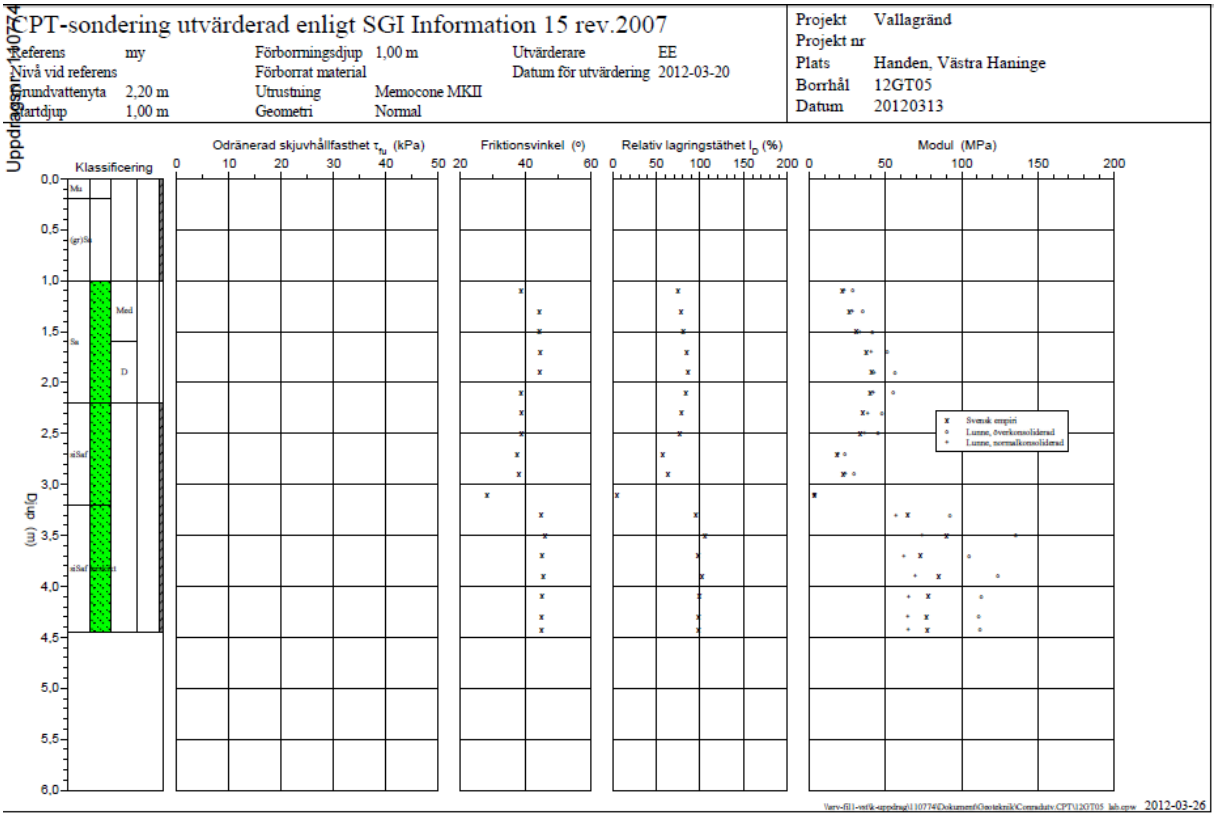
SWECO

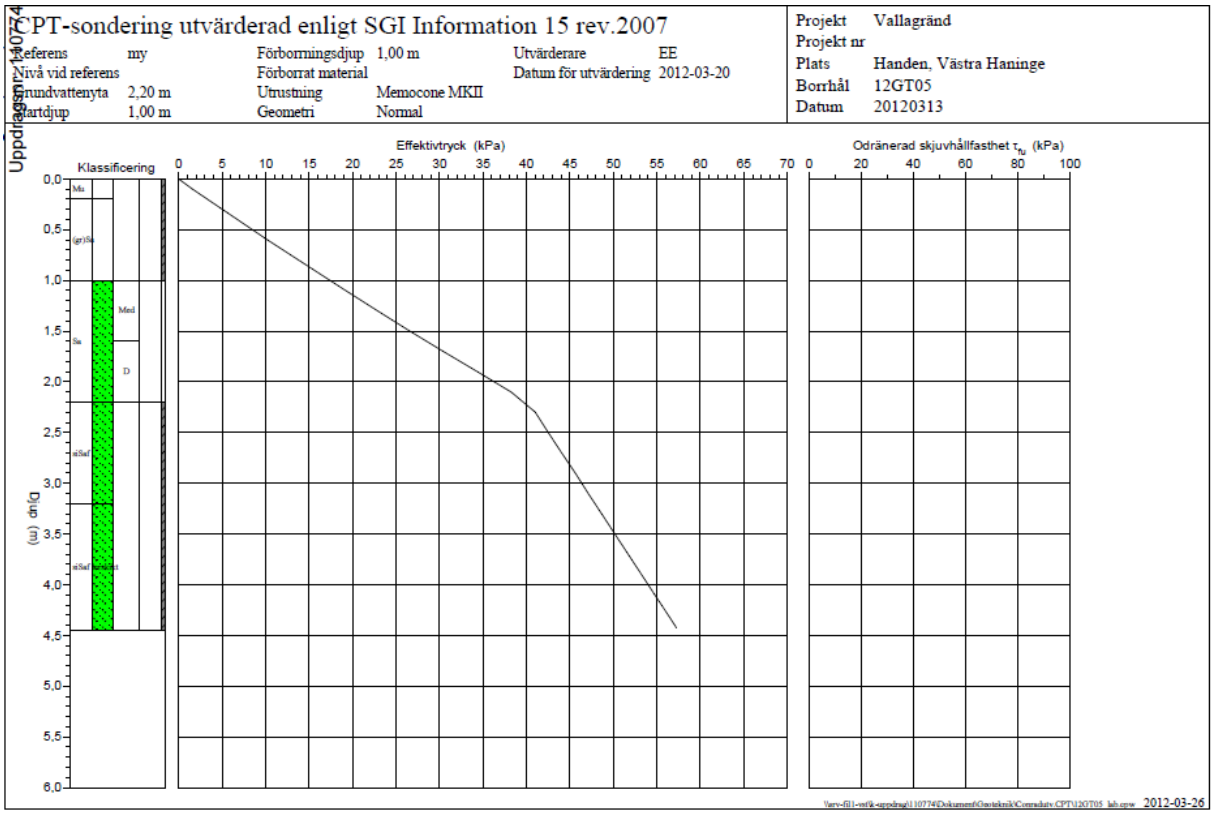
SWECO GEOLAB, Gjörwellsgatan 22, Box 34044,
100 26 STOCKHOLM, Tel: 08-695 60 00, Fax: 08-695 63 60,
geolab@sweco.se, www.sweco.se/geolab, Ingår i SWECO Infrastructure AB

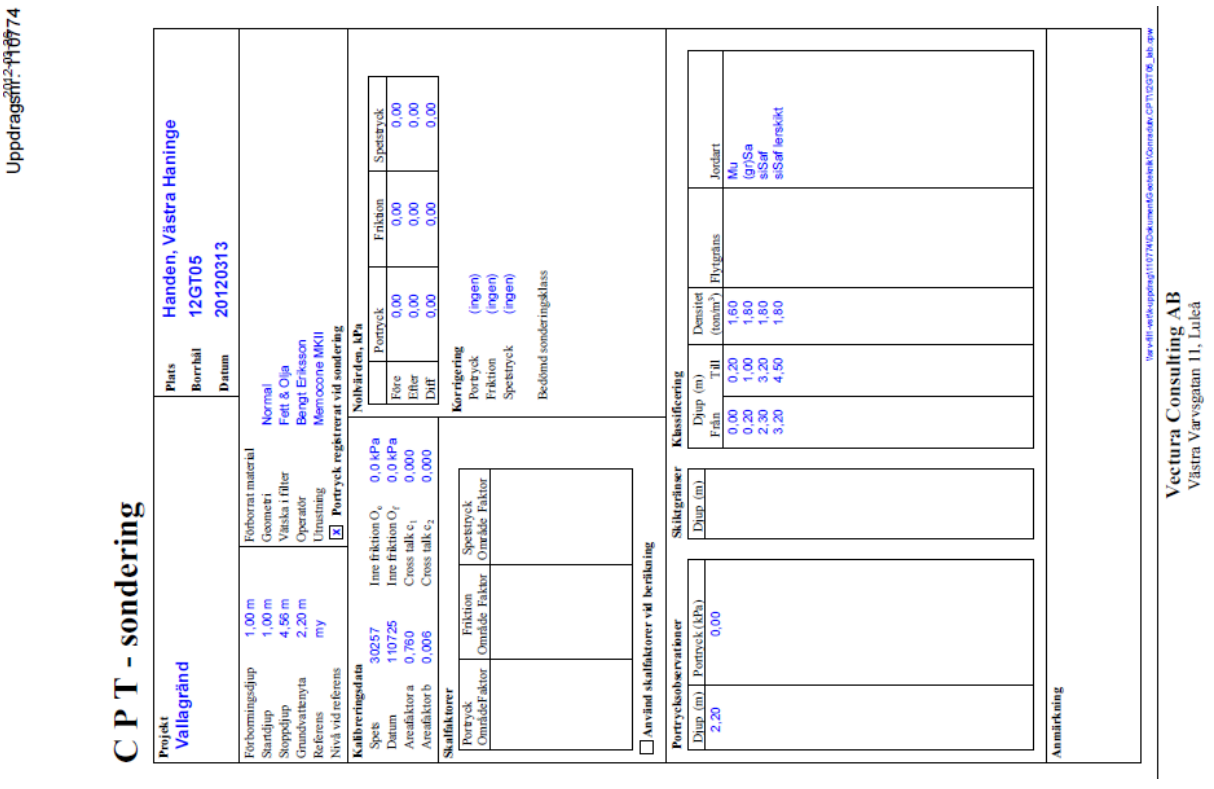
2(2)

## Bilaga C: CPT sondering 12GT05




Uppdragsnr: 110774
CPT-sondering utvärderad enligt SGI Information 15 rev.2007
Referens my
Nivå vid referens
Grundvattenyta 2,20 m
Startdjup 1,00 m
Förborningsdjup 1,00 m
Förborrat material
Utrustning Memocone MKII
Geometri Normal
Utvärderare EE
Datum för utvärdering 2012-03-20
Projekt Vallagränd
Projekt nr
Plats Handen, Västra Haninge
Borrhål 12GT05
Datum 20120313
Klassificering
Effektivtryck (kPa)
Odränerad skjuvhållfasthet $\tau_{fu}$ (kPa)
Djup (m)
Mu
(gr)Sa
Sa
Med
D
siSaf
2012-03-26


Uppdragsnr: 110774
C P T - sondering
Projekt
Vallagränd
Plats Handen, Västra Haninge
Borrhål 12GT05
Datum 20120313
Förborningsdjup 1,00 m
Startdjup 1,00 m
Stoppdjup 4,56 m
Grundvattenyta 2,20 m
Referens my
Nivå vid referens
Förborrat material Normal
Geometri Fett & Olja
Vätska i filter Bengt Eriksson
Operatör Memocone MKII
Utrustning
Portryck registrerat vid sondering
Kalibreringsdata
Spets 30257
Datum 110725
Areafaktor a 0,760
Areafaktor b 0,006
Inre friktion $O_o$ 0,0 kPa
Inre friktion $O_f$ 0,0 kPa
Cross talk $c_1$ 0,000
Cross talk $c_2$ 0,000
Nollvärden, kPa
Portryck
Friktion
Spetstryck
Före 0,00 0,00 0,00
Efter 0,00 0,00 0,00
Diff 0,00 0,00 0,00
Skalfaktorer
Portryck Område Faktor
Friktion Område Faktor
Spetstryck Område Faktor
Korrigering
Portryck (ingen)
Friktion (ingen)
Spetstryck (ingen)
Bedömd sonderingsklass
Använd skalfaktorer vid beräkning
Portrycksobservationer
Djup (m) Portryck (kPa)
2,20 0,00
Skiktgränser
Djup (m)
Klassificering
Djup (m) Från Till Densitet (ton/m³) Flytgräns Jordart
0,00 0,20 1,60 Mu
0,20 1,00 1,80 (gr)Sa
2,30 3,20 1,80 siSaf
3,20 4,50 1,80 siSaf lerskikt
Anmärkning
Vectura Consulting AB
Västra Varvsgatan 11, Luleå

Uppdragsnr: 10174

# C P T - sondering

Sida 1 av 1

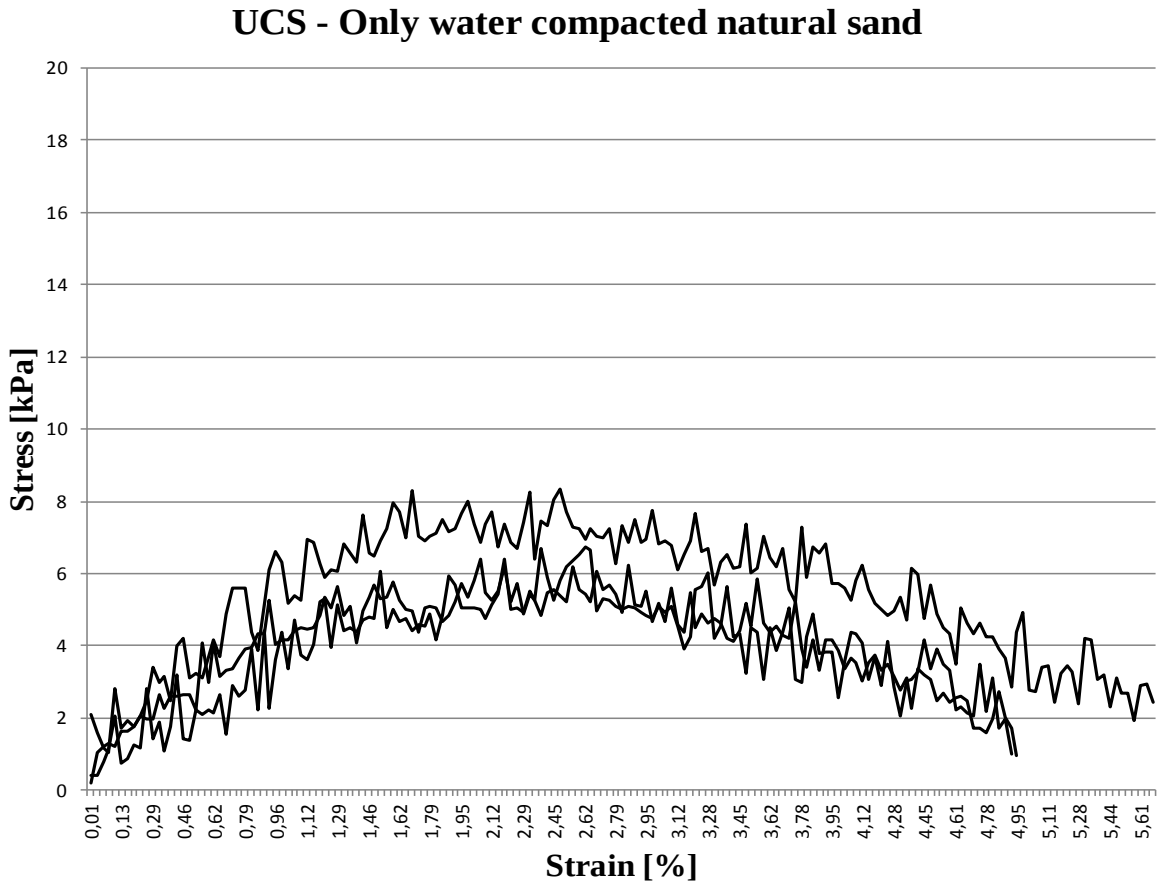
| Projekt | | | Plats | Handen, Västra Haninge |
|---|---|---|---|---|
| Vallagränd | | | Borrhål | 12GT05 |
| | | | Datum | 20120313 |

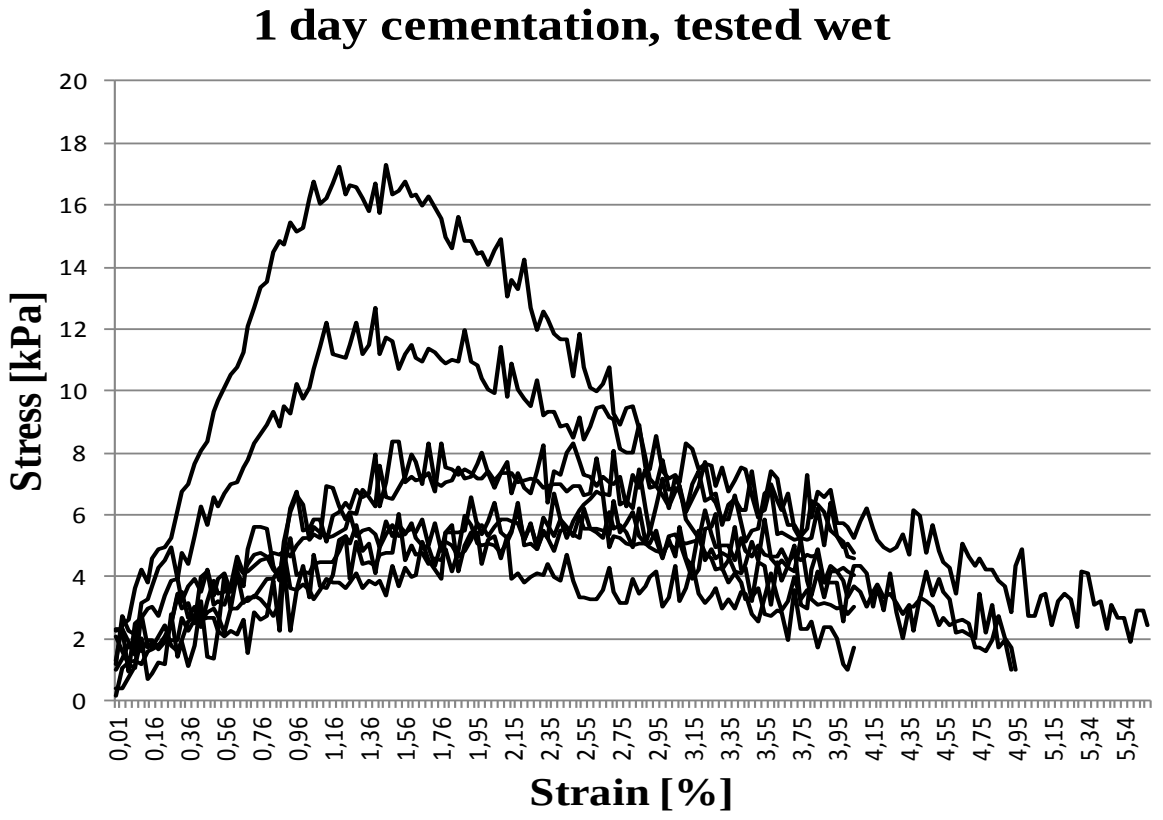
| Djup (m) Från | Till | Klassificering | ρ ton/m³ | $w_L$ | $\tau_{fu}$ kPa | ϕ ° | $\sigma_{wo}$ kPa | $\sigma'_{vo}$ kPa | $\sigma'_{v}$ kPa | OCR | $I_D$ % | E MPa | $M_{OC}$ MPa | $M_{OC}$ MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.00 | 0.20 | Mu | 1.60 | | | | 1.6 | 1.6 | | | | | | |
| 0.20 | 1.00 | (gr)Sa | 1.80 | | | | 10.2 | 10.2 | | | | | | |
| 1.00 | 1.20 | Sa Med | 1.90 | | | 38.6 | 19.1 | 19.1 | | | 74.6 | 21.7 | 28.5 | 22.8 |
| 1.20 | 1.40 | Sa Med | 1.90 | | | 44.1 | 22.9 | 22.9 | | | 78.1 | 26.4 | 35.2 | 28.2 |
| 1.40 | 1.60 | Sa Med | 1.90 | | | 44.1 | 26.6 | 26.6 | | | 80.6 | 30.8 | 41.5 | 33.2 |
| 1.60 | 2.00 | Sa D | 2.00 | | | 44.4 | 30.4 | 30.4 | | | 84.8 | 37.4 | 51.2 | 40.5 |
| 2.00 | 2.20 | Sa D | 2.00 | | | 44.3 | 34.3 | 34.3 | | | 85.8 | 40.9 | 56.4 | 42.6 |
| 2.20 | 2.40 | Sa D | 2.00 | | | 38.6 | 38.3 | 38.3 | | | 83.6 | 40.1 | 55.2 | 42.1 |
| 2.20 | 2.40 | siSaf | 1.80 | | | 38.7 | 42.0 | 41.0 | | | 78.5 | 35.1 | 47.7 | 38.2 |
| 2.40 | 2.60 | siSaf | 1.80 | | | 38.6 | 45.5 | 42.5 | | | 76.4 | 33.4 | 45.3 | 36.2 |
| 2.60 | 2.80 | siSaf | 1.80 | | | 37.3 | 49.1 | 44.1 | | | 57.2 | 18.2 | 23.6 | 18.9 |
| 2.80 | 3.00 | siSaf | 1.80 | | | 37.8 | 52.6 | 45.6 | | | 63.2 | 22.4 | 29.5 | 23.6 |
| 3.00 | 3.20 | siSaf | 1.80 | | | 28.1 | 56.1 | 47.1 | | | 4.3 | 3.4 | 3.9 | 3.1 |
| 3.20 | 3.40 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 44.7 | 59.6 | 48.6 | | | 94.9 | 64.7 | 92.2 | 56.9 |
| 3.40 | 3.60 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 45.8 | 63.2 | 50.2 | | | 105.4 | 90.0 | 135.4 | 74.1 |
| 3.60 | 3.80 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 44.9 | 66.7 | 51.7 | | | 97.3 | 72.9 | 104.9 | 61.9 |
| 3.80 | 4.00 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 45.4 | 70.2 | 53.2 | | | 102.0 | 85.0 | 123.7 | 69.5 |
| 4.00 | 4.20 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 45.0 | 73.8 | 54.8 | | | 99.0 | 78.1 | 113.0 | 65.2 |
| 4.20 | 4.40 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 44.9 | 77.3 | 56.3 | | | 98.1 | 77.0 | 111.2 | 64.5 |
| 4.40 | 4.45 | siSaf torrskikt | 1.80 | | | 44.8 | 79.5 | 57.3 | | | 98.1 | 77.5 | 112.0 | 64.8 |

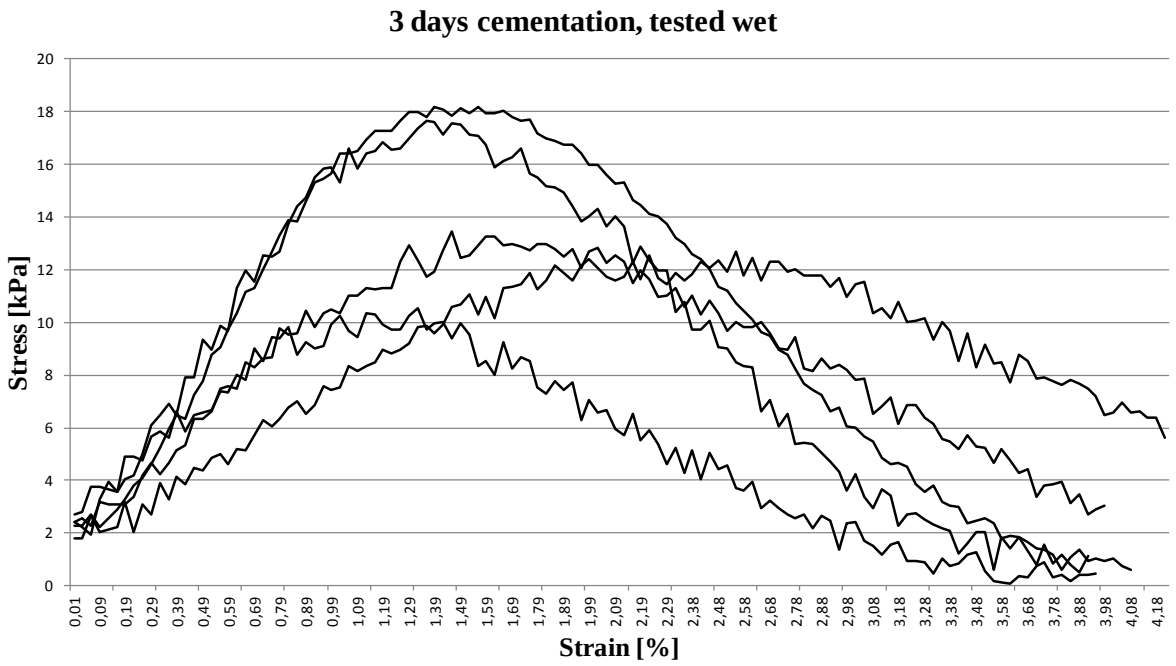
Ver: 8 | sv3k-sgp4sgt | 10174\Dokument\Geotek\Konsoln CPT120705_1ski.gpj

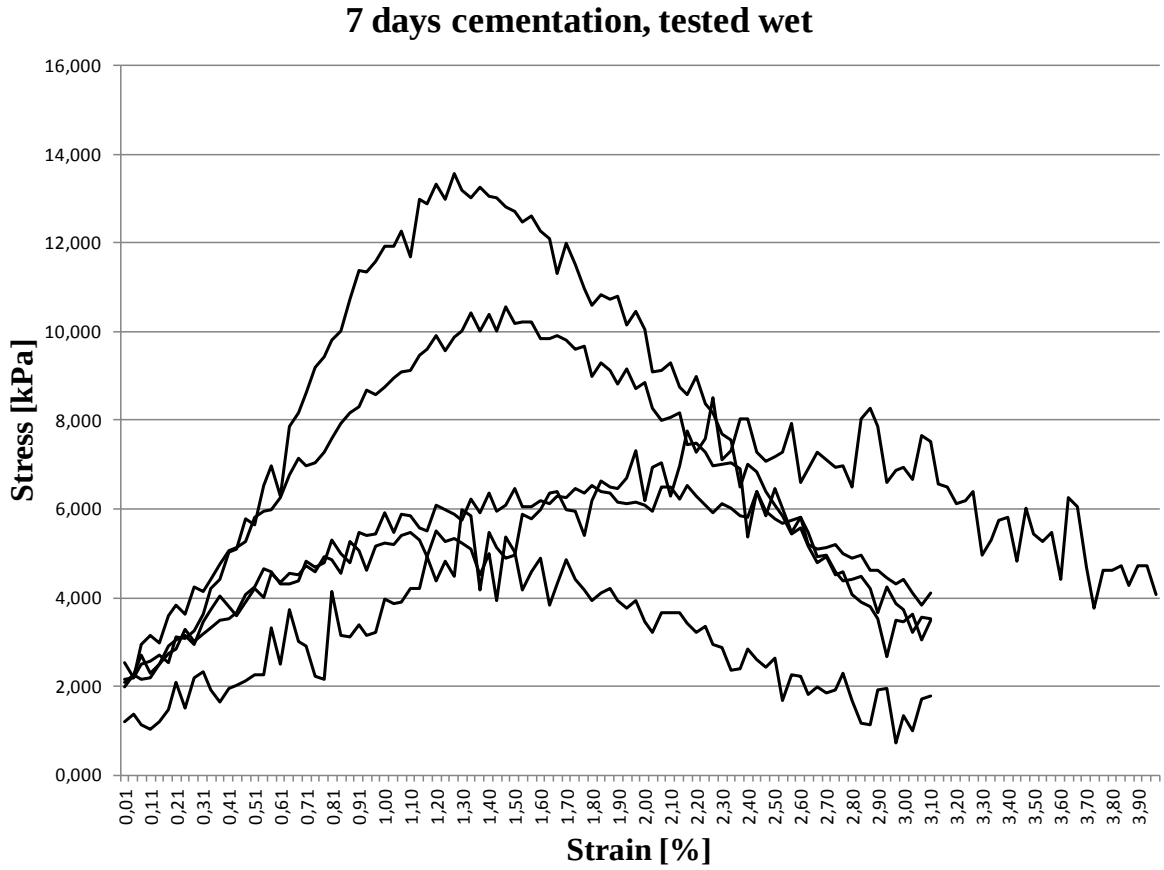
Vectura Consulting AB
Västra Varvsgatan 11, Luleå

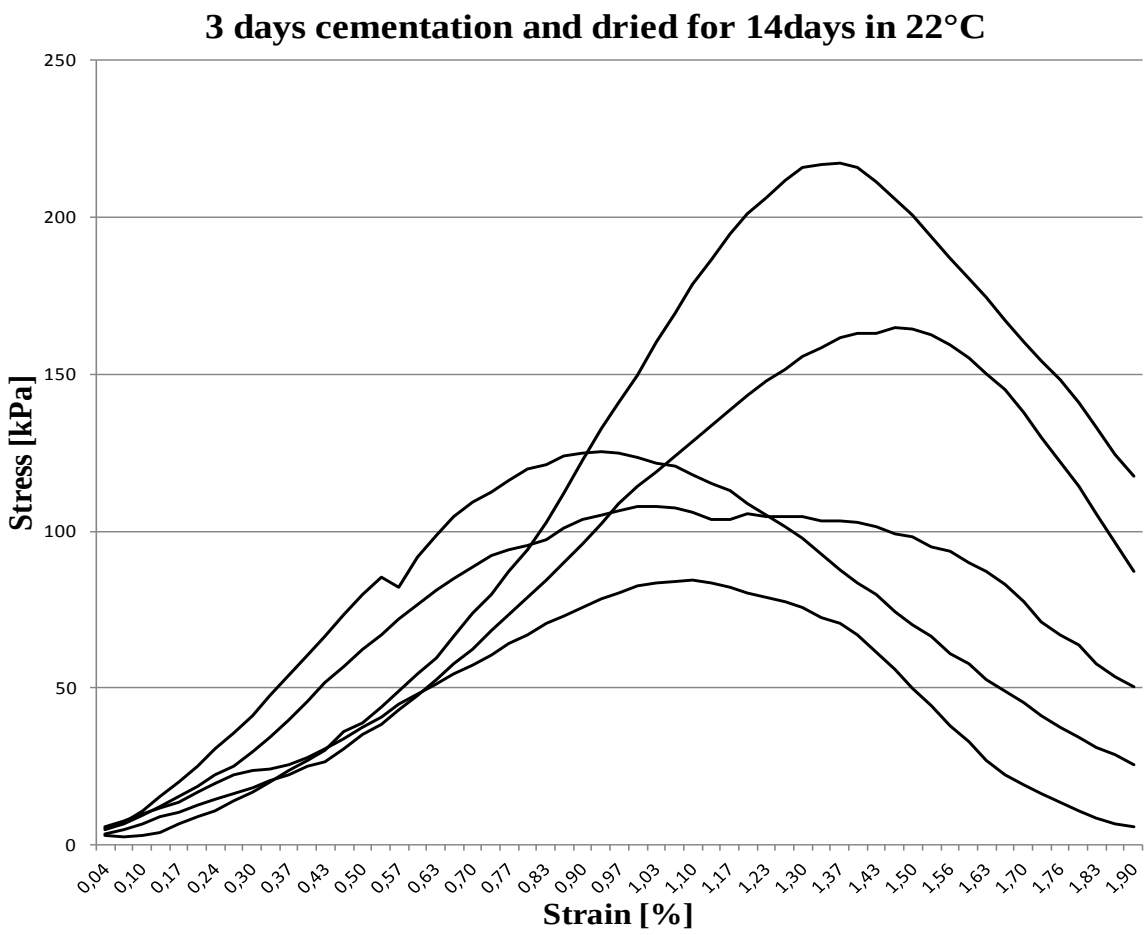
**Bilaga D: Enaxliga tryckhållfasthetstests resultat**

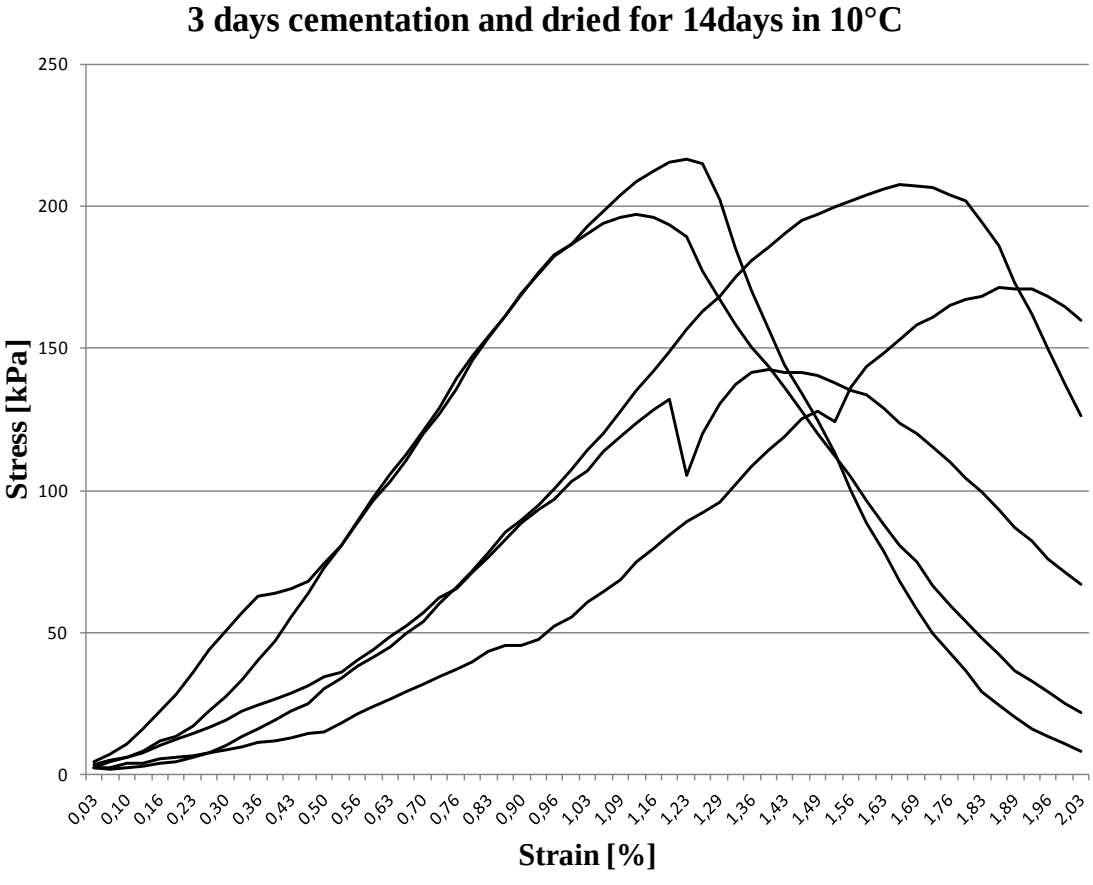


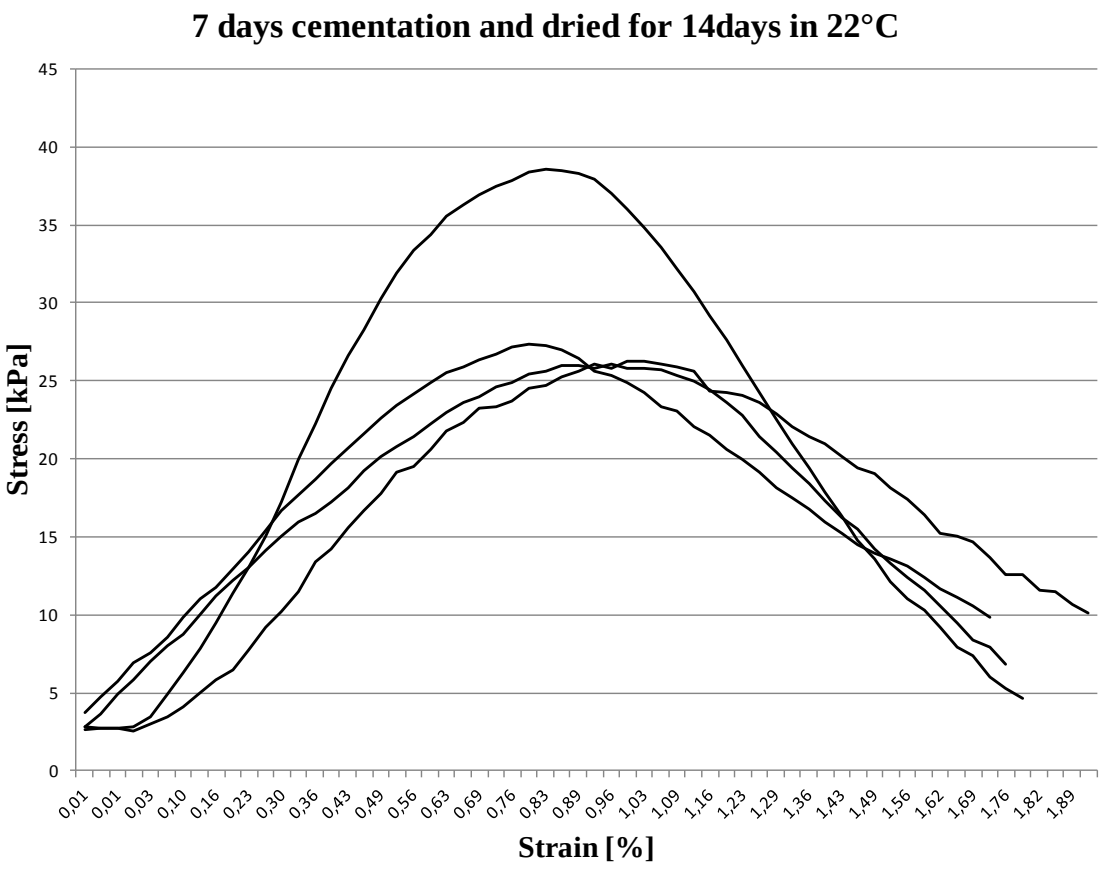



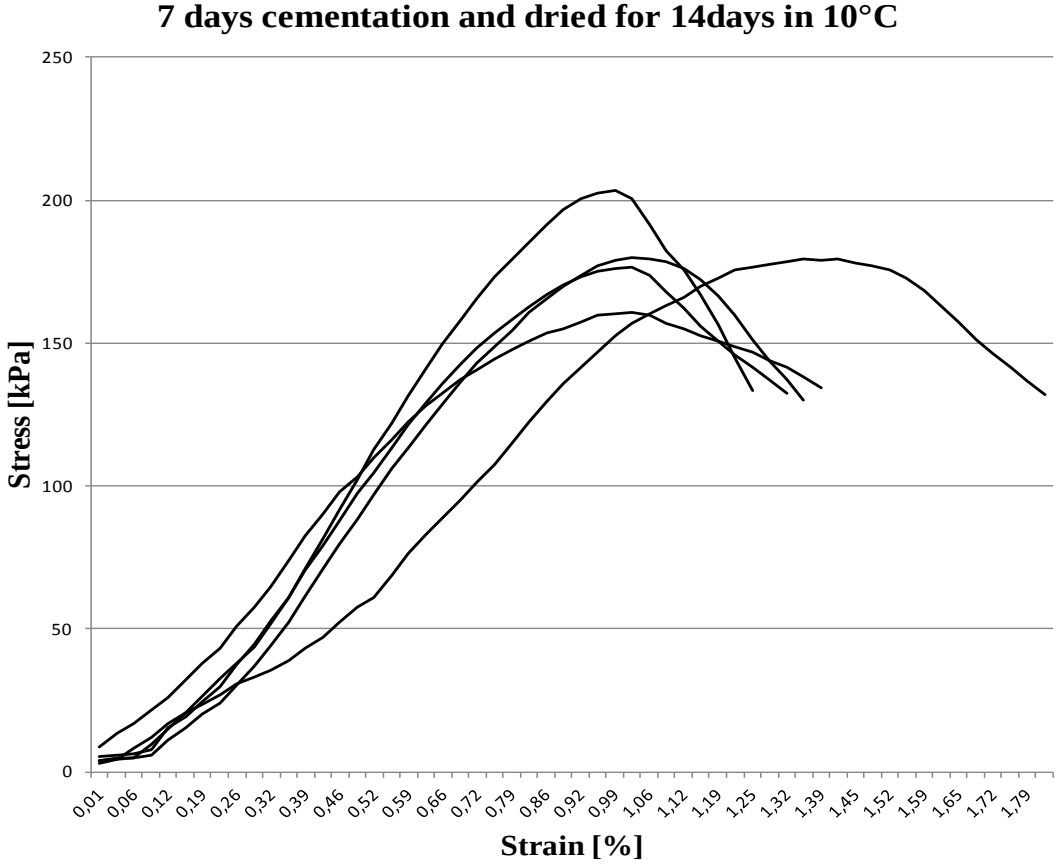

3 days cementation, tested wet
Stress [kPa]
Strain [%]

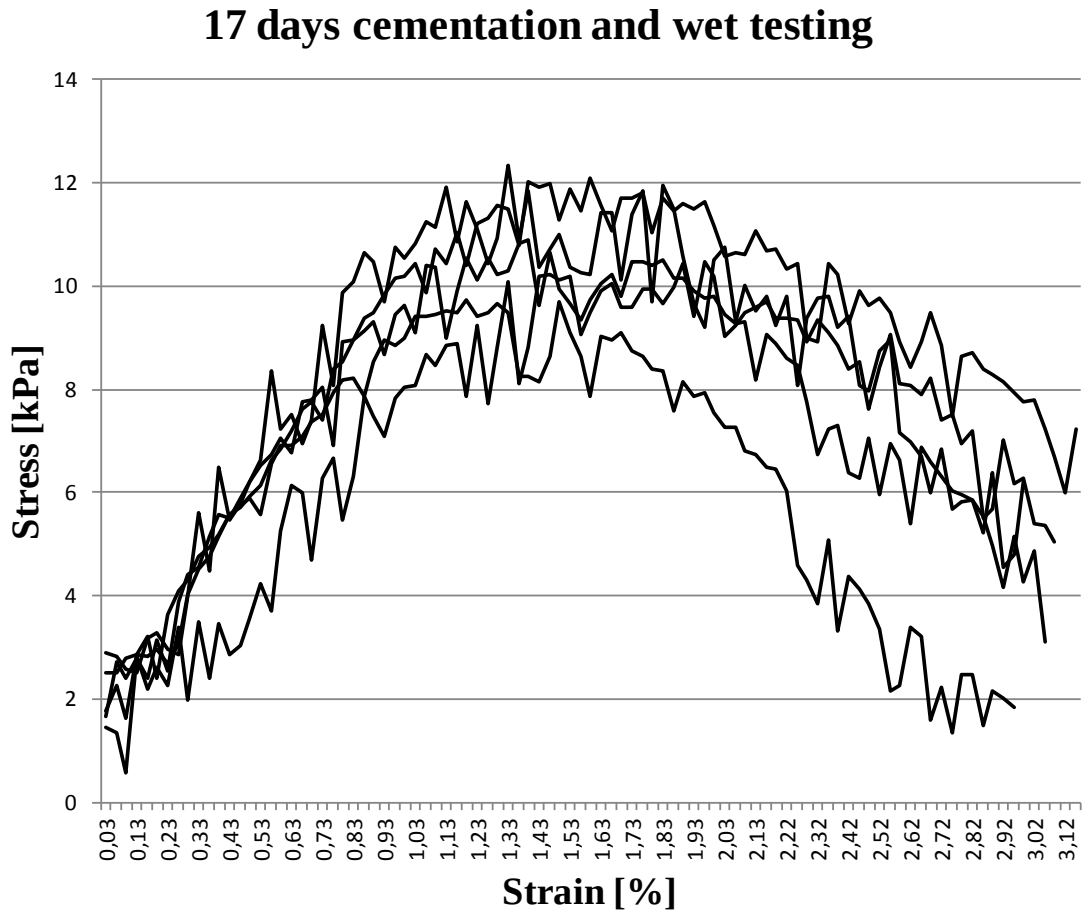

7 days cementation, tested wet
Stress [kPa]
Strain [%]

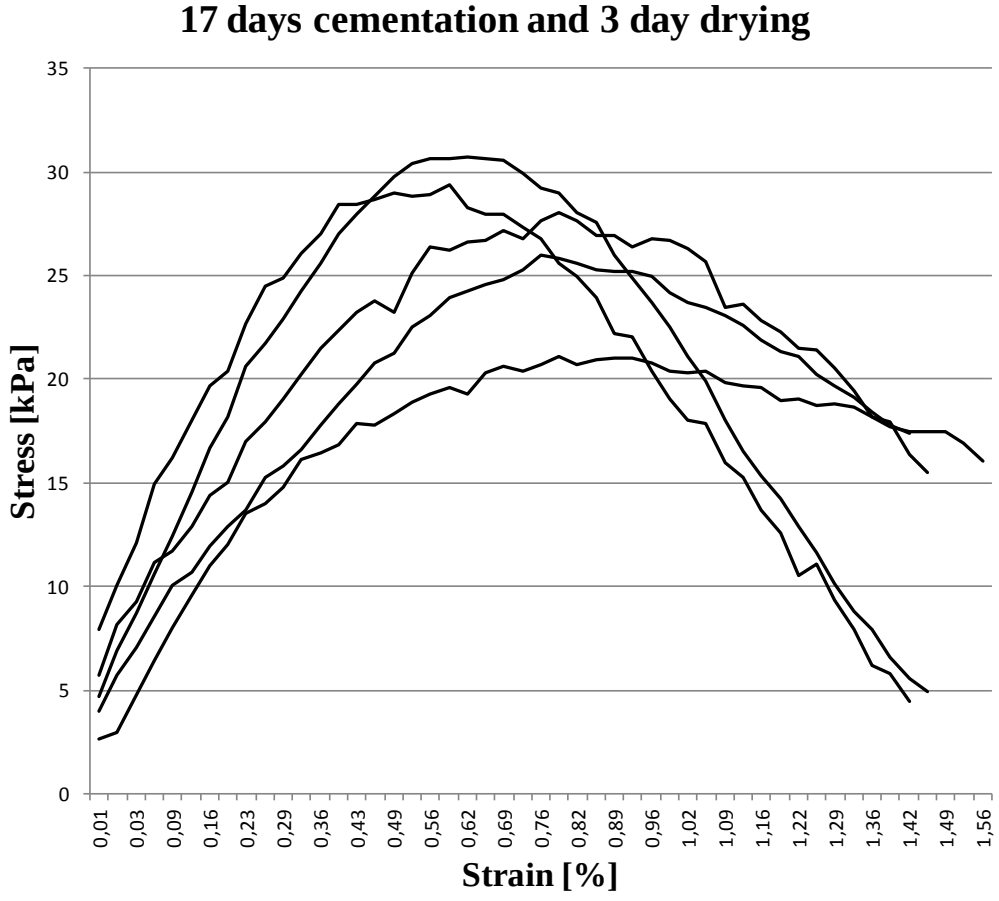

3 days cementation and dried for 14days in 22°C
Stress [kPa]
250
200
150
100
50
0
0,04 0,10 0,17 0,24 0,30 0,37 0,43 0,50 0,57 0,63 0,70 0,77 0,83 0,90 0,97 1,03 1,10 1,17 1,23 1,30 1,37 1,43 1,50 1,56 1,63 1,70 1,76 1,83 1,90
Strain [%]

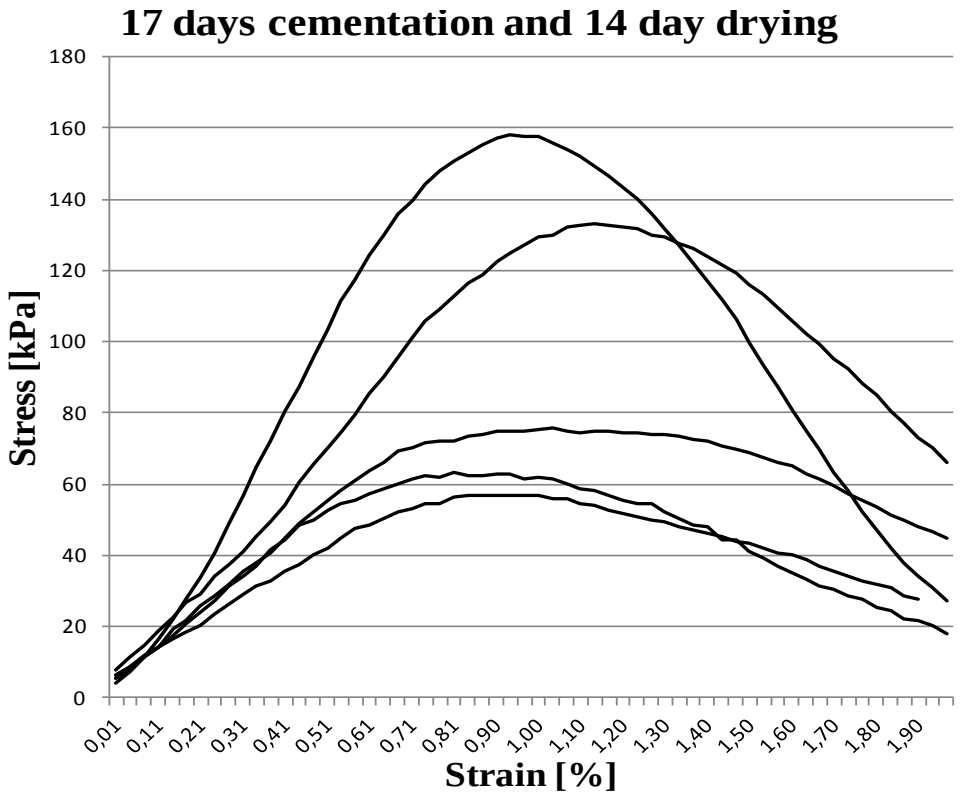

3 days cementation and dried for 14days in 10°C
Stress [kPa]
250
200
150
100
50
0
0,03 0,10 0,16 0,23 0,30 0,36 0,43 0,50 0,56 0,63 0,70 0,76 0,83 0,90 0,96 1,03 1,09 1,16 1,23 1,29 1,36 1,43 1,49 1,56 1,63 1,69 1,76 1,83 1,89 1,96 2,03
Strain [%]

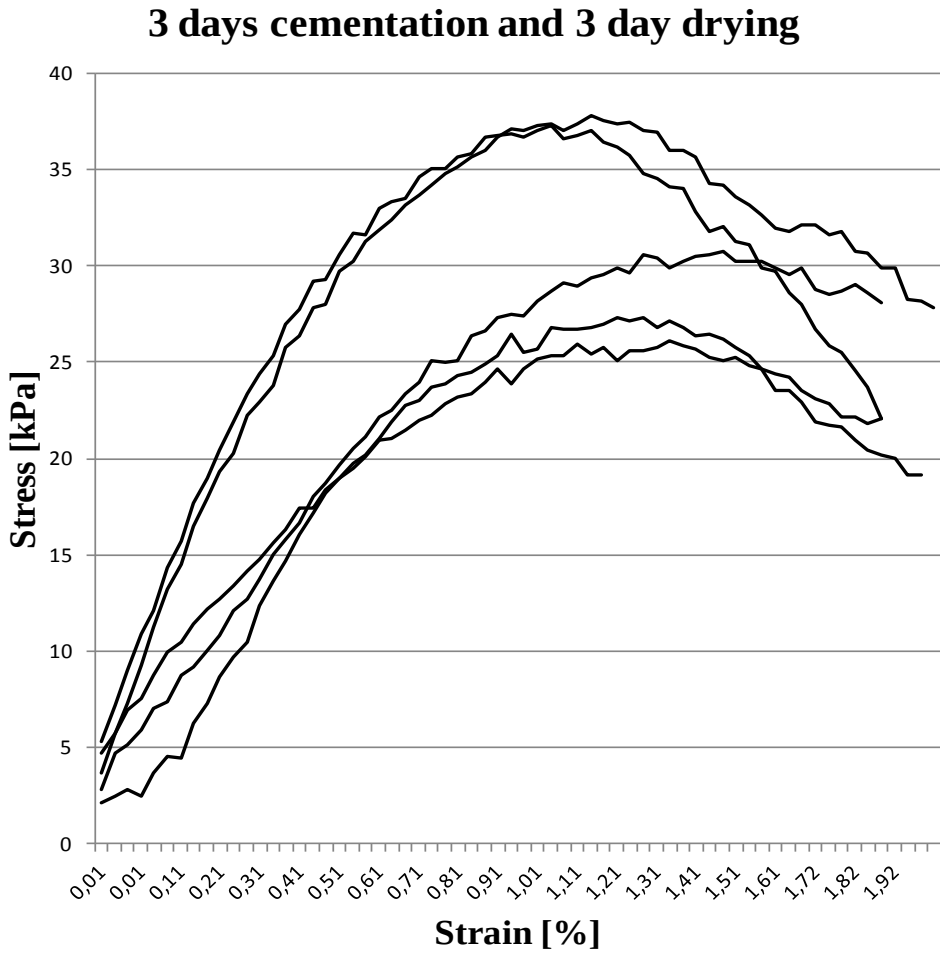

7 days cementation and dried for 14days in 22°C
Stress [kPa]
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0,01 0,01 0,03 0,10 0,16 0,23 0,30 0,36 0,43 0,49 0,56 0,63 0,69 0,76 0,83 0,89 0,96 1,03 1,09 1,16 1,23 1,29 1,36 1,43 1,49 1,56 1,62 1,69 1,76 1,82 1,89
Strain [%]

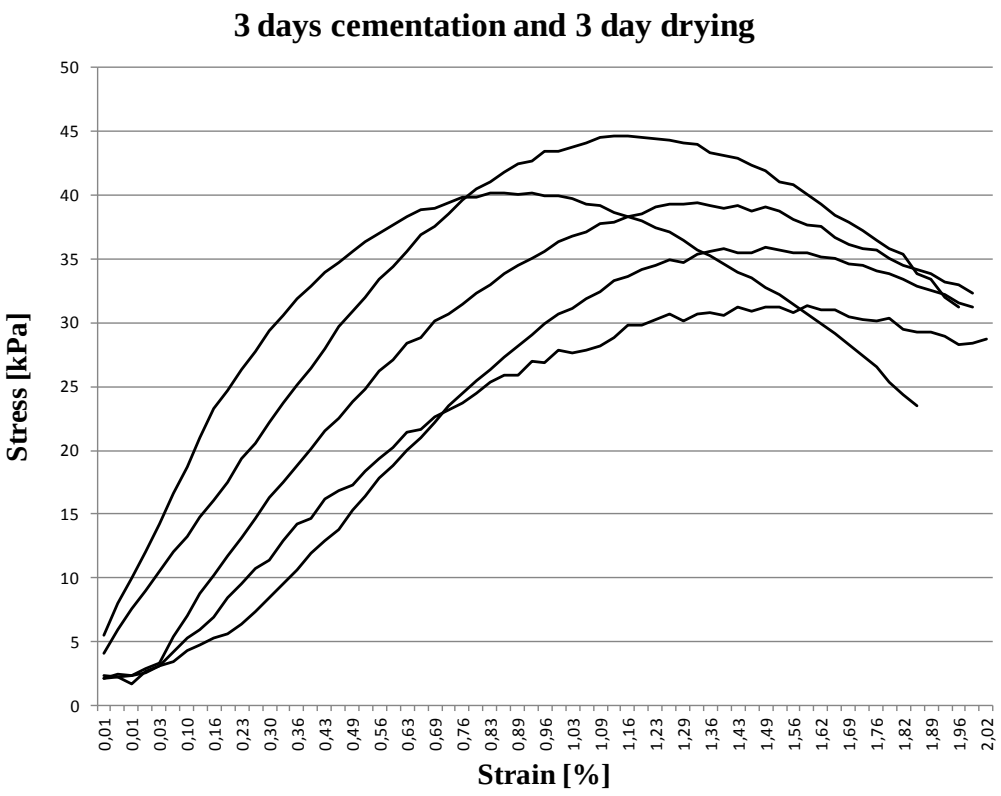

7 days cementation and dried for 14days in 10°C
Stress [kPa]
250
200
150
100
50
0
0,01 0,06 0,12 0,19 0,26 0,32 0,39 0,46 0,52 0,59 0,66 0,72 0,79 0,86 0,92 0,99 1,06 1,12 1,19 1,25 1,32 1,39 1,45 1,52 1,59 1,65 1,72 1,79
Strain [%]


17 days cementation and wet testing
Stress [kPa]
Strain [%]
0
2
4
6
8
10
12
14
0,03
0,13
0,23
0,33
0,43
0,53
0,63
0,73
0,83
0,93
1,03
1,13
1,23
1,33
1,43
1,53
1,63
1,73
1,83
1,93
2,03
2,13
2,22
2,32
2,42
2,52
2,62
2,72
2,82
2,92
3,02
3,12


17 days cementation and 3 day drying
Stress [kPa]
Strain [%]
0
5
10
15
20
25
30
35
0,01
0,03
0,09
0,16
0,23
0,29
0,36
0,43
0,49
0,56
0,62
0,69
0,76
0,82
0,89
0,96
1,02
1,09
1,16
1,22
1,29
1,36
1,42
1,49
1,56


17 days cementation and 14 day drying
Stress [kPa]
Strain [%]
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
0,01
0,11
0,21
0,31
0,41
0,51
0,61
0,71
0,81
0,90
1,00
1,10
1,20
1,30
1,40
1,50
1,60
1,70
1,80
1,90


3 days cementation and 3 day drying
Stress [kPa]
Strain [%]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
0,01
0,01
0,11
0,21
0,31
0,41
0,51
0,61
0,71
0,81
0,91
1,01
1,11
1,21
1,31
1,41
1,51
1,61
1,72
1,82
1,92


3 days cementation and 3 day drying
Stress [kPa]
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0,01
0,01
0,03
0,10
0,16
0,23
0,30
0,36
0,43
0,49
0,56
0,63
0,69
0,76
0,83
0,89
0,96
1,03
1,09
1,16
1,23
1,29
1,36
1,43
1,49
1,56
1,62
1,69
1,76
1,82
1,89
1,96
2,02
Strain [%]

## Bilaga E: Bilder från den visuella bedömningen av hållfasthetstillväxten i försöket med pelaren

**Figur E1:** Utgrävning för att utvärdera det avsedda skapandet av en kolumn. Den runda gropen i botten av figuren är samma grop som i figur 3.13.

**Figur E2:** När grundvattennivån nåddes, började en vit vätska fylla gropen. Detta antas vara överskottsvätskan från CIPS vilken har varit kvar in situ .

**Figur E3:** En träpinne har placerats i hålet för injekteringen för att lätt kunna lokalisera det cementerade området. Den behandlade sanden har ökat i styrka och är synliga runt botten av pinnen

**Figur E4:** En närbild av figur 3.17. Volymen under den horisontella sprickan har samlats och tas in för visning.

**Figur E5:** Avlägsnandet av den cementerade sanden volym som har förts in för visning.

**Figur E6:** Efter avlägsnandet av den volym som anges i fig. 3.18 och 3.19. Det är fortfarande uppenbart att en hel del sand i denna figur har bildat ett cementering.