



Kvalitetskontroll av kalkcementpelare

Behovsstudie för metodutveckling, sammanställd från litteratur och intervjuer

Stefani Maždin

Avdelningen för Teknisk Geologi
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet

MSc Thesis, 30 HP

ISRN LUTVDG/(TVTG-5165)/1-44/(2020)



Kvalitetskontroll av kalkcementpelare

Behovsstudie för metodutveckling, sammanställd från litteratur och intervjuer

EXAMENSARBETE INOM TEKNISK GEOLOGI

AVANCERAD NIVÅ 30 HP

CIVILINGENJÖRSUTBILDNING I VÄG- OCH VATTENBYGGNAD

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA, LUNDS UNIVERSITET

Titel: Kvalitetskontroll av kalkcementpelare - behovsstudie för metodutveckling, sammanställd från litteratur och intervjuer

Författare: Stefani Maždin

Publicationsår: 2020

Huvudhandledare: Per-Ivar Olsson, Lunds Universitet

Biträdande handledare: Mikael Lumetzberger, Lunds Universitet

Extern handledare: Anders Bergström, NCC

Examinator: Nils Rydén, Lunds Universitet

ISRN: LUTVDG/(TVTG-5165)/1-44/(2020)

Förord

Examensarbetet är en behovsstudie med uppdrag att sammanställa metoder för kvalitetskontroll av kc-pelare och utvärdera om det finns behov av att vidareutveckla dessa eller nya metoder. Det väsentliga motivet är att få en heltäckande uppfattning om branschens syn på behovet av metodutveckling. Bakgrunden är det forskningsprojekt som bedrivs på avdelningen Teknisk geologi vid Lunds tekniska högskola med syfte att utveckla metoder för kvalitetskontroll av markstabilisering med hjälp av elektrisk resistivitetsmätning, ASSERT. Examensarbetet är ett självständigt arbete som skrivs för Teknisk geologi med extern placering för informationsinhämtning hos NCC AB, en av ASSERTs medfinansiärer. Arbetet är utfört våren 2020 som avslutande kurs i utbildningen till civilingenjör i väg- och vattenbyggnad på Lunds tekniska högskola, Lunds universitet.

Författaren riktar stora tack till alla de som bidragit till exemensarbetet:

Tack till handledarna: Per-Ivar Olsson, LTH, Mikael Lumetzberger, LTH och Anders Bergström, NCC;

Tack till NCC Geo & Mark, Göteborg, för extern placering;

Tack till de intervjuade, vars kunskap utgör en stor del av rapporten;

Tack också till er som svarat på frågor och varit behjälpliga under arbetet.

Detta arbete tillägnas Ronald.

Sammanfattning

Kvaliteten på kalkcementpelare, kc-pelare, varierar ofta. Det är vid design- och tillverkningsprocess svårt att säkerställa den slutliga kvaliteten och egenskaperna kan vara olika inom och mellan pelare. Den stabiliserade jordens geologiska förhållanden inverkar, liksom bindemedel och tillverkningsförfarande. I Sverige är kc-pelare en vanlig förstärkningsmetod i stora infrastrukturprojekt och det finns behov av att kunna verifiera att tekniska krav uppnås. Kc-pelare är komplexa och flera egenskaper kan vara intressanta att kvalitetsgranska beroende på förstärkningens funktion; odränerad skjuvhållfasthet är den mest eftersökta. Metoderna för kontroll har utvecklats under längre tid och i takt med att pelarna uppnår allt högre hållfastheter blir standardiserade metoder som kalkpelarsondering svåra att utföra. Tillverkning av stora volymer pelare kräver också att kontrollmetoderna är smidiga att utföra. I denna text presenteras en genomgång av tekniska egenskaper hos kc-pelare som kan vara intressanta att kontrollera och metoder för att kontrollera dessa. Metoderna är både förstörande och ickeförstörande, utförs på hela eller delar av pelare, i fält eller på labb. För att ge en mer heltäckande bild av branschens syn på kontrollmetoder har, förutom litteraturstudie, intervjuer utförts med geotekniker och kc-pelartillverkare, där erfarenheter från tillverkning och kontroll av pelarna samt önskemål om kontrollmetodernas vidareutveckling framkommer. Resultatet av sammanställningen visar att det finns ett behov av att bättre kunna kontrollera pelarnas kvalitet. Heltäckande metoder saknas och flera kontroller måste ofta utföras parallellt. Ingen helt tillfredsställande metod finns för att ta fram skjuvhållfastheten. Nyare metoder för utvärdering av bindemedlets hydratation med temperatur- och elektrisk resistivitetsmätning kan indikera pelarens axiella hållfasthetsfördelning.

Abstract

The quality of lime-cement columns, LC-columns, varies within and between the columns. The final quality can not easily be predicted in the design or construction phases due to the influence not only by binder attributes but also the geological properties of employed soil and the construction procedure itself. Ground improvement by LC-columns is commonly used in Swedish infrastructure projects and reliable quality assurance is required. Unconfined shear strength is the most demanded technical property to evaluate. Quality control methods have been developed for many years and the need is still evident. Column strengths are increasing, exceeding the capacities of traditional methods like soundings and large column quantities require easily applicable methods. This paper presents several methods to assess the quality of technical properties in LC-columns that might be of interest to evaluate: destructive and non-destructive methods, methods to investigate entire or sections of columns and methods to be performed in situ or at the laboratory. Interviews with geotechnical engineers and LC-column production experts are presented alongside literature reviews for comprehensive understanding of the industry needs in terms of quality assessment method developments. Resulting conclusions are that quality evaluation methods require improvements. Full methods, particularly for shear strength assessment, are requested; today quality control methods are often combined to cover shortcomings of individual methods. Recent temperature and electrical resistivity tomography methods for binder hydration degree assessment might be helpful in column axial strength distribution evaluation.

Innehåll

Förord	I
Sammanfattning	II
Abstract	III
Förkortningsförteckning	VI
1 Inledning.....	1
1.1 Mål och syfte	1
1.2 Metod.....	1
1.3 Avgränsningar	2
2 Teoretisk introduktion.....	2
2.1 Djupstabilisering.....	2
2.2 Kalkcementpelare	2
2.3 Bindemedel	6
2.4 Pelaregenskaper	7
2.4.1 Homogenitet	7
2.4.2 Permeabilitet.....	8
2.4.3 Hållfasthet	8
2.4.4 Beständighet	9
3 Kontrollmetoder för kc-pelare	10
3.1 Sondering.....	10
3.1.1 Kalkpelarsondering, KPS	11
3.1.2 Förborrad kalkpelarsondering, FKPS.....	11
3.1.3 Förinstallerad omvänd pelarsondering, FOPS	12
3.1.4 Jord-berg totalsondering.....	12
3.1.5 Cone penetration test, CPT.....	13
3.2 Belastningstest	14
3.3 Materialtest och okulärbesiktning	15
3.3.1 Labbtest	15
3.3.2 Kärnbörning	16
3.3.3 Framschaktning och upptagning	17
3.3.4 Packer test	18
3.4 Geofysik.....	18
3.4.1 Seismik	19
3.4.2 Elektrisk resistivitetstomografi, ERT	20
3.4.3 Temperaturmätning	21

4	Intervjuer.....	23
5	Diskussion och slutsatser	29
6	Rekommendationer	30
	Referenslista	31

Förkortningsförteckning

CH	<i>kalciumhydroxid</i> , släckt kalk, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produkten från kalkbindemedlets reaktion med vatten
CSH	<i>kalciumsilikathydrat</i> , $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, bindemedlets lastbärande produkt från reaktionen mellan kalciumhydroxid och kiseldioxid, SiO_2
DSM	<i>Deep soil mixing</i> , djupstabilisering, stabilisering av lös jord på 10-20 meters djup
FFR	<i>free-free resonance testing</i> , seismisk metod med vibrationsmätning i materialprov på labb
FKPS	<i>Förborrad kalkpelarsondering</i> , kontrollmetod, förborring genom pelaren leder sonden i syfte att motverka utstyrning
FOPS	<i>Förinstallerad omvänd kalkpelarsondering</i> , kontrollmetod, sonden installeras under pelaren i samband med pelartillverkning och dras uppåt i syfte att motverka sondutstyrning
Kc-pelare	<i>Kalkcementpelare</i> , jordförstärkning tillverkad genom inblandning av bindemedel i jorden
KPS	<i>Kalkpelarsondering</i> , kontrollmetod, genom sondering tas pelarens odränerade skjuvhållfasthet fram
MDM	<i>Modified dry mixing</i> , metod för tillverkning av kc-pelare med torrt bindemedel och tillsats av vatten vid behov

1 Inledning

1.1 Mål och syfte

Kontroll och uppföljning av kc-pelare är viktigt (SGF:s Jordförstärkningskommitté, 2005) och behovet av förbättrade kontrollmetoder för djupstabilisering har lyfts vid flertalet tillfällen (Karlsson, et al., 2001; Holm, 2002; Dannewitz & Rydell, 2003). Det är oklart om det i dagsläget finns metoder som på ett tillfredsställande sätt ger information om kc-pelarens kvalitet. Utifrån vilken egenskap man eftersträvar att kontrollera fungerar dagens metoder olika bra.

Målet med arbetet är att, från olika delar av branschen, sammanställa kunskap om kc-pelare och dess kontrollmetoder som kan vara relevant i ett underlag till utvärdering av behovet av fortsatt metodutveckling för kvalitetskontroll av kc-pelare.

Syftet är att öka förståelsen för hur kontrollmetoderna kan förbättras och var fokus bör ligga för fortsatt metodutveckling av kc-pelares kvalitetskontroll.

1.2 Metod

Informationsinhämtningen utgörs av två delar. Den första delen är en litteraturstudie inriktad på forskning och praktisk erfarenhet från djupstabilisering med kc-pelare främst i Sverige. En stor del av litteraturen är utgiven av Statens geotekniska institut under satsningen Svensk Djupstabilisering perioden 1995-2006; ett centrum för forskning och utveckling av djupstabilisering med kc-pelare med rapporter och arbetsrapporter från Sverige och konferensartiklar från hela världen. Perspektivet gäller främst svensk tillämpning. Litteratur från andra källor förekommer, från Sverige och utomlands. I kapitlet *Teoretisk introduktion* beskrivs generella förutsättningar för djupstabilisering med kc-pelare. I kapitlet *Kontrollmetoder för kc-pelare* listas några vanliga metoder för kvalitetskontroll med tillämpningsområden, styrkor och svagheter utifrån forskning och erfarenheter.

Den andra delen, kapitlet *Intervjuer*, består av intervjuer med personer i branschen med särskild kunskap om kc-pelare. Intervjuer som metod för informationsinhämtning har valts för att tillvarata de eventuella erfarenheter som ej lyfts i litteraturen och för att få perspektiv från olika sidor av branschen. Sex personer har intervjuats, de är ägare av entreprenörsfirmor med lång erfarenhet av att tillverka kc-pelare och geotekniska specialister med erfarenhet från produktion, forskning och beställarrollen. Då syftet med intervjuerna är att erhålla ett brett perspektiv är intervjufrågorna relativt allmänna, så att den intervjuade inte påverkas i någon riktning utan kan svara utifrån egna tankar och erfarenheter om metoderna och subjektiva önskemål om förbättring. Varje person har intervjuats enskilt och frågorna har givits i förväg. För möjlighet att möta specifika argument som framkommit i andra intervjuer tas i vissa fall dessa argument upp som intervjufrågor. Vilka frågor som ställts under respektive intervju framkommer i inledningen av varje intervju, där även den intervjuades bakgrund inom området presenteras. Intervjuerna har genomförts under extern placering hos NCC Geo & Mark i Göteborg med tillgång till Västlänken Centralens projektkontor. Västlänken är en tåg tunnel under centrala Göteborg i byggskede med Trafikverket som beställare. NCC är huvudentreprenör på deletapp Centralen, där stora mängder kc-pelare används och omfattande kvalitetskontroll utförs.

Följande frågor har ställts:

- *Vad anser du om dagens metoder för kvalitetskontroll; har de brister, behöver de förbättras och i så fall hur?*

Specifikt till kc-tillverkare, förutom ovanstående:

- *Anser du att tillverkningsprocessen inverkar på pelarens kvalitet?*
- *Tror du att neddrivningsarbetet inverkar på pelarens kvalitet?*

1.3 Avgränsningar

- Dimensioneringsmetoder och deras antaganden och inverkan på pelarkvaliteten tas inte upp.
- Tolkning av mätdata begränsas till att avgöra om datan är användbar för kvalitetsutvärdering, inte själva analysförfarandet.
- Datasimuleringar tas ej upp, endast metoder som mäter kvaliteten i det fysiska materialet behandlas.
- Metoder som inte verkar användas eller som har visats inte fungera som tänkt, och därmed inte ingår bland dagens kontrollmetoder, tas inte upp.

2 Teoretisk introduktion

2.1 Djupstabilisering

Djupstabilisering, deep soil mixing - DSM, innebär att lös jord stabiliseras på djupet med pelare tillverkade direkt i jorden och på större djup än masstabilisering, 10-20 meter. Stabilisering och sättningsbegränsning av väg- och järnvägsbankar är vanliga tillämpningsområden i Sverige. Pelarna kan även användas till sättningsbegränsning av byggnader och broar; stabilisering av schakter, slänter och potentiella skredmassor; kontroll av rörelser i marken och upptagning av vibrationer från tågbankar (Larsson, 2006). Metoden går att anpassa efter rådande markförhållanden och önskad effekt genom val av pelarnas mönster, dimensioner och bindemedelstyp och -mängd. Kalkcementpelare anses fungera *utmärkt* i lös lera och *bra* i organisk jord, silt och lös sand (SGF:s Jordförstärkningskommitté, 2003).

Masstabilisering innebär att en hel jordmassa stabiliseras som alternativ till utskiftning av jord med dålig byggteknisk kvalitet, exempelvis torv (Larsson, 2006). Masstabiliseringen är uppemot några meter i mäktighet och installeras med andra metoder än för kc-pelare vid djupstabilisering.

2.2 Kalkcementpelare

Kalkcementpelare, *kc-pelare*, används till att förstärka jorden att klara större påfrestningar genom inblandning av bindemedel direkt i jorden i en pelarform. Kc-pelare kan tillverkas med torrmetod, våtmetod eller en kombination, MDM, *modified dry mixing*. I torrmetoden sker inblandningen av bindemedel genom distribution av torrt bindemedel med hjälp av tryckluft

och i våtmetoden används en slurry bestående av bindemedel utblandat i vatten. Den valda metoden beror främst på jordens egenskaper, en lös lera med högt vatteninnehåll stabiliseras företrädesvis med torr metod medan en jord med lågt vatteninnehåll har bäst förutsättningar med en slurry (Keller). Användningen av slurry ger mer homogena pelare som uppnår högre hållfastheter än pelare tillverkade med torrt bindemedel. MDM är närmast en utveckling av torrmetoden med tillägg av vatten vid behov. Metoden lämpar sig för hårdare och torrare jordar och ger homogenera pelare än torrmetoden (Eriksson, et al., 2005). Torrmetoden är vanligast i Sverige.

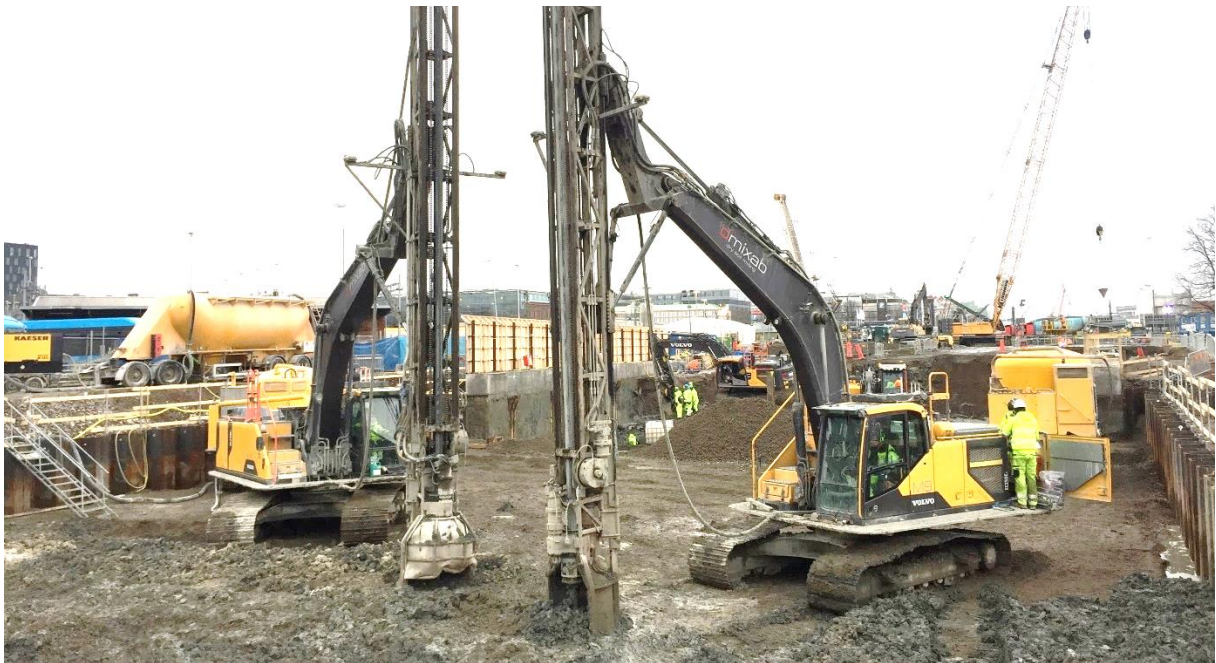
Pelarinstitutionen utförs med ett torn med en borrhör monterad på en grävmaskin eller liknande, se Figur 1. Borrhören, se Figur 2, matas ned i jorden och på uppnått djup dras den tillbaka samtidigt som bindemedel matas ut genom borrhörverkyget, fördelas och inblandas mekaniskt i jorden så att en cylindrisk pelare bildas, se Figur 3. Det finns olika blandverktyg beroende på jord, bindemedel och pelardiameter. Pelarna kan förankras i underliggande bergyta eller stå helt och hållet i den lösa jorden. Det finns ett fåtal entreprenörer i Sverige som utför kc-pelare, däribland Dmixab och Soil Mixing Group.

Att inblandning av bindemedel i jorden sker på korrekt sätt är av stor vikt. När bindemedel tillsätts jorden med torrmetoden innehåller den luft och för att inte agglomerat som uppstår när bindemedelspartiklarna kommer i kontakt med jordens vatten ska innesluta luften då de kemiska processerna inleds, måste massan bearbetas mekaniskt så att aggregaten bryts, helst med blandverktyg som tillför tryck- och skjuvspänningar (Larsson, 2000). En otillfredsställande blandning kan leda till att områden i pelaren blir ostabiliserade och att andra områden består av oreagerat bindemedel, det vill säga pelaren blir heterogen. Försök (Larsson, et al., 2005) har visat att trots noggrant och likvärdigt utfört installationsarbete kan kvaliteten mellan pelare variera. En stor mängd data om borrhörens arbete och bindemedelsutmatning loggas i kc-pelarmaskinen.

Trafikverket ställer i det tekniska kravdokumentet för geokonstruktion TK Geo 13 krav på blandverktygets utformning, borrhörens rotationshastighet, med antal varv per minut, och *blade rotation number*, med antal varv per meter stigning, där antal varv är en funktion av antal blad på blandverktyget, enligt Europastandard SS-EN 14679 (59) (Trafikverket, 2014). Krav ställs inte på installationsarbetet under nedstigning, man gör inte heller distinktion av installationsförfarandet mellan torr- och våt metod (Trafikverket, 2014). Sveriges geotekniska instituts Rapport 17 (Larsson, 2006) tillämpas också som vägledande dokument för kc-pelare.

Pelarna förekommer enskilt, i skivor (sammanhängande rader), i gitter (mönster av rader och/eller enskilda pelare) och i block (täta, sammanhängande system), se Figur 4. Intelliganda pelare tillverkas med överlappning för att säkerställa kontinuiteten och samverkan i konstruktionen. Vanligt förekommande diametrar på pelare tillverkade med torrmetod är 600, 700 och ibland 800 mm, med våtmetod 400-2400 mm (Keller).

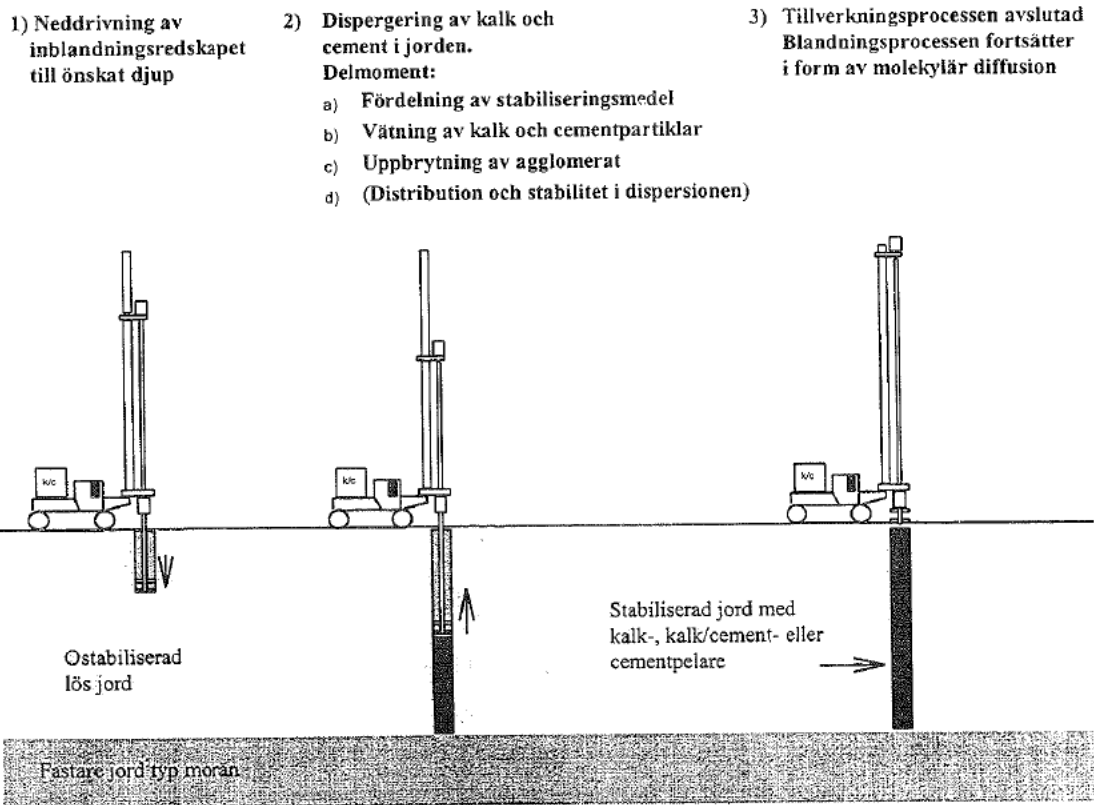
Pelarna har utvecklats över tid. Användningen av kalkpelare till förstärkning av lösa oorganiska jordar inleddes på 70-talet, kom att utvecklas till att innefatta även cementpelare och övergick därefter i kalkcementpelare, som nu är gängse pelartyp vid djupstabilisering av lösa jordar (Åhnberg, et al., 1995). Djupstabilisering med kc-pelare är en vanlig metod på några platser runtom i världen. Utvecklingen i Japan skedde parallellt med Sverige på 70-talet. I Norge är våtmetoden utbredd då man har andra geologiska förhållanden än i Sverige, även i USA är våtmetoden vanlig.



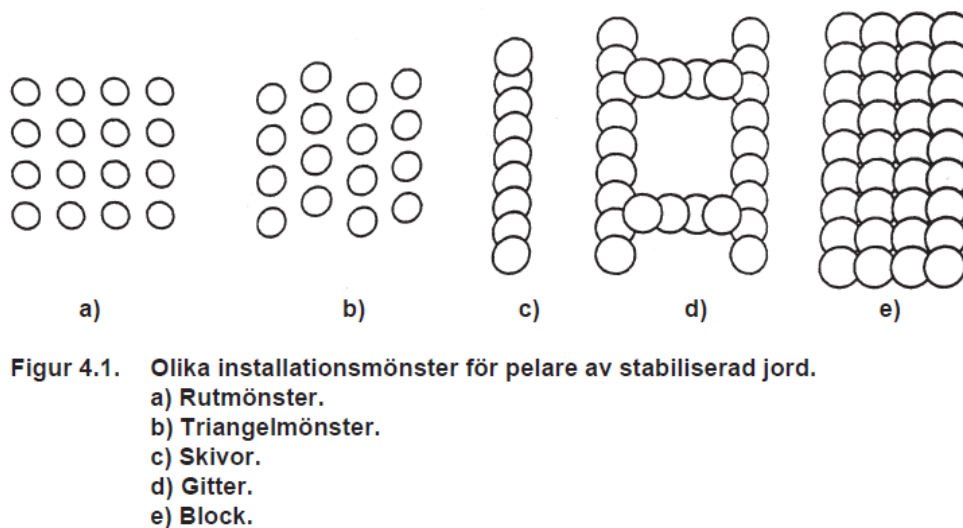
Figur 1: Kc-pelarmaskiner på Västlänken Centralen, med tank för torrt bindemedel i bakgrunden.



Figur 2: En väl använd pinnborr, verktyget som blandar ut det torra bindemedlet i jorden.



Figur 3: Kalkcementpelarens tillverkningsprocess. Bild från Larsson (2000).



Figur 4.1. Olika installationsmönster för pelare av stabiliserad jord.

Figur 4: Skiss över olika slags pelaruppställning. Bild från Larsson (2006).

2.3 Bindemedel

Den lösa jorden stabiliseras med inblandat bindemedel som härdar under kemisk reaktion med jorden. Bindemedel tillförs i form av pulver eller en slurry, bindemedel utblandat i vatten. En kombination av kalk och cement är det vanligst förekommande bindemedlet i svenska pelare (Larsson, 2006). Förhållandet mellan kalk och cement i blandningen kan variera, en vanlig blandning är runt 50% kalk och 50% cement, noterat 50/50. Bindemedelshalt per kubikmeter stabiliserad jord betecknas 80 kg/m^3 eller exempelvis 50/80 kg/m^3 för pelare med två olika hållfastheter över djupet.

Kalk som bindemedel utgörs av bränd kalksten, CaO. Denna reagerar i kontakt med vatten och bildar starkt basisk kalciumhydroxid, släckt kalk, Ca(OH)_2 , förkortat CH, i en volymvidgande och starkt exoterm, värmeavgivande, reaktion. Puzzolanska bindemedel som CH kan ej självmant reagera med vatten och måste aktiveras, till exempel genom tillsats av kiseldioxid, SiO_2 , varpå det lastbärande kalciumsilikathydratet, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, förkortat CSH, bildas (Fagerlund, 1999). Kisel- och aluminiummineral finns ofta i jorden och bidrar till att aktivera CH (Åhnberg, et al., 1995). Portlandcement är den cementtyp som normalt används i Sverige. Det innehåller främst kalciumsilikaterna alit och belit ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ och $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) som i reaktion med vatten bildar CH och CSH; med tillräcklig tillgång på SiO_2 förbrukas CH och allt reagerat bindemedel utvecklas med tiden till CSH (Fagerlund, 1999).

Hydratationsgraden anger hur stor del av bindemedlet som reagerat med vatten, det vill säga hur långt bindemedlets härdningsprocess utvecklats. Vid för låg tillgång på blandvatten kan hydratationen inte utvecklas fullständigt och blandningen kommer innehålla oreagerade bindemedelspartiklar som inte bidrar till hållfasthetsökningen (Fagerlund, 1999). Det är vid bindemedlets tillstyvnande som hållfasthetsutvecklingen sker och det stora hållfasthetsbidraget i cement sker under dygn 3-28 (Burström, 2007). Hållfasthetsutvecklingen hos bindemedel av ren kalk är initialt långsam jämfört med cement men kan över tid uppnå högre hållfasthet, med undantag för inblandning i kvicklera och högsaltig lera där hållfasthetsutvecklingen är snabb första veckan (Åhnberg, et al., 1995).

Reaktionshastigheten påverkas av temperaturen, ju högre temperatur desto snabbare reaktion. I rumstemperatur börjar cementets tillstyvnande efter ungefär fyra timmar (Fagerlund, 1999). Släckningen av kalk i ett kalkcementbindemedel ger en värmeutveckling som gynnar de puzzolana reaktionerna i cementet och höjer cementets reaktionshastighet (Åhnberg, et al., 1995). Typ och mängd av bindemedel och pelarnas mönster i förhållande till varandra påverkar vilken värmeutveckling och därmed härdningshastighet som uppnås. Detta kan vara en viktig aspekt vid kontroll av pelare i anslutning till produktionen eftersom pelare tenderar att snabbt bli hårda och svårtestade.

Även jordens egenskaper påverkar den stabiliserade jordens egenskaper. Exempelvis har silthaltig lera förutsättningar för god stabiliseringseffekt i motsats till gyttja som är svårstabiliserad (Haglund & Nilsson, 2001). Med ren kalk ses god hållfasthet i kvicklera och marin lera med hög salthalt men sämre resultat i organiska jordar och sulfithaltiga jordar, samtidigt som rent cement ger bättre resultat i jordar med gyttja och torv (Åhnberg, et al., 1995). Förekomsten av organiska ämnen kan hämma hållfasthetsutvecklingen (Åhnberg, et al., 1995). I de fall det finns resurser testas man blandningen på laboratorium, dock kan resultatet skilja sig från hur den verkliga pelaren blir ute i fält. För att verkligen se hur bindemedlet reagerar i den aktuella jorden är det därför viktigt att göra prover ute i fält (Åhnberg, 2006), exempelvis

provpelare som grävs upp och okulärbesiktigas eller labbtestas. Provpelare tillverkas för att utvärdera olika förutsättningar i den aktuella jorden, som inverkan av installationsförfarande, bindemedelstyp och bindemedelshalt.

Bindemedelstillsatser förekommer beroende på önskade egenskaper hos förstärkningen. Sulfithaltiga jordar har exempelvis visats vara svårstabiliserade med endast kalkcement men bättre resultat har uppnåtts med bindemedel innehållande masugnsslagg och flygaska (Andersson & Norrman, 2004).

Olika bindemedel ställer olika krav på blandningsarbetet. Kalkens omedelbara och häftiga värmeutveckling, lokalt uppemot 100 °C, kan ge kraftig upptorkning av jorden med försvårad bindemedelsspridning och svårblandad jordmassa som möjlig följd (Åhnberg, et al., 1995). Cement ska däremot teoretiskt vara blandbar de första dagarna (Burström, 2007).

2.4 Pelaregenskaper

Det finns flera kvaliteter att testa hos pelarna. Beroende på pelarens avsedda funktion och behov av verifikation av designparametrar är olika egenskaper intressanta för kontroll. För stabiliserande effekt bör man enligt Axelsson (2001) exempelvis kontrollera odränerad skjuvhållfasthet och storleken på störd zon under pelare och lutning, förutom de egenskaper som även gäller vid sättningsreduktion: form, sämre partier i pelartopp, pelaravstånd och bindemedelsfördelning över tvärsnittet. De kontrollerade egenskaperna har olika stor betydelse för olika fall liksom hur resultaten ska tolkas och mätas, exempelvis medelvärden över tvärsnitt och längd eller absoluta värden i en mätpunkt. Hållfastheten i överlappningszonen och pelarnas lutning och placering i förhållande till varandra är viktigt för lateralt belastade skivor, för skivor generellt är det viktigast att framförallt pelarnas övre del sitter samman; för sättningsfall är skjuvmodulen intressant att ta fram medan tvärsnittsarea och bindemedelsfördelning är viktiga för stabiliteten (Axelsson, 2001). Pelarens egenskaper har generellt sett större betydelse högre upp i pelaren (Axelsson, 2001).

2.4.1 Homogenitet

Axelsson (2001) beskriver homogenitet i pelare som egenskapernas variation över tvärsnittet och längden, där homogenitet skulle kunna uttryckas indirekt som exempelvis hållfasthetens variation. Om bindemedlet betraktas som homogent blir nästa steg att utvärdera hur bindemedlet är distribuerat över pelaren och hur väl bindemedlet blandats med jordens vatten så att hydratationen inleds. Områden med ohydratiserat bindemedel kan anses vara inhomogena precis som områden utan bindemedel. Homogenitetens storleksordning bör utgå från homogenitetens betydelse för funktionen, där ett medelvärde över pelaren eller pelarsystemet i vissa fall är intressant medan kritiska punkter i ett pelaravsnitt har betydelse i andra fall, samt om det går att urskilja en trend av ostabila områden inom eller mellan pelare. Ett några centimeter svagt skikt har som exempel inte betydelse för stabiliteten i aktiv zon, men i skjuvzon kan det inverka om svaghetsplan uppstår på samma nivå i flera pelare så att en glidyta kan utbildas, kontrollen kräver då en upplösning på någon centimeter medan kontroll av pelarlängd och bottenanslutning kan ha lägre upplösning (Axelsson, 2001). Larsson et al. (2002) uttrycker att klumpar av oreagerat bindemedel bör kunna upptäckas med kontrollmetoden som också ska kunna utföras över hela tvärsnittet.

2.4.2 Permeabilitet

Permeabiliteten, vattengenomsläpplighetsförmågan, i pelaren är av intresse för att förstå strömningen av framförallt vatten genom pelaren. Transport av ämnen från den stabiliserade jorden och förändrade grundvattenförhållanden är några viktiga aspekter (Åhnberg, 2006).

Generellt ökar permeabiliteten initialt efter inblandning av bindemedel och nedrörning av torra partiklar då vattenhalten sänks och jordens porositet ökar till följd av omrörningen, därefter minskar permeabiliteten till följd av kemiska reaktioner som utvecklas över tid (Åhnberg, 2006), hydratiserad cement upptar exempelvis större volym än blandvattnet och det oreagerade bindemedlet var för sig (Fagerlund, 1999). Förändringen i den stabiliserade jordens vatteninnehåll kan ge en indikation om permeabiliteten, likaså hållfastheten, då permeabiliteten minskar proportionellt mot hållfasthetsökningen (Åhnberg, 2006).

Jämförelser mellan pelare tillverkade i fält och materialprover tillverkade med samma bindemedelsförutsättningar på labb visar att permeabiliteten är högre i fält, beroende på variationer i makrostrukturen med ojämn bindemedelsfördelning och mikrosprickor (Åhnberg, 2006; Tremblay, 2000). Beroende på typ av bindemedel kan permeabiliteten variera i förhållande till den ostabiliserade jorden; vid ett försök (Åhnberg, et al., 1995) hade kalkpelare dubbelt så hög, kalkcementpelare något högre och cementpelare i vissa fall lägre permeabilitet än den ostabiliserade jorden. Vid projekteringen av kc-pelarförstärkningen av väg E4 vid Prästjärn förutsattes att kalkcementpelaren skulle vara något vattendrainerande men efter installationen kunde man inte konstatera att pelaren var dränerande varpå djupdränering installerades (Viberg, et al., 1998). Vid ett annat försök drogs slutsatsen att kalkcementpelarna var tillräckligt täta för att inte fortplanta angränsande grundvattensänkning (Tremblay, 2000). Svenska geotekniska föreningen (2003) menar att kc-pelare kan användas för att delvis öka jordens täthet och motverka läckage.

2.4.3 Hållfasthet

Den stabiliserade jordens hållfasthet uttrycks som odränerad skjuvhållfasthet (Axelsson, 2001). I Sverige kategoriseras kc-pelare från mjuka till hårda, där mjuka har en odränerad skjuvhållfasthet upp till 150 kPa, mellanhårda 150-300 kPa och hårda över 300 kPa (Larsson, 2006).

Dimensionerad hållfasthet utgår från pelarnas effektiva volym och pelarsamverkan påverkas av pelarnas centrumavstånd, med större betydelse ju högre täckningsgraden är (Axelsson, 2001). Pelarens verkliga radie är därför intressant att kontrollera för vissa tillämpningar. Även variationen av egenskaper över tvärsnittet har betydelse i några funktionsfall, som momentkapaciteten (Axelsson, 2001). I andra fall är medelvärdet av hållfastheten över tvärsnittet och längden intressant, som vid sättningskontroll, där även avståndet mellan pelarens överkant och markytan har betydelse (Axelsson, 2001). Hållfastheten kan variera stort över tvärsnittet (Larsson, 2005).

Styvhet mot böjning och knäckning kan uppnås då pelare placeras i skivor eller i block med överlappning. Hållfastheten är lägre i övergångszonerna (Holm, 2002) och modellförsök har visat att brott i skivor uppstår som skjuvbrott i överlappningszonen för att övergå i knäckning av de enskilda pelarna (Larsson, 2006). Enligt en entreprenör, återgivet av Holm (2002), undviks detta om de överlappande pelarna installeras tillräckligt snart efter varandra.

Både stigningen och antal vingpar på installationsverktyget har signifikant betydelse för storleken och variationen på hållfastheten i den stabiliserade jorden (Larsson, et al., 2002). Om den stabiliserade jorden inte omrörs tillräckligt i vertikalled kan bindemedlet fördelas så att instabila pelare av höghållfasta horisontella skivor varvade med svagare partier uppkommer (Cali, et al., 2005). Ofta kan en sådan pelare fortfarande ta vertikala laster men har en begränsad knäck-, böj-, drag- och skjuvhållfasthet (Larsson, 2006). Dålig omrörning kan även leda till svaga centrum i pelaren (Cali, et al., 2005). Hållfasthetsegenskaperna beror förutom blandningsprocessen och spridningen av bindemedel på jordens egenskaper (Larsson, et al., 2002; Åhnberg, 2006) där kemiska reaktioner, förändrade vattenförhållanden och påförd last kan ha inverkan över tid (Åhnberg, 2006). Ett samband mellan hållfasthet i horisontalled och närliggande pelare har påvisats (Nilsson & Larsson, 2008), vilket kan förväntas om man antar att jorden i ett område har liknande egenskaper, och avståndet mellan sonderingsmätningar rekommenderas utifrån detta till minst fyra meter. Med tanke på effekten av jordens egenskaper på pelarkvaliteten och den möjliga variationen i jordens egenskaper inom ett område finns en efterfrågan att testa ett större antal pelartvårsnitt för att få bättre uppfattning om den generella kvaliteten hos pelarna i en installation (Larsson, 2005). Då pelarnas kvalitet också kan variera trots likvärdigt installationsarbete med upp till stor spridning i hållfasthet som följd kan provning på enstaka pelare ge missvisande resultat av den generella hållfastheten (Hedman & Koukkanen, 2003; Larsson & Nilsson, 2005; Larsson, 2005; Larsson, et al., 2005).

På grund av det med djupet ökande jordtrycket kan pelarnas skjuvhållfasthet generellt sägas öka med djupet (Kock-Larsen, 2013). Den översta delen av pelaren har ofta också låg hållfasthet till följd av lågt omgivande tryck (Haglund & Nilsson, 2001) och för att jorden har sämre kvalitet vid ytan med exempelvis organiskt innehåll. Låg hållfasthet i de översta partierna har rapporterats från installationer av kc-pelare (Alén, et al., 2005; Cali, et al., 2005; Dannewitz, et al., 2005).

2.4.4 Beständighet

Hur den stabiliserade jorden påverkas över tid kan vara av intresse för design av jordförstärkningen och för val av förstärkningsmetod. Det kan därför finnas ett behov av att kunna mäta pelarens status över tid.

Pelarens beständighet påverkas av den miljö den utsätts för. Surt och strömmande vatten kan lösa upp och borttransportera CH och CSH, främst CH är känsligt så ju mer CH som omvandlats till CSH, desto beständigare blir pelaren. I stillastående vatten höjer bindemedlet vattnets pH-värde varför detta inte är ett stort problem. Spricksystem och hög permeabilitet underlättar inträngning av skadliga ämnen och transporten av de urlakade ämnena. (Johansson, et al., 2005)

Även reaktioner med olika ämnen kan vara skadligt. Då CH utsätts för sulfat och aluminatkomponent kan ettringit som har en svällande effekt bildas, effekten av expansionen motverkas dock av en porös struktur i den stabiliserade jorden och tillgången på sulfat begränsas av omgivande jords täthet (Åhnberg, et al., 1995; Johansson, et al., 2005). Djupstabiliserad jord anses inte ha problem med svällning och en volymexpansion kan till och med ge bättre spänningsförhållanden och bidra till stabiliseringseffekten (Johansson, et al., 2005).

På lerpartiklarnas yta finns positivt laddade joner, ofta av kalium eller natrium. Kalciumjoner från kalkinblandning ger att kalium- och natriumjonerna ersätts och lerans struktur förändras

(Åhnberg, et al., 1995). Effekter som noterats på sikt visar att efter 10 år har kalciumjoner vandrat upp till 50 mm från pelarens yta in i den omgivande jorden (Löfroth, 2005) och uppemot 150 mm efter 17 år (Johansson, et al., 2005), men jonvandringen mätt efter 20 år har inte kunnat påvisas påverka pelarnas egenskaper (Johansson, et al., 2005).

För mätning av yttre påverkan kan provningsmetoder för betong användas, med beaktande av inverkan från vattenutbyte och den omgivande jordens kemiska sammansättning och med insikten om att kraven på en betongkonstruktion är andra än på stabiliserad jord och. Utvärdering av vattenflöden i pelarens omgivning bör ingå i bedömningen av långtidseffekter. (Johansson, et al., 2005)

Då den omgivande jorden är tät med begränsat vattenflöde kommer den stabiliserade jorden vanligtvis ha goda långtidsegenskaper (Johansson, et al., 2005). Svenska geotekniska föreningen hade inte konstaterat några problem med beständighet fram till år 2005 (SGF:s Jordförstärkningskommitté, 2005).

3 Kontrollmetoder för kc-pelare

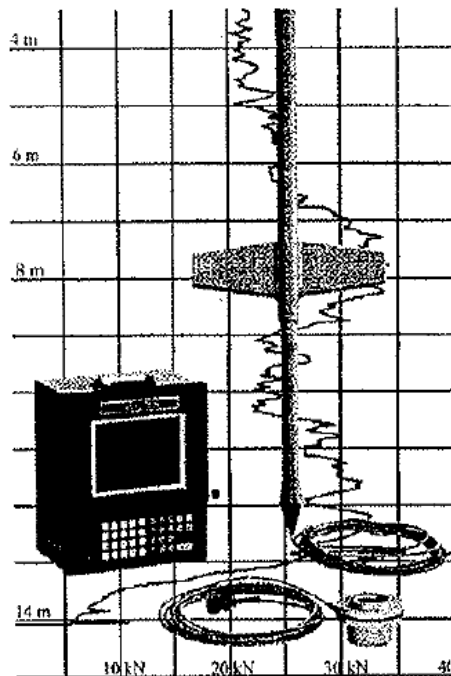
Med kontroll av pelare åsyftas de kontrollmetoder som utförs för att utvärdera pelarens kvalitet i förhållande till design och tekniska kravspecifikationer. Dessa kan vara förstörande såväl som ickeförstörande, utförs före, i direkt samband med installationen eller efter viss tid, på hela eller delar av pelare, i fält eller på labb. Traditionella metoder som olika typer av sondering tas upp för att ge förståelse för vanligt förekommande och standardiserade metoder, metoder som varit under utveckling ett tag, som seismik, tas upp för att ge en överblick av resultaten och nyare metoder som temperaturmätning presenteras för att ge en uppfattning om modernare framsteg på området. Metodernas tillvägagångssätt och tillämpningsområden presenteras tillsammans med resultat, erfarenheter och utvärderingar från teori och genomförda projekt.

3.1 Sondering

Sondering är neddrivning av en sond med hjälp av sondstänger med statisk eller dynamisk belastning genom tryck, vridning, slag eller en kombination, med motstånd mätt i exempelvis antal varv per meter, slag per meter och påförd kraft (SGF, 2013). De första pelarna tillverkade med enbart kalk gav mjukare och mer homogena pelare än dagens kalkcementpelare och sondering fungerade bra som metod för att uppskatta pelarens hållfasthet (Carlsten, 2000). Dagens hårdare pelare tillverkade med cement och kalk ställer krav på att testmetoderna också måste klara högre hållfastheter, varför sonderingsmetoderna tillämpade för kontroll av kc-pelare utvecklats med tiden. Ju längre härdningstid, desto hårdare blir pelarna också. En känd begränsning i metoden (Cali, et al., 2005; Puppala, et al., 2005; Larsson, 2005) är att sonden styr ur för hårda pelare. Sondering uppges lämplig för kontroll av pelare med maximal odränerad skjuvhållfasthet 150 kPa, största längd 8 m och diameter 500 – 800 mm (Carlsten, 2000). Med mindre vingar kan sondering utföras även på pelare med hållfastheter över 300 kPa, resultaten är på grund av den smalare sonden dock inte representativa som medelvärde för hållfastheten över tvärsnittet (Carlsten, 2000).

3.1.1 Kalkpelarsondering, KPS

Kalkpelarsond eller traditionell pelarsond, KPS, är en sond med konisk spets och ett vingpar som trycks ned i pelarens centrum under konstant hastighet varvid nettotrycket mot vingarna och spetsen uppskattas och medelvärdet av den odränerade skjuvhållfastheten över tvärsnittet beräknas, se Figur 5. Vingarnas och spetsens utseende och tvärsnittsarea, sondens neddrivningshastighet, registrering av neddrivningskraft samt neddrivningsdjupet under pelarkant är reglerat i projekteringsvägledningen (Carlsten, 2000). Sondens area skall täcka så mycket av pelarens tvärsnittsarea som möjligt för att ge ett rättvist medelvärde av pelarens hållfasthet över tvärsnittet (Axelsson, 2001). KPS rekommenderas (Jelisić & Nilsson, 2005) just eftersom metoden ger tvärsnittets medelhållfasthet. Bindemedels- och hållfasthetsfördelningen över tvärsnittet kan inte utvärderas med KPS då sonden är för stor för att uppfatta variationerna (Larsson, et al., 2002).



Figur 5. Kalkpelarsond med mätning av tryck mot spets och vingarna och registrering i instrumentet Geologg. Bild av Geotech hämtad från Axelsson (2001).

3.1.2 Förborrad kalkpelarsondering, FKPS

Förborrad kalkpelarsondering, FKPS, utförs som KPS men med förborring genom pelarens centrum, vilket leder sonden. Förborringen innebär att pelare uppemot 350 kPa kan testas (Carlsten, 2000). Vid projektet Västlänken Centralen i Göteborg utfördes (Wood, 2018(a)) sonderingsprovningar på pelare tillverkade med olika kalkcementbindemedel, blandningsverktyg och stigningshastighet. Pelarna var 20 m med ett riktvärde för den odränerade hållfastheten på 70 kPa i de övre 10 m och 140 kPa i de undre. Förutom att gå genom pelaren måste sonden ibland gå genom överliggande, hårt fyllnadsmaterial. FKPS-test på sex pelare med diametern 700 och 800 mm inleddes efter fyra dagars härdning, då hade pelarna

redan uppnått sådan hållfasthet att sonden styrde ur (Wood, 2018(a)). Vid försök på ytterligare åtta pelare gick sonden ur när den nådde den undre, starkare delen av pelaren (Wood, 2018(a)).

3.1.3 Förinstallerad omvänd pelarsondering, FOPS

Förinstallerad omvänd pelarsondering, FOPS, är en spetslös sond installerad under pelarkant i samband med pelarinstallationen, förankrad i en vajer som går genom pelarens centrum och fäster i ett mätinstrument vid markytan. Sondens installeras före tillverkningen av pelare alternativt förs ned i tillverkad pelare med ett foderrör, den senare metoden benämns *efterinstallerad omvänd pelarsondering*. För vertikala pelare förväntas sonden installeras utan att gå ur (Carlsten, 2000) och befinna sig i pelarcentrum under uppdragning (Axelsson, 2001). Omvänd pelarsondering lämpar sig därför väl för mätning på större djup (Axelsson, 2001). När pelaren nått önskad ålder dras sonden upp genom pelaren under mätning av nettotrycket varpå odränerad skjuvhållfasthet kan beräknas. En begränsning i metoden är att vajern gjuts fast i den härdande pelaren och därefter riskerar att gå av vid sonduppdragning. Detta motverkas genom att dra vajern en bit uppåt några dagar efter installationen (Carlsten, 2000). För att inte överraskas av oväntat snabb härdning rekommenderas att förlägga testsondering innan ordinarie mätning (Carlsten, 2000). Rester av fastvuxet pelarmaterial på uppdragen vajer och sond indikerar ojämn fördelning av bindemedel över tvärsnittet vilket leder till oanvändbara resultat (Carlsten, 2000). FOPS innebär att testpelarna bestäms i förväg varför tilläggskontroll med förinstallerad omvänd pelarsondering inte kan utföras.

Fördelar med FOPS är att sonden inte går ur och att sondens mätyta är större än exempelvis CPT-sondens, därmed fås medelvärdet av hållfastheten över större del av tvärsnittet (Lawson, et al., 2005). FOPS ses som ett komplement till vanlig KPS för fall då sonden går ur, mätningar med KPS rekommenderas för jämförelse av mätresultat i den övre, mjukare delen av pelaren (Carlsten, 2000). Olika metoder kan ge olika värden för samma hållfasthet och resultaten kan därför behöva kalibreras mot varandra.

Lawson et al. (2005) utförde FOPS enligt SGF Rapport 4:95E (förlagan till SGF Rapport 2:2000, av Carlsten (2000)) med hjälp av en CPT-rigg. De upplevde svårigheter med metoden då vajern gick av vid mer än hälften av försöken, några utfördes inom ett dygn efter installation. Kabelbrotten skedde vid infästningen till mätapparaten vid markytan. (Lawson, et al., 2005)

FOPS utfördes på flera pelare vid Västlänken Centralen vilket upplevdes fungera bättre med avseende på fyllnadsmaterialet än vad FKPS gjort (Wood, 2018(a)). Sammanfattningsvis var pelarna hårda – och får generellt betraktas ligga en bra bit över riktvärdena - liksom fyllnadsmassorna varför sonderingsmetoderna stötte på problem och färre provtagningar än planerat kunde utföras (Wood, 2018(a)). En slutsats från testerna var att trots olika bindemedelsmängd i övre och undre del av pelare så var hållfasthetsutvecklingen efter två veckor ungefär densamma i båda delar, men hade stigit i delen med mer bindemedel efter en månad (Wood, 2018(a)).

3.1.4 Jord-berg totalsondering

Jord-bergsondering, jb-sondering, utnyttjar hammarpåford slagenergi till borrar med tryck, rotation och slag i hårda material som jord och berg (SGF, 2013). Metoden indelas i olika

klasser beroende på ändamål för undersökningen. Klassen jb-totalsondering, eller totalsondering, utnyttjar ett statiskt vridtrycksläge med konstant rotations- och sjunkhastighet och är lämplig för undersökning av grovkornig jord överlagrad med lösare jord (SGF, 2013). Vid förborring av pelaren till FKPS används ofta jb-sondering eller jb-totalsondering (Larsson & Bergman, 2013), se Figur 6. Jb-totalsondering har visats ge god överensstämmelse med KPS för värden på odränerad skjuvhållfasthet i en undersökning utförd av Larsson och Bergman (2013), och rekommenderas av författarna som ett komplement till KPS för att erhålla genomsnittliga hållfasthetsegenskaper i medelhårda till hårda kc-pelare.

Även Jelisić och Nilsson (2005) ser jb-totalsondering som ett alternativ för att få uppfattning om skjuvhållfastheten i hårda pelare då KPS-sonden går ur, metoden rekommenderas att kompletteras med andra testmetoder som materialprovtagning på grund av att heterogeniteter i pelaren kan ge missvisande resultat för genomsnittsvärden. Hålet efter sonden föreslås utnyttjas till CPT eller geofysiska mätmetoder. Totalsonderingen kan gå genom hela pelaren vilket kan ge uppfattning om pelarens verkliga längd. (Jelisić & Nilsson, 2005)



Figur 6: Kc-pelare testas med jb-totalsondering. En cementring är placerad ovanpå pelaren för att underlätta arbetet. Foto Jelisić och Nilsson (2005).

3.1.5 Cone penetration test, CPT

Cone penetration test, CPT, eller spetsstrycksondering, är en traditionell geoteknisk fältmetod för att uppskatta variationer i jords egenskaper och används för att ta fram kc-pelares odränerade skjuvhållfasthet. En cylindrisk sond med konisk spets trycks ned i pelarens centrum under konstant hastighet och kraft varvid spetsmotståndet mäts. Sondens tvärsnittsytta är liten och upplösningen hög, metoden är därför känslig för heterogeniteter längs pelaren (Axelsson, 2001). Även denna metod upplever problem med att sonden styr ur pelaren (Axelsson, 2001) och den rekommenderas därför ej för pelare längre än 8 m (Larsson & Bergman, 2013). Vid ett försök (Cali, et al., 2005) kom man fram till att CPT fungerade bra första dygnet, innan pelarna blivit för hårda och sonden styrde ur.

Vid en undersökning (Bergman, et al., 2013) av överensstämmelsen mellan hållfasthetsvärden uppmätta med CPT och KPS fanns att skillnaden var liten, värdena kunde därför sägas vara

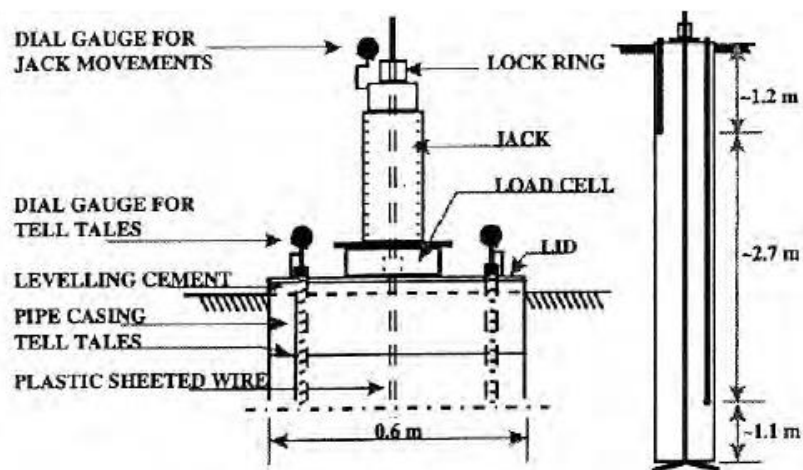
jämförbara. De undersökta tvärsnittsareorna är däremot olika vilket kan vara viktigt att beakta vid jämförelse av mätresultaten. Om sondens exakta position över tvärsnittet inte kan fastställas och om upprepade provningar för statistiskt underlag inte kan utföras i pelaren, bedöms metoden vara olämplig, som i fallet med CPT (Larsson, et al., 2002).

CPT finns med flera tilläggs­mätningar, bland annat av porvattentryck, CPT-U, och elektrisk resistivitet, CPT-R. En finsk standardmetod år 2005 var att använda en modifierad typ av CPT med större penetrationsyta än vanlig CPT (Kangas & Korhonen, 2005).

3.2 Belastningstest

Genom vertikalt påförd last kan pelarnas deformationsegenskaper testas och kompressionsmodulen tas fram (Larsson, 2005). Ett fältförsök med förinstallerad bottenplattbelastning och ensidig plattbelastning har utförts av Baker, Sällfors och Alén (2005) norr om Göteborg för att uppskatta kc-pelares kompressionsmodul. Liknande försök på flera provningsplatser i Sverige har utförts av Baker (2000). Förinstallerad bottenplattbelastning innebär att en platta fäst i en vajer förinstalleras i pelarbotten och efter pelarinstallationen spänns vajern vid pelartoppen med hjälp av domkraft så att tryckkraft tillförs pelaren från båda ändar, se Figur 7. Deformationsmätare installeras i förborrade kanaler genom pelaren och deformationen utmed pelaren registreras, momentan deformation och initiell krypdeformation mäts. Den påförda axiella kraften ökas gradvis i jämna tidsintervall tills pelaren går i brott eller deformationen överstiger mätkapaciteten. Den översta delen av pelaren kan ha sämre hållfasthet till följd av andra jordförhållanden vid markytan, därför schaktas ett stycke av den övre pelardelen bort för att inte ge ett missvisande resultat av den generella pelarkvaliteten. Ett alternativ till förinstallerad bottenplattbelastning som användes för metodjämförelse är lastapplicering endast från pelartoppen. I detta försök gick den ostabiliserade jorden under pelaren till brott först, pelaren sjönk då ned i jorden och gick ej till brott, även om plastiska deformationer uppmätts. Resultaten från testet gav att pelarna generellt sett var mjukare i toppen, hårdare i mitten och i en pelare testad med förinstallerad bottenplattbelastning var deformationen i botten hög, förklarat härrörande ett svagt skikt mellan bottenplatta och pelarbotten. Ensidig plattbelastning ger pelarens lastkapacitet i samverkan med den omgivande jorden, medan förinstallerad bottenplattbelastning endast ger pelarens lastkapacitet. De båda testmetoderna gav liknande resultat, till dess att jordens bärförmåga överskreds för de ensidigt belastade pelarna. Kompressionsmodul togs fram genom analys av mätdata. Förinstallerad bottenplattbelastning beskrivs som enklare att utföra än ensidig plattbelastning. (Baker, et al., 2005)

Belastningstest kan också utföras för att mäta sättning i ett system av pelare, exempelvis under järnvägsbank, genom pålagd överlast (Raju & Abdullah, 2005).



Figur 7: Schematisk bild över förinstallerad bottenplattbelastning.
Bild från Baker et al. (1997).

3.3 Materialtest och okulärbesiktning

Med tillgång till pelarmaterialet kan en rad olika kontroller utföras. För att få uppfattning om pelarens förväntade egenskaper i fält kan materialprover tillverkas och testas på laboratorium. Materialprover från pelare kan också tas för diverse labbprovning, däribland av hållfasthet, porositet, vatteninnehåll, bindemedlets hydratationsgrad och fördelning över materialet. På en blottad pelare kan diametern mätas, materialet granskas okulärt och materialprover utföras direkt i fält.

En gemensam slutsats från en workshop om kc-pelare med fokus på projektering, utförande och kontroll i Göteborg 2003 var vikten av provpelare (Dannewitz & Rydell, 2003). Förkontroll anses i allmänhet utgöra en viktig del av pelarnas kvalitetskontroll (Usui, 2005). Även för att optimera dimensioneringen av pelarinstallationen utifrån verkliga förutsättningar i komplexa jordförhållanden (Haglund & Nilsson, 2001).

3.3.1 Labbtest

Materialtester på laboratorium utnyttjas för att utvärdera bindemedelsblandningar innan jordstabilisering och för att undersöka prover från pelare tillverkade i fält. Eftersom förhållandena i fält och på labb är olika krävs att så gott som möjligt försöka efterlikna de verkliga jordförhållandena när materialprover tillverkas i labb. Dit hör bland annat temperatur, spänningstillstånd och vattentillgång (Haglund & Nilsson, 2001). Även tillverkningsprocessen av labbprover och pelare i fält är olika. Det är också viktigt att ta hänsyn till hur faktorer i fält kan variera över tid (Åhnberg, et al., 1995; Åhnberg, 2006).

Spridningen på hållfastheten i fält är ofta stor (Haglund & Nilsson, 2001), analys av prover tagna från olika delar av den stabiliserade jorden för att utvärdera bindemedelsspridningen ger goda resultat men är dyra och tidskrävande (Larsson, et al., 2002).

Mätförsök utförda på prover i labb och på pelare i fält av Tremblay (2000) visade stor variation i skjuvhållfastheten, Haglund och Nilsson (2001) gav att hållfastheten i fält var densamma eller

högre än i prover på laboratorium. Bättre metoder krävs därför för att erhålla mindre spridning i resultatet snarare än att försöka uppnå högre hållfastheter (Haglund & Nilsson, 2001). Standardisering av labbmetoderna för jämförbara resultat efterfrågas också (Haglund & Nilsson, 2001). Även resultaten från olika kontrollmetoder varierar, konförsök gav exempelvis högre hållfasthetsvärden än enaxiella tryckförsök (Haglund & Nilsson, 2001).

Enaxiellt kompressionstest beskrivs som det enklaste och mest använda sättet att ta fram hållfastheten på labb men det ger ingen uppfattning om spänningsfördelning och porvattenförhållanden. Triaxialtest innebär att provets spänningsförhållanden i fält bättre kan efterliknas men metoden är mer tidskrävande. (Bitir, et al., 2015)

3.3.2 Kärnbörning

Kärnbörning är en fältmetod där kontinuerliga borrhäror tas i pelaren med hjälp av kärnborrutrustning (Axelsson, 2001) och rekommenderas som den primära metoden för insamling av materialprov (Yohannes & Daramalinggam, 2019(a)). Kärnbörning är en förhållandevis dyr metod för att erhålla materialprover och metoder som *double-tube* och *wet grab*, se Figur 8 och Figur 9, kan därför vara ett bra alternativ för det större antal prover som kan krävas för ett statistiskt representativt underlag (Yohannes & Daramalinggam, 2019(b)).

Kärnprover testas i enaxliga- eller treaxliga tryckförsök för att ta fram hållfastheten, bindemedelshalten bestäms och de besiktigas okulärt (Axelsson, 2001). Metoden är lämplig för hårdare pelare och begränsas av om kärnornas kvalitet är dålig och de faller sönder till följd av inhomogena pelare (Axelsson, 2001), se Figur 10. Metoden är även känslig för omständigheter som provens hantering och typ av borrhörutrustning samt hur avvikelser ska tolkas, exempelvis sprickor i provet, som redan kan ha funnits i pelaren eller uppkommit vid borrhörning och hantering av prov (Axelsson, 2001). För att få uppfattning om ifall kärnornas struktur med eventuella sprickor uppkommit i samband med provtagning eller om de återger förhållandena i pelaren kan kamera användas för visuell inspektion av borrhålet (Yohannes & Daramalinggam, 2019(a)).



Figur 8: Materialprov kan tas i kc-pelare med metoden *double-tube*.
Foto Yohannes och Daramalinggam (2019(a)).



*Figur 9: Materialprov kan tas i kc-pelare med metoden wet grab.
Foto Yohannes och Daramalinggam (2019(a)).*



*Figur 10: Kärnprover från kc-pelare med genomgående sprickor och krossade partier.
Foto Yohannes och Daramalinggam (2019(a)).*

3.3.3 Framschaktning och upptagning

Hela eller mer vanligt delar av pelare kan grävas fram för okulärbesiktning och olika typer av materialprov. Testpelarna installeras i en provgropp och schaktas fram med lämplig maskin, se Figur 11. Okulärbesiktningen kan bland annat bestå i att utvärdera bindemedlets spridning över tvärsnittet, mäta pelarens form och mäta karbonatiseringsdjup. Ostörda prover kan fås genom att skala fram lämpligt prov ur ett större pelarstycke (Axelsson, 2001). Hållfasthetsfördelningen över tvärsnittet kan mätas men det är svårare att få uppfattning om variationen utmed djupet (Larsson, et al., 2002). Den bästa kvalitetskontrollmetoden enligt Kangas och Korhonen (2005) är att gräva upp pelaren, vilket även var den dyraste metoden.

Hela pelare eller pelaravsnitt kan även lyftas ur jorden. Med foderrör eller upptagningsrör som slås eller vibreras ned runt pelaren kan den dras upp med kran vid önskad upptagningslängd (Axelsson, 2001).



Figur 11: Upptagning av hel pelare. Foto Axelsson (2001).

3.3.4 Packer test

Kc-pelares hydrauliska konduktivitet, förmåga att släppa genom vatten, mäts sällan och det finns inte många rapporter med försök från fält (Larsson, 2005). Ett av få tester för att mäta pelarens hydrauliska konduktivitet är *packer test* (Baker, et al., 2005). Ett hål borrar genom pelarcentrum och en sektion av detta tätas i båda ändar med packningar, vatten pumpas in i testsektionen och utläckaget genom pelaren mäts, varpå materialets konduktivitet kan beräknas direkt i fält (Baker, 2000). Metoden har länge använts för att enkelt ta fram den hydrauliska konduktiviteten i avsnitt av borrhål och har utvecklats på senare tid, bland annat i takt med användandet av olika typer av markinjektering (Walthall, 1990). I ett av få fältförsök utförda i Sverige konstaterades (Baker, et al., 2005) att pelarkonduktiviteten var högre än den omgivande ostabiliserade lerans men mycket lägre än den antagna enligt Carlstens (2000) vägledning för kc-pelare.

3.4 Geofysik

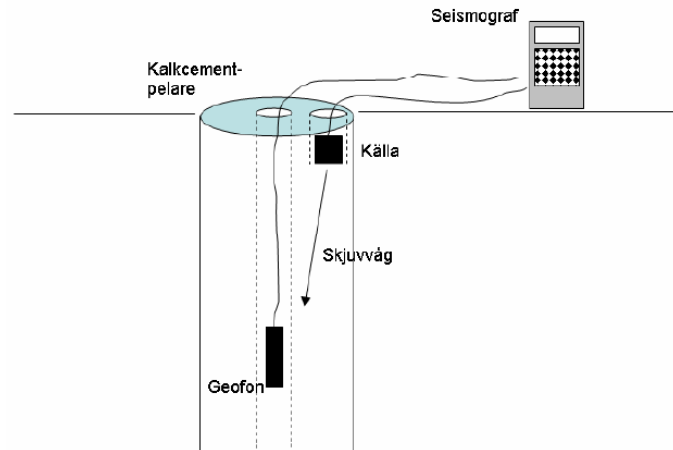
Geofysiska metoder har under lång tid utvärderats för att kontrollera kc-pelare, främst på experimentstadiet och för att få en generell uppfattning om kvaliteten (Larsson, 2005). Metoderna kan ge en uppfattning om pelarens kvalitet genom ickeförstörande och snabba tester men det finns ett behov av att kunna ta fram den stabiliserade jordens hållfasthet och styvhet (Puppala, et al., 2005). Geofysisk mätning med seismik och elektrisk resistivitet har förekommit sedan länge (Larsson, 2005) och har på senare tid fått tillskott av temperaturmätning.

3.4.1 Seismik

Seismiska vågor uppkommer till följd av någon slags vibration, exempelvis från hammarslag. Vågorna registreras i seismiska mätinstrument - geofon och seismograf. Med känd utbredningshastighet i materialet, uppmätt på ett materialprov, kan testobjektets hållfasthet och geometri uppskattas. För att utföra kontroll av pelare är metoden fördelaktig då ingen åverkan görs på pelaren, då materialet testas i jordens naturliga spänningsförhållanden, då ett medelvärde över pelaren erhålls samt då upplösningen kan anpassas genom inställning av parametrar som vågfrekvens och mätavstånd (Axelsson, 2001).

Det finns olika seismiska vågtyper. Ytvågor förflyttas endast på jordytan och kan möjligen användas för kontroll i block men ej i enskilda pelare (Axelsson, 2001). Volymvågor färdas genom material och det finns två typer. Skjuvvågor, s-vågor, färdas i solida material genom förflyttning av partiklar i sidled och framkomligheten i materialet beror på dess skjuvmodul och densitet (Styles, 2012). Energin överförs i kornskelettet och metoden är därför inte känslig för variationer i materialets porositet och vattenmättnadsgrad (Axelsson, 2001). Kompressionsvågor, p-vågor, färdas i solida material, vätskor och gaser genom kompression av det framförvarande materialet, där våghastigheten beror på materialets densitet (Styles, 2012). Kompressionsvågans hastighet påverkas av materialets porositet och vattenmättnadsgrad (Axelsson, 2001). Axelsson (2001) tar upp en rad metodtester och sammanfattningsvis används p-vågor till så kallade integritetstester för att bestämma konstruktionens kontinuitet och längd, där relativt goda samband mellan enaxiell hållfasthet och våghastighet erhållits, s-vågor används i borrhålmätningar, *down hole-measurements*. Borrhålmätning innebär att mottagare nedsänks i en kanal genom pelaren med vibrationskällan på pelartoppen eller på marken invid pelartoppen (Dannewitz, et al., 2005), se Figur 12. FFR, *free-free resonance testing*, är en annan seismisk metod som utförs genom vibrationsmätning i ett materialprov utsatt för hammarslag på labb (Åhnberg & Holmén, 2011). Vid ett borrhålsförsök på kc-pelare 1996 har Axelsson (2001) kunnat se ett grovt samband mellan skjuvvågshastighet och materialets skjuvhållfasthet.

Flera undersökningar har gjorts för att ta fram samband mellan våghastighet och den stabiliserade jordens hållfasthets- och elasticitetsegenskaper. I ett försök med borrhålmätning utvärderad på labbprover observerades att s- och p-vågshastigheterna varierade linjärt med pelarens odränerade tryckhållfasthet och man fann ett samband mellan elasticitets- och skjuvmodul, det framhölls dock vara osäkert hur metoden kan tillämpas praktiskt för mätning i fält (Porbaha, et al., 2005). I en annan undersökning med FFR utförd på labbprover från kc-pelare tillverkade in situ i silt och sand erhöles ett samband mellan ökande s- och p-vågshastighet och ökad hållfasthet, samt mellan hållfasthet och styvhet (Guimond-Barrett, et al., 2013).



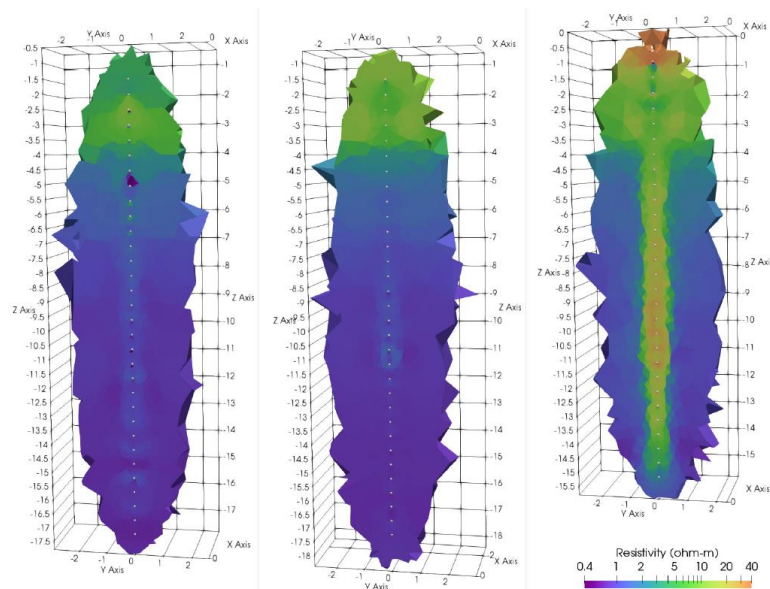
Figur 12: Schematisk skiss över seismisk borrhålsmätning i pelare. En geofon är nedsänkt i den förborrade kanalen, vågkällan är placerad på pelartoppen och mätinstrumentet på marken.
Bild från Dannewitz et al. (2005).

I ett försök (Dannewitz, et al., 2005) med borrhålsmätningar utanför Uppsala uppmättes s-vågshastigheten i kc-pelare i fält och jämfördes med resultat från labbtillverkade prover där empiriska samband mellan s-vågshastighet och skjuvhållfasthet framtagits. Resultatet från in situ-mätningarna visar att mätdata från vissa pelare har hög kvalitet och att den är lägre inom och mellan andra, även att de översta metrarna på pelarna generellt sett var svåra att utvärdera. I stora drag stämde den erhållna skjuvhållfastheten från downholemätningarna väl överens med uppmätta jämförelsevärden från KPS. Man kunde inte dra en slutsats om homogenitetens inverkan på mätbarheten men i avsnitt där bindemedelsinblandningen avbrutits uppstod svårigheter att uppfatta våghastigheten. Metoden uppges fungera bra för mätning på större djup, de aktuella pelarna var 12 m. (Dannewitz, et al., 2005)

3.4.2 Elektrisk resistivitetstomografi, ERT

Elektrisk resistivitetstomografi, ERT, mäter det elektriska motståndet i materialet genom att sända ut en elektrisk ström från ett elektrodpar och därpå mäta den framkallade skillnaden i elektrisk potential med ett andra elektrodpar. Elektroden kan sammankopplas i en lina med valfritt antal och avstånd sinsemellan, större antal elektroder möjliggör fler mätpositioner och därmed ett större undersökningsområde (Styles, 2012). Genom exempelvis utläggning av elektrodlinan på marken eller nedsänkning i borrhål kan man med ERT-mätning få uppfattning om vissa geologiska förhållanden. Metoden är ickedestruktiv och lämplig för att finna anomalier med avvikande ledningsförmåga i förhållande till omkringliggande material, den används exempelvis för att finna luftfickor, vattenmagasin och infiltrerade kemiska föroreningar (Styles, 2012). Då de elektromagnetiska egenskaperna varierar i jord, cement och vatten kan man med ökad hydratationstid se en förändring i ledningsförmåga i stabiliserad jord, där resistiviteten är direkt korrelerad med hållfasthetsökningen och omvänt korrelerad med vattenhalten (Edil, et al., 2004). Mätning med ERT på labbprover från pelare tillverkade med våtmetod i lager av sand och lera har visats ge en indikation om homogenitetens variation med djupet (Liu, et al., 2009) och ERT har tidigare visat sig ha potential för utvärdering av homogeniteten i ytstabiliserad jord (Lindh, et al., 2000). Försök att analysera jordförstärkning med ERT har varit positiva (Dahlin, et al., 1999).

På Västlänken Centralen utfördes försök med ERT på en 20 m kc-pelare 50/50 i marin lera överlagd med fyllnadsmaterial. En multielektrodlina med elektrodavstånd 0,5 m nedsänktes i ett slitsat plaströr som tryckts ned i pelaren med borrhvagn direkt efter pelarinstallation. Röret vattenfylldes för att underlätta elektrodkontakten. Mätningar utfördes då jorden var ostabiliserad, direkt efter pelarinstallation samt efter 36 dagars härdning. En inverterad 3D-modell av pelaren och omgivande jord med diameter sex meter skapades av mätresultaten, se Figur 13. Vid övergången mellan lera och fyllmaterial syns resistivitetskontraster i modellen för alla mätningar och vid 36 dagars härdning framträder en kropp med högre resistivitet och dimensioner liknande pelarens designade utseende. Lokala variationer med högre resistivitet inom pelaren tolkas kunna vara variationer i inblandad bindemedelshalt. Slutsatserna från mätdata är att inblandningen av bindemedel ger en signifikant sänkning av resistiviteten jämfört med ostabiliserad jord. Mätningarna fungerade bra i leran och mätdata indikerar information om variationer i stabiliseringsgrad längs pelarna vilket kan indikera variationer i diameter och bindemedelsfördelning. (Olsson, et al., 2019)



Figur 13: Resistivitetsmätningar i kc-pelare på Västlänken Centralen. De inverterade 3D-bilderna visar resistiviteten i jorden intill elektroddlinan (prickad linje) före inblandning av bindemedel (vänster), direkt efter inblandning av bindemedel (mitt) och 36 dagar efter inblandning av bindemedel (höger). Ur bilden framgår att resistiviteten ökar då pelaren härdar. Bild från Olsson et al. (2019).

3.4.3 Temperaturmätning

Bindemedlets reaktion med jordens vatten är exoterm, värme frigörs, och värmemängden är proportionell mot hydratiseringen. Mätning av den stabiliserade jordens temperaturutveckling i direkt anslutning till bindemedlets inblandning kan därför indikera hållfasthetsutvecklingen i pelaren.

På en provningsplats till Västlänken Centralen i Göteborg utfördes temperaturmätningar i enskilda kc-pelare för NCC sommaren 2018. Sam Johansson¹ äger Hydroresearch som utförde mätningarna och han har god erfarenhet av temperaturmätningar med optik från olika slags projekt. Temperaturmätning i kc-pelare verkar vara en ny kontrollmetod och den beskrivs därför relativt utförligt helt utifrån intervju med Sam Johansson och den rapport han skrev (2018) baserade på försöket 2018.

Mätningarna görs med optisk kabel som kan installeras på två sätt:

1. Kabeln förs ned i pelaren med kc-maskinen direkt efter att pelaren installerats. Detta kräver att kabeln fästs i ett så kallat ankare på pelarbotten som hindrar att kabeln följer med installationsverktyget då det dras tillbaka.
2. Kabeln förs ned med ett rör som installeras med en separat maskin efter att pelaren tillverkats.

De tre mätningarna som utfördes på provningsplatsen gjordes med kabel fäst på utsidan av ett öppet PEH-rör, enligt metod 2. Försök med metod 1 misslyckades. Slutsatsen av försöket är att metoden med kabel utmed röret gav användbara mätresultat men inte är praktiskt tillämpbar. Istället rekommenderar Sam att kabeln installeras enligt metod 1, med kc-maskinen.

Dagens kablar är under utveckling. Vid metod 1 användes i försöket en kevlarförstärkt polyuretanmantlad kabel och vid metod 2 en stålmantlad kabel. Den stålmantlade kabeln menar Sam Johansson fungerar väl till ändamålet, den klarar vattentrycket på djupet och har en relativt liten krökningsradie utan förluster. Den uppges också vara känsligare för skador vid hanteringen inför och under installationsarbetet än plastkabeln. Kablar kan vara känsliga för böjning (fiberna förstörs och hindrar signalen) och töjas (påverkar mätresultaten) eller gå av under installationsarbetet. (Johansson, 2018)

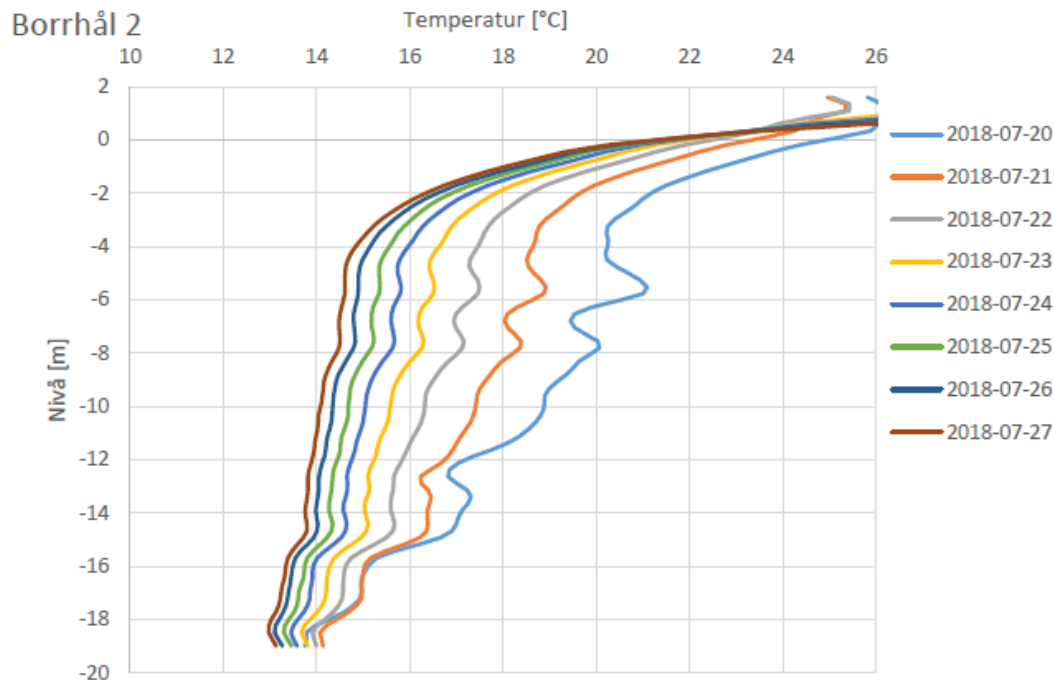
Mätning sker i fyra kanaler och med en samplingslängd av 0,25 m, 0,1°C, datainsamlingen kan ske manuellt eller vara "fjärrstyrd". Kabeln kan sammankopplas så att mätning av flera pelare går på samma slinga. För att sätta ihop kablar (ändarna som kommer upp ur pelaren eller förlängningar till exempelvis mätinstrumentet) är svetsning att föredra men det finns även kontakter. En god koppling med liten signalförlust mellan fiberändarna är betydelsefull för att få hög mätnoggrannhet. Mätlängdens variation har ingen betydande inverkan på kostnaden, antalet mätpunkter och antal kc-pelare avgör.

Mätningarna bör inledas i direkt anslutning till bindemedlets inblandning, då värmeutvecklingen inleds, temperaturen i pelarna avklingar efter några dygn. Varje förändring i temperaturen är intressant då det är relativ temperatur i pelaren som mäts. Stora variationer i mätinstrumentets omgivningstemperatur kan leda till mätfel (Johansson, 2018).

Från mätadata från försöket på Västlänken framgår att maxtemperaturen var olika i pelarna, liksom variationen med djupet, där lokala variationer kan ses och viss temperaturvariation längs pelaren indikerar inhomogena förhållanden (Johansson, 2018). Pelare tillverkad med MDM och högre halt bindemedel påvisade jämnare temperaturtillväxt med högre temperatur än de tormixade, vilket indikerar mer homogena pelare enligt förväntan (Wood, 2018(b)). I samtliga

¹ Sam Johansson äger Hydroresearch, ett Sverigebaserat företag som arbetar med utveckling av metoder för dammsäkerhet med bland annat optisk temperaturmätning, telefonsamtal den 9 januari 2020.

pelare har temperaturskillnader noterats på samma djup, -5 m, vilket kopplas till sannolik inverkan av lerans geologiska förhållanden, lokalt lägre temperatur har på en nivå, -12,5 m, sammanfallit med resultat från kärnprover som påvisar sämre inblandning och lägre homogenitet (Wood, 2018(b)), se Figur 14.



Figur 14: Vertikal temperaturprofil i kc-pelare mätt vid inblandning av bindemedel och 8 dagar framåt. På nivå -5 m finns en temperaturvariation som troligen kan förklaras med geologiska förhållanden och på nivå -12,5 m sammanfaller en temperaturvariation med ett område av dålig bindemedelsinblandning som verifierats i kärnprover. Bild från Johansson (2018).

Installation och mätning i kc-pelare med fiberkabel upplevs fungera bra. Temperaturmätning med optisk kabel kan vara flera kilometer långa men installation i kc-pelare på stora djup (som 20 m) kan enligt Sam Johansson däremot bli utmanande, eftersom kc-riggens bom begränsar installationsdjupet och därmed mätdjupet. Johansson ser att det finns goda möjligheter att mäta temperatur i kc-pelare när metoder och utrustning förfinats (2018).

4 Intervjuer

I detta kapitel presenteras resultatet av sex intervjuer med branschverksamma geotekniker och kc-tillverkare. Syftet med intervjuerna är att få del av kunskap och erfarenheter om kvalitetskontroll av kc-pelare som kanske inte framkommer i litteraturen. En viktig aspekt är att öka förståelsen för om metoderna fungerar som det är tänkt och om det finns behov av förbättring, baserat på information från de som väljer kontrollmetod, de som utför kontrollen och de som sedan använder datan.

Vid tolkning av information från intervjuer rekommenderas att ha i åtanke att det är den intervjuades *personliga åsikter* och *erfarenheter* som presenteras. Beroende på teoretisk och

praktisk bakgrund har man troligen olika infallsvinklar och gör kanske även olika tolkningar av problem. Just av denna anledning värderas intervjuerna med personer från olika roller i branschen högt i arbetet med att öka förståelsen för kc-pelares kvalitetskontroll.

Sammanställningen av varje intervju inleds med en kort presentation av den intervjuade och vilka frågor som ställts.

David Wiberg är affärschef på Hercules Grundläggning, geotekniker med specialisering inom djup- och masstabilisering med erfarenhet från arbetsledning i fält.

Wiberg fick frågan vad han anser om dagens metoder för kvalitetskontroll; om de har brister och om han anser att de behöver förbättras.

David Wiberg lyfter betydelsen av installationsförfarandet för pelarens kvalitet. I material med varierande blandningsmotstånd över djupet kan bindemedelsutmatningen bli ojämn. Han menar att i ett lager med stort motstånd kan rotationen av blandverkyget gå trögt och mer bindemedel matas ut per meter, medan vid övergången till ett lager med lägre motstånd riskerar verktyget att stiga så snabbt att mindre bindemedel hinner matas ut och en svag zon uppstår. Det finns därför enligt Wiberg ett behov av att kunna säkerställa och verifiera rätt mängd inblandat bindemedel över längden. Istället för att som idag endast kontrollera rotationshastighet och blade rotation number borde man enligt David Wiberg även kontrollera inblandningsenergi per jordmotstånd för att se fördelningen av bindemedel i olika hårda lager.

Torrmetoden är också, till skillnad från våtmetoden som använder slurry, känslig för tryckvariationer under bindemedelsutmatningen; en vindpust kan exempelvis leda till att fel mängd bindemedel matas ut. För att uppnå god pelarkvalitet anser Wiberg att även omrörningsarbetet under neddrivning kan vara en viktig aspekt för vissa jordar, exempelvis skiktade jordar eller lager som är mer svårborrade och innehåller mindre mängd vatten. Han ser här en möjlighet för entreprenören att spara tid genom hastig och icke tillfredsställande omrörning vid neddrivning och efterfrågar möjligheten att kunna verifiera neddrivningsarbetet.

För att tillverka kc-pelare med högre hållfasthet använder man företrädesvis våtmetod framför torrmetod. Dessa pelare kostar mer att tillverka då utrustningen är mer avancerad och etableringskostnaden är högre, konsumtionen bindemedel per meter pelare är större och tillverkningstiden är längre. Om man räknar med att det är en mer driftsäker metod och att pelaren tar mer last än pelare tillverkade med torrmetoden blir det dock troligen lägre kostnad per lastupptagningsförmåga med våtmetoden. Kvalitetskontrollen är dyrare; en metod är att installera dubbla rör i pelaren efter tillverkning och ta upp den för att utföra tester.

David Wiberg poängterar att projektets storlek påverkar förutsättningarna för kvalitetskontroll. I små projekt finns inte de ekonomiska möjligheterna för kontroll som vid projekt beställda av Trafikverket. Han menar att labbtester innan installationen knappt utförs och att provpelare sällan tillverkas; kvalitetskontrollen utförs främst efter pelarens tillverkning. Det är inte heller säkert att det finns tid att utföra kontroll då pelaren uppnått högre hållfasthet, det hade varit bra att mäta efter ungefär 100 dagar. Det är vanligare att mäta efter 7 dagars härdning och kanske göra tilläggsmätning efter 14 dagar för att säkerställa hållfasthetsutvecklingen.

Han anser inte att temperaturmätning är en bra metod för kvalitetskontroll. Den går inte att utföra på pelare med små diametrar, är dyr och homogeniteten är ofta för dålig för att klara temperaturmätning.

Han tycker att befintliga kontrollmetoder är tillräckliga för dagens användningsområden och riktvärde på 100 kPa, där man känner till att pelarna inte blir helt perfekta och heller inte har ett behov av detta. David Wiberg menar att om regleringen av pelarnas tillämpningsområden blir mindre konservativ kanske även kontrollmetoderna får anledning att utvecklas.

Jan Ekström är geoteknisk expert på Trafikverket och ordförande i forskningsprogrammet Branschsamverkan i Grunden.

Ekström fick frågan vad han anser om dagens metoder för kvalitetskontroll; om de har brister och om han anser att de behöver förbättras.

Jan Ekström menar att det är viktigt att definiera vilken tillämpning av kc-pelarna man är intresserad av för att utvärdera behovet av kvalitetskontroll. För rätt område kan homogenitetsmätningar bidra med kunskap och teknikutveckling inom området, utifrån om de ska ta last axiellt eller genom skjuvning i en tilltänkt glidyta säger han. Förutsättningarna för lastupptagningsförmåga beror enligt Ekström till stor del på lerans egenskaper, där den norska lerans högre sensitivitet² ger mer homogena pelare, vilket inneburit mindre osäkerheter kring användning av kc-pelare även i skjuvzon.

Ett annat område som enligt Jan Ekström kan vara intressant att undersöka är gränsområdet mellan pelare och jord, vilka förändringar man kan se i pelarens yttersta periferi.

Ett problem som Ekström lyfter och som förekommer vid stabilisering med skivor är att de kanske inte samverkar som man ritat teoretiskt med överlapp mellan pelarna på grund av pelarnas olika lutning sinsemellan och då förlorar mycket av sin tilltänkta styvhetssamverkan. Om gliporna mellan pelarna är för stora får man gräva upp och göra om säger han.

Enligt Jan Ekström är det oklart hur luft som inte tar sig ut vertikalt längs borrhållningen påverkar pelarens och jordens kvalitet. Vid installation med torrmetoden tillsätts luft som måste ut igen, i kvicklera kommer luften transporteras uppåt och ut under omrörningen, medan luften i en hårdare lera kan vandra i sidled eller trycka upp torrskorpan och orsaka markhävning berättar han.

När det gäller användning av kc-pelare med högre hållfasthet än i de tekniska kravdokumenten menar Jan Ekström att det saknas beprövade beräkningsmetoder. Starkare pelare kan tillverkas säger han men man får då själv stå för att ta fram dimensioneringsmetoderna, så kallad särskild utredning enligt TK Geo, där dagens beräkningsmetoder anses gälla upp till en maximalt angiven odränerad hållfasthet. Om beräkningsmetoderna utvecklas tror Jan Ekström att behovet av kvalitetskontroll kommer öka och kontrollmetoderna troligen anpassas därefter.

² Sensitiviteten anger sänkningen av lerans odränerade skjuvhållfasthet efter omrörning i förhållande till ostört tillstånd (Larsson, 2008).

Jorge Yannie är geotekniker med fokus på modellering på NCC.

Yannie fick frågan vad han anser om dagens metoder för kvalitetskontroll; om de har brister och om han anser att de behöver förbättras.

Enligt Jorge Yannie är mekaniskt beteende och homogenitet längs pelaren de viktigaste egenskaperna att kontrollera, utifrån pelarens huvudfunktion testas skjuvhållfasthet och styvhet. Yannie efterfrågar kontrollmetoder som är ekonomiska, snabba och lätta att genomföra.

Jorge Yannie ser ett behov av att utveckla kontrollmetoderna mot kombinationer av förstörande och ickeförstörande metoder. Befintliga metoder som olika typer av sondering tycker han behöver förbättras och kunna kombineras med geofysiska metoder som seismik, radar eller resistivitet. Här ser Yannie att det också kan finnas möjlighet att redan vid tillverkning av pelarna installera förutsättningar för framtida kontroller.

Jorge Yannie anser att det hade varit fördelaktigt med en metod som kan justeras och inställningarna anpassas efter den enskilda pelaren tills ett gott resultat uppnås. Resistivitet tycker han därför kan vara en intressant metod för att mäta homogenitet. Mätningen tycker Yannie bör utföras på enskilda pelare och statistiken från flera enskilda pelare i ett område kan ge uppfattning om de bästa installationsparametrarna.

Per Lindh är geoteknisk expert på Trafikverket och arbetar med projekt Västlänken Centralen.

Lindh fick frågan vad han anser om dagens metoder för kvalitetskontroll; om de har brister och om han anser att de behöver förbättras.

Det kan enligt Per Lindh vara svårt för andra metoder att konkurrera med KPS och FOPS som är välbeprövade och som utgör kontrollmetoder i standarderna. FOPS menar han har en nackdel i att det redan före installationen är känt vilken pelare som ska kontrolleras; entreprenören har då möjlighet att påverka resultatet genom högre kvalitet på installationsarbetet, framför allt genom utförligare omrörning av jorden vid nedstigning. Denna typ av manipulation av resultaten kan ge en missvisande bild av pelarnas generella kvalitet. Per Lindh anser att omrörningen av jorden vid nedstigning har betydelse för pelarens kvalitet då bindemedlet i en väl omrörd jord lättare blandas ut under uppstigning och risken för bindemedelsklumpar därmed minskar. Riktlinjer för jordens omrörning vid nedstigning tror han därför hade kunnat ge goda resultat för homogeniteten och därmed hållfastheten i pelaren.

Per Lindh tror att man hade kunnat utföra resistivitmätningar i samband med KPS genom att fästa elektroder på sonden. Att sonden styr ur pelaren är ett känt problem och han tror att dess benägenhet för utstyrning hade minskat om sonden utformats med fyra vingar på samma nivå, sett som ett kors ovanifrån, istället för med ett vingpar som idag.

Temperaturmätning tycker han är en bra metod för att följa hydratationen men instrumentet till den optiska mätningen anser han är dyrt och svårtillgängligt. En effektiv kontrollmetod ska enligt Per Lindh kunna utföras på enskilda pelare i fält och vara statistiskt tillämpbar på ett större antal pelare.

Personligen gillar Lindh uppskattning av elasticitetsmodulen med pressometer³ och undrar varför metoden inte tillämpas mer, han känner till en entreprenör som besitter instrumentet.

Per Lindh menar att labbtester är nödvändiga för utredning av ett bindemedels lämplighet och dess förväntade beteende i jorden. Vid tolkning av resultaten krävs enligt honom medvetenhet om skillnader vid tillverkningsprocessen och de fysiska förhållandena på labb och i fält. Han ser en risk att bindemedel tillskrivs egenskaper som inte gäller i fält och det är troligt att prover betar sig annorlunda än pelare i fält, även jämförelse av labbtillverkade prover och kärnprover från pelare i fält tycker han kräver denna insikt.

Nibben Peterzés äger entreprenörsfirman Dmixab och har lång erfarenhet som tillverkare av kc-pelare i Sverige och utomlands.

Peterzés fick frågan om han tror att tillverkningsprocessen inverkar på pelarens kvalitet samt vad han anser om dagens metoder för kvalitetskontroll; om de har brister och om han anser att de behöver förbättras. Han fick också frågan om neddrivningsarbetets inverkan på pelarkvaliteten.

Enligt Nibben Peterzés kräver kontroll med FOPS tillsyn, för att motverka fastväxt ska vajern dras upp i omgångar under härdningstiden innan provningen inleds. Fördelen med FOPS är att sonden befinner sig i pelarens centrum och att den inte styr ur.

En utmaning vid tillverkning kan vara att få ut luften ur pelaren under installationen och Peterzés upplever i vissa fall markhävning upp till några meter från pelaren om markytan har en tät egenskap. Detta tror han delvis motverkas genom att luften kan vandra upp via borrhållningen om den har fyrkantigt tvärsnitt.

Det är viktigt att bindemedlet hålls torrt och att flytbarheten är god då det många gånger kan vara svårt att få ett jämnt flöde under bindemedelsutmatningen, speciellt för lägre bindemedelshalter. Peterzés har inte upplevt något hinder med att tillverka kc-pelare vid minusgrader eller att pelarkvaliteten påverkas negativt, då det inte en fråga om temperatur utan luftfuktighet. Vid låg temperatur kan det vara lättare att hålla pulvret torrt eftersom luftfuktigheten är lägre.

Nibben Peterzés tar upp att det kan vara riskabelt med stora pelardiametrar. Ju större diameter, desto svårare kan det bli att få ut bindemedlet över hela pelarens tvärsnitt. För skivor bör man därför inte ha för stor diameter.

³ Pressometer är en typ av sond som sänks ned till önskat djup i ett förborrat hål genom pelarcentrum. Tryck appliceras mot insidan av hålväggen genom expansion av en packning så att deformation uppstår radiellt över pelarens tvärsnitt, på så vis erhålls pelarens hållfasthet och kompressionsmodul. Metodens uppges vara fördelaktig i att kompressionsmodulen från en stor del av pelaren kan tas fram och att höghållfasta pelare kan testas men ha en nackdel i att den tar lång tid att utföra. (Larsson, 2005)

Metoden förekommer inte ofta i litteraturen och verkar inte vara en vanlig metod för kvalitetskontroll av kc-pelare i Sverige.

Peterzéns erfarenhet av torrmetoden, i motsats till våtmetoden, är att det kan vara bättre med lägre inblandningsenergi vid neddrivning då man vill bevara lerans naturliga struktur för att inte öka benägenheten att leran trycks upp ur marken under installationen.

Borrens riktning kan inte styras då den hänger fritt från tornet, ju lösare lera desto bättre bör pelarens lutning sammanfalla med dess masscentrum, förutsatt att tornet står vertikalt placerat. Nibben Peterzéns berättar att man nyligen har gjort försök med lutningsmätningar och sett att vid installation av skivor finns en tendens att borren söker sig efter föregående pelare om de inte härdar för fort. Han anser därför att vid överlappning i skivor är det bättre att installera pelare intill föregående pelare än att installera pelare med mellanrum och sedan fylla i glappen.

Förbättring av dagens kontrollmetoder kräver enligt Peterzéns gott samarbete mellan geotekniker och olika aktörer i branschen.

Stefan Dahlin är geotekniker och är delägare av entreprenörsfirman Soil Mixing Group.

Dahlin fick frågan om han tror att tillverkningsprocessen inverkar på pelarens kvalitet samt vad han anser om dagens metoder för kvalitetskontroll; om de har brister och om han anser att de behöver förbättras. Han fick också frågan om neddrivningsarbetets inverkan på pelarkvaliteten.

Enligt Stefan Dahlin är blandningsenergin den viktigaste parametern för god blandning och homogena pelare. Blade rotation number är intressant medan endast antal rotationer per minut är av underordnad betydelse. Han tror inte att neddrivningen har någon större inverkan på pelarkvaliteten, möjligen en aning i hård jord. Hos Soil Mixing Group är installationen automatiserad vilket innebär att om inte tillräcklig mängd bindemedel matas ut så avstannar stigningen, maskinisten övervakar processen.

Dahlins uppfattning är att luften som trycks ned i marken kommer upp längs borrstången samt en bit ut från pelaren. Förutsättningarna för luften att evakueras ur jorden beror på pelarlängd och därmed storleken på lufttrycket samt på rådande markförhållanden.

Stefan Dahlin har medverkat i utvecklingen av MDM. Pelare tillverkade med MDM blir hårdare och kan nyttjas mer än kc-pelare tillverkade med torrmetoden. För kontroll används företrädesvis kärnprovtagning som han anser är en bra metod. Med torrmetoden fås oftast inte lika homogena och starka pelare för att kunna testas med kärnprovtagning.

Han anser att dagens kontrollmetoder inte är optimala och bekräftar de kända problemen med för hårda pelare och sondutstyrning, kärnprov som faller sönder och att metoderna inte ger en heltäckande bild av pelarkvaliteten. För en utveckling av kontrollmetoderna tycker han att det är viktigt att de inte blir för dyra, inte blir svårare att utföra samt att de snabbt ger resultat på testade pelare. Ju mer optimerad metoden är desto intressantare menar han att den blir. Då pelare härdar olika snabbt ska det gå att utföra kontrollen vid olika tidpunkt.

Stefan Dahlin pekar också på vikten av väl genomförda geotekniska undersökningar i samband med installation av kc-pelare.

5 Diskussion och slutsatser

Från studien framkommer att det finns många metoder för att kontrollera kvaliteten på kc-pelares egenskaper. Merparten av de genomgångna metoderna påvisar goda förutsättningar att ge bra resultat på olika tillämpningsområden men saknar att leverera heltäckande resultat. Det vanligaste är att endast en egenskap kan kontrolleras med respektive metod. Den mest eftersökta egenskapen att kontrollera verkar vara pelarens odränerade skjuvhållfasthet.

Att hållfastheten varierar inom och mellan pelare är en utmaning för kvalitetsutvärderingen. Sondering är den standardiserade och vanligaste metoden för att erhålla pelarens skjuvhållfasthet i fält och de olika varianterna upplever ofta problem med att pelarnas hållfasthet är så hög att sonden styr ur. Att installera sonden under pelaren innan pelartillverkning, FOPS, kan vara ett sätt att kringgå utstyrning, för denna metod har resultatens representativitet ifrågasatts då testpelaren är känd innan tillverkning.

För att erhålla skjuvhållfastheten verkar valet stå mellan att försöka förbättra metoder som FOPS där sonden inte styr och hantera problemen förknippade med denna, eller att acceptera att sondering generellt inte fungerar på hårda pelare, utgå från att pelarnas hållfasthet erfarenhetsmässigt växer med djupet och nöja sig med vetskapen att designhållfastheten uppnås de översta omkring åtta meter som oftast går att testa med sondering. Mätning med temperatur och ERT kan verifiera resonemanget även om inga hållfasthetsvärden fås, en styrka i dessa metoder ligger troligen i att anomalier som svaga zoner kan uppfattas.

Att bindemedlet sprids ut och blandas in ordentligt i jorden är viktigt och får betydelse för pelarens homogenitet och därmed dess hållfasthetsegenskaper. Bestämning av homogeniteten har inte framkommit som nämnvärt intressant och dagens användning där främst hållfasthetens medelvärden eftersöks kan vara en anledning. Temperaturmätning och ERT verkar ha förutsättningar att ge information om bindemedelshydrationen och därigenom kanske bindemedelsspridningen, vilket i sin tur kan indikera hållfasthetsvariationen i pelaren. En fördel med metoderna är sannolikt också att upprepade mätningar kan ske över tid i samma pelare, med samma installation. Nyttan häri tillfaller kanske främst forskning på området.

Seismik verkar kunna ge uppfattning om hållfastheten över hela pelarlängden. Ifall metoden har svårigheter att mäta hela pelaren då svaga skikt påträffas riskerar den att förlora sitt syfte eftersom det är vanligt med heterogeniteter i kc-pelare och det är just homogenitetens variation över pelaren som kan ge indikation om hållfasthetsfördelningen. Det är inte helt klart hur tillämplig denna metod verkligen är i fält.

Kc-pelarnas permeabilitet kan ha betydelse för dess beständighet om den utsätts för strömmande vatten, det framstår dock finnas få metoder för att kontrollera vattengenomsläpligheten och likaså ett lågt intresse för detta. Anledningen kan vara, och är troligtvis, att låg pelarbeständighet inte verkar vara ett reellt problem.

Labbprovning för att utvärdera bindemedlet innan pelarinstallation och för att testa kvaliteten på prover från pelare tillverkade i fält framhålls som en viktig förutsättning för att förbättra möjligheterna till god pelarkvalitet. Det är komplicerat att tillverka labbprover som fullt ut beaktar förhållandena i fält och det är utmanande att få ett materialprov från en pelare att bete sig på labb som det skulle ha gjort inuti pelaren i fält. Dålig kvalitet på materialprover från pelare tillverkade med torrmetoden kan också göra dem svårtestade.

Installationsarbetet under borrens uppstigning och bindemedlets utmatning är noga reglerat och mycket data registreras av kc-pelarmaskinen. Neddrivningsarbetet är däremot inte kontrollerat. Att neddrivningsarbetet har betydelse för pelarens kvalitet har vidhållits av några intervjuade, som efterfrågar reglering och kontroll även av neddrivningen. Alla håller inte med om detta och en tillverkare av kc-pelare har erfarenheten att förändring av jordens ostörda struktur genom omrörning vid neddrivning kan leda till att jorden trycks upp ur marken. Utvärdering av neddrivningsarbetets eventuella inverkan på pelarkvaliteten kan således vara intressant.

Kombinationer av olika metoder eftersöks i intervjuerna, exempelvis av förstörande och ickeförstörande metoder. De generella önskemålen för metodutveckling är metoder som smidigt kan utföras i fält, helst utföras på enskilda pelare, kunna anpassas efter de aktuella förhållandena i fält och efter olika härdningstid samt ge statistiskt tillämpbara resultat.

För utveckling av en ny eller förbättrad metod har betydelsen av att specificera kontrollens syfte poängterats. Dels att klargöra vilken kvalitetsegenskap som ämnas kontrolleras och för vilken tillämpning denna egenskap är intressant, dels vem den tilltänkta användaren av metoden är; små projekt har inte samma möjlighet att utföra kontroll som stora projekt och kvalitetskraven kan variera mellan projekt.

6 Rekommendationer

Utifrån de resultat som framkommit i studien rekommenderas att vid utveckling av metoder för kvalitetskontroll reflektera över följande:

- Vilken materialegenskap som önskas kontrolleras och i vilket syfte
- Om metoden är ämnad att användas inom forskning eller produktion
- Om metoden blir kostnadseffektiv och smidig att utföra

Vidare rekommenderas att tillvarata önskemål om en öppen och branschgemensam dialog för att få en helhetsbild av behoven av ökad förståelse för kc-pelarnas beteende, beställares krav och utmaningarna ute i fält med tillverkningsprocess och kvalitetskontroll.

Specifikt för ASSERTs fortsatta arbete med utveckling av kvalitetskontroll med ERT rekommenderas att ta ställning till om metoden är ämnad för forskning om kc-pelares beteende eller för att effektivt kunna mäta pelarkvaliteten ute i fält för produktionstillämpning. Det senare ställer krav på att installations- och mätförfarande liksom bearbetning och tolkning av mätdata är användaranpassade.

Referenslista

- Alén, C. o.a., 2005. Testembankments on lime/cement stabilised clay. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 213-219.
- Andersson, N. & Norrman, T., 2004. *SD Arbetsrapport 33: Stabilisering av sulfidjord: En litteratur- och laboratoriestudie*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Axelsson, M., 2001. *SD Rapport 8: Djupstabilisering med kalkcementpelare – metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Baker, S., 2000. *SD Rapport 7: Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay*, Linköping: Sveriges geotekniska institut.
- Baker, S., Liedberg, N.-S.-D. & Sällfors, G., 1997. *Deformation properties of lime cement stabilised soil in the working state*. Konferens 14th ICSMFE, Hamburg, pp. 1667-1672.
- Baker, S., Sällfors, G. & Alén, C., 2005. Deformation properties of lime/cement columns. Evaluation from in-situ full scale tests of stabilised clay. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1, pp. 29-33.
- Bergman, N., Al-Naqshabandy, M. S. & Larsson, S., 2013. Variability of strength and deformation properties in lime-cement columns evaluated from CPT and KPS measurements. *Georisk*, 7(1), pp. 21-36.
- Bitir, A.-C., Muşat, V. & Larsson, S., 2015. Laboratory methods used to assess the mechanical properties of soft soils improved by deep mixing. *Bulletin of the polytechnic institute of Jassy - Construction & architecture section*, Issue 4, pp. 165-178.
- Burström, P.-G., 2007. *Byggnadsmaterial*. 2 red. Lund: Studentlitteratur.
- Cali, P., Woodward, M., Bruce, D. & Forte, E., 2005. Levee stability application for deep mixing (1) – Design for full scale test section using dry mixed soil cement columns. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 405-413.
- Carlsten, P., 2000. *Rapport 2:2000: Kalk- och kalkcementpelare: Vägledning för projektering, utförande och kontroll*, Linköping: Svenska geotekniska föreningen.
- Dahlin, T., Svensson, M. & Lindh, P., 1999. *DC resistivity and SASW for validation of efficiency in soil stabilisation prior to road construction*. EEGS'99, Budapest: Ls5.
- Dannewitz, N. o.a., 2005. *SD Arbetsrapport 35: Seismisk kontrollmetod för kc-pelare*, Linköping: Sveriges geotekniska institut.
- Dannewitz, N. & Rydell, B., 2003. *SD Arbetsrapport 32: Kalkcementpelare som jordförstärkning - hur kan vi åstadkomma rätt funktion? Projektering, utförande och kontroll: workshop*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Edil, T.-B., Staab, D.-A. & Alumbaugh, D.-L., 2004. *Non-destructive evaluation of cement-mixed soil*. GeoSupport Conference 2004, Orlando: American society of civil engineers.

- Eriksson, H., Gunther, J. & Ruin, M., 2005. MDM combines the advantages of dry and wet mixing. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 509-519.
- Fagerlund, G., 1999. *Mognadsgrad och mognadsålder för bedömning av betonghållfasthet*. Fagerlund, G.
- Guimond-Barrett, A., Szymkiewicz, F., Le Kouby, A. & Anne, P., 2013. *Resonance testing of in situ deep mixed soil*. Conference proceedings, 5iYGEC, Paris: Subgrade improvement with the technique of deep soil mixing.
- Haglund, E. & Nilsson, E., 2001. *SD Arbetsrapport 18: Kalk och kalkcementpelare – jämförelse mellan laboriestedabilisering och pelarinstallation*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Hedman, P. & Koukkanen, M., 2003. *SD Arbetsrapport 29: Hållfasthetsfördelning i kalkcementpelare - fältförsök i Strängnäs*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Holm, G., 2002. *SD Arbetsrapport 22: International workshop on deep mixing technology for infrastructure development: current practice and research needs*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Jelisić, N. & Nilsson, G., 2005. Testing of the shear strength of cement columns by using the total sounding method. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 527-531.
- Johansson, S., 2018. *Fullskaleförsök DDM (Dry Deep Mixing) i passivzon, delprojekt E02 Centralen, Västlänken. Bilaga J.2 Temperatur (enskild pelare)*, u.o.: Trafikverket.
- Johansson, S.-E., Åhnberg, H. & Pihl, H., 2005. *SD Arbetsrapport 36: Beständighet hos djupstabiliserad jord*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Kangas, H. & Korhonen, O., 2005. The most significant improved land areas in Helsinki using deep mixing method. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 539-545.
- Karlsson, M., Holm, G. & Säfström, L., 2001. *SD Arbetsrapport 21: Erfarenhetsbank - Etapp 2: erfarenhetsåterföring*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Keller, u.d. *Deep soil mixing (DSM): Improvement of weak soils by the DSM method. Brochure 32-01E*. [Online]
Available at: <https://www.kellerholding.com/deep-soil-mixing.html>
[Använd 10. 03. 2020].
- Kock-Larsen, J., 2013. *Korrelation mellan hållfasthet i kalkcementpelare och oförstärkt lera*, Examensarbete 13/06, Stockholm: Kungliga tekniska högskolan.
- Larsson, R., 2006. *SD Rapport 17: Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering - en vägledning*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Larsson, R., 2008. *Information 1: Jords egenskaper*, Linköping: Statens geotekniska institut.

- Larsson, S., 2000. *SD Rapport 6: Blandningsmekanismer och blandningsprocesser - med tillämpning på pelarstabilisering*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Larsson, S., 2005. On the use of CPT for quality assessment of lime-cement columns. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 555-560.
- Larsson, S., 2005. State of practice report - execution, monitoring and quality control. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 2, pp. 732-785.
- Larsson, S. & Bergman, N., 2013. Alternativ metod för verifiering av hållfasthet hos kalkcementpelare. *Bygg & Teknik*, Issue 1, pp. 75-79.
- Larsson, S., Dahlström, M. & Nilsson, B., 2002. *SD Arbetsrapport 23: Studie av inverkan av faktorer i blandningsprocessen vid djupstabilisering med kalkcementpelare - Fältförsök i Håby*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Larsson, S., Dahlström, M. & Nilsson, B., 2005. A complementary field study on the uniformity of lime-cement columns for deep mixing. *Ground Improvement*, 9(2), pp. 67-77.
- Larsson, S. & Nilsson, L., 2005. Findings of the work on influencing factors on the installation process. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 561-569.
- Lawson, C. H., Spink, T. W., Crawshaw, J. S. & Essler, R. D., 2005. Verification of dry soil mixing at port of Tilbury, UK. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 453-461.
- Lindh, P., Dahlin, T. & Svensson, M., 2000. *Comparisons between different test methods for soil stabilisation*. ISRM International Symposium 2000, IS 2000, Melbourne, Australia.
- Liu, S., Zhang, D. & Zhu, Z., 2009. *On the uniformity of deep mixed soil-cement columns with electrical resistivity method*. U.S.-China Workshop on Ground Improvement Technologies 2009, Orlando.
- Löfroth, H., 2005. *SD Arbetsrapport 34: Långtidsegenskaper hos kalkcementpelare – en studie av 10 år gamla kalkcementpelarförstärkningar*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Nilsson, A. & Larsson, S., 2008. Hållfasthet i kalkcementpelare - nya testrutiner förbättrar kvalitetskontrollen. *Väg- och vattenbyggaren*, Issue 4, pp. 48-51.
- Olsson, P.-I., Rejkjær, S. & Dahlin, T., 2019. *Field-scale quality control of lime-cement pillar in conductive clay using electrical resistivity tomography*. European association of geoscientists and engineers, Volym 2019, pp. 1-5.
- Porbaha, A., Ghaheri, F. & Puppala, A. J., 2005. Soil cement properties from borehole geophysics correlated with laboratory tests. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 605-611.

- Puppala, A. J., Bhadriraju, V. & Porbaha, A., 2005. Quality assurance practices and protocols for in-situ testing of deep mixed columns. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 613-617.
- Raju, V. & Abdullah, A., 2005. Ground treatment using dry deep soil mixing for a railway embankment in Malaysia. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 469-475.
- SGF:s Jordförstärkningskommitté, 2003. *Metodblad jordförstärkningsmetoder*. u.o.:Svenska geotekniska föreningen.
- SGF:s Jordförstärkningskommitté, 2005. *Metodblad 1 KC-pelare*. u.o.:Svenska geotekniska föreningen.
- SGF, 2013. *SGF Rapport 1:2013. Geoteknisk fälthandbok*, Göteborg: Svenska geotekniska föreningen.
- Styles, P., 2012. *Environmental geophysics*. Houten: European association of geoscientists och engineers publications.
- Trafikverket, 2014. *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13*, u.o.: Trafikverket.
- Tremblay, M., 2000. *SD Arbetsrapport 17: Kalkcementpelarförstärkning för bro - funktionsuppföljning*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Usui, H., 2005. Quality control of cement deep mixing method (wet mixing method) in Japan. *SD Rapport 13: International conference on deep mixing, best practice and recent advances*. Linköping: Statens geotekniska institut, Volym 1.2, pp. 635-638.
- Walthall, S., 1990. *Packer testing in geotechnical engineering*, London: The geological society.
- Viberg, L., Eriksson, B. & Johansson, S., 1998. *SD Arbetsrapport 8: KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland-Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar*, Linköping: Statens geotekniska institut.
- Wood, T., 2018(a). *Fullskaleförsök DDM (Dry Deep Mixing) i passivzon, delprojekt E02 Centralen, Västlänken. Bilaga J.1: Produktionsuppföljning KC fält. Hållfasthet (FKPS, CPTU, FOPS)*, u.o.: Trafikverket.
- Wood, T., 2018(b). *Fullskaleförsök DDM (Dry Deep Mixing) i passivzon, delprojekt E02 Centralen, Västlänken.*, u.o.: Trafikverket.
- Yohannes, M. & Daramalingam, J., 2019(a). *Specifying strength properties of soil mixing and jet grouting in Malaysia: A statistical approach*, Kuala Lumpur, Malaysia: 1st Malaysian Geotechnical Society (MGS) and Geotechnical Society of Singapore (GeoSS) Conference 2019.

Yohannes, M. & Daramalingam, J., 2019(b). *Specifications, sampling methods and correlations of engineering properties for deep soil mixing and jet grouting in Malaysia*, Singapore: International Conference on Case Histories and Soil Properties.

Åhnberg, H., 2006. *Rapport 72: Strength of stabilised soils: A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binders*, Lund: KFS Lund AB.

Åhnberg, H. & Holmén, M., 2011. Assessment of stabilised soil strength with geophysical methods. *Ground Improvement*, 164(3), pp. 109-116.

Åhnberg, H. o.a., 1995. *Rapport 48: Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk-fysikalisk studie av stabiliseringseffekter*, Linköping: Statens geotekniska institut.