

## ASSERT - KONTROLL AV MARKSTABILISERING MED RESISTIVITETSTOMOGRAFI

**Per-Ivar Olsson<sup>A,B</sup>, Mikael Lumetzberger<sup>A</sup>, Per Hedblom<sup>A</sup>, Torleif Dahlin<sup>A</sup>**

**<sup>A</sup> Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet**

**<sup>B</sup> Föredragshållare**

### SAMMANFATTNING

Markstabilisering blir allt vanligare för exploatering av områden med dålig bärighet men det finns dock ett behov av bättre och volymstäckande kontrollmetoder för kvalitetssäkring. Kontrollmetoderna kan delas upp i två steg, där det första sker i omedelbar anslutning till inblandning av bindemedel för att kontrollera om man lyckats behandla hela den avsedda volymen, eller om det finns zoner som behöver komplettering. Det andra steget avser kontroll av hur effektiv stabiliseringen har varit med avseende på mekaniska egenskaper.

ASSERT (Assessment of Soil Stabilization using Electrical Resistivity Tomography) är ett pågående forskningsprojekt med fokus på kvalitetskontroll i omedelbar anslutning till inblandning av bindemedel och baseras på elektrisk resistivitetstomografi (ERT). ERT-metoden har i flera fall visats vara effektiv för att avgränsa den markvolym som har behandlats med bindemedel från obehandlade delar. Metoden skulle kunna användas för att snabbt kontrollera resultatet av stabiliseringen, så att kompletterande åtgärder i zoner med otillräcklig inblandning kan vidtas medan personal och utrustning finns på plats. Test och verifiering av metoden kommer ske i olika geomaterial och skalor, inklusive fullskaletester för olika typer av stabilisering. Vidare ingår metodutveckling och anpassning för tillämpningen, så att metoden i slutändan blir tillräckligt robust och snabb för att kunna användas på ett hållbart sätt.

### SUMMARY

Ground improvement with lime-cement pillars is becoming increasingly common in the Nordic countries for exploitation of areas with poor stability. However, there is a need for non-destructive methods for volumetric quality control of the ground improvement. The quality control can be divided into two steps where the first include quality control at the installation process with monitoring of production parameters such as rotation and penetration speed, air pressure and binder feed rate. The second step involves determining the spatial continuity and the mechanical properties of the treated subsurface after curing by for example a reversed pillar penetration test, complete exposure or core drilling.

ASSERT (Assessment of Soil Stabilization using Electrical Resistivity Tomography) is an on-going research project with focus on quality control in direct connection with

mixing of the binders based on electrical resistivity tomography (ERT). The ERT-method has in several cases been shown to efficiently differentiate treated soil from untreated. Hence, is the method an interesting option for direct and rapid volumetric quality control of the stabilized soil so that zones which needs to be supplemented can be identified at production stage while personnel and equipment are at site. The ASSERT project involves test and verification of the method in different geological environments and scales, including full-scale tests for different types of stabilization techniques. Additionally, method development and adaptations to make the quality control applicable are also included in the project to enable a robust, rapid and sustainable use in routine operations.

## 1 BAKGRUND

Markstabilisering blir allt vanligare för exploatering av områden med dålig bärighet, som följd av att det medför stora ekonomiska besparingar jämfört med alternativa metoder. I många fall är markstabilisering det enda praktiskt och ekonomiskt genomförbara alternativet. Det ger också möjlighet att utnyttja lokalt material som annars skulle blivit ett deponeringsproblem och bidrar till reducerat transportbehov, eftersom transporter av bortschaktat material och ersättningsmassor elimineras.

Det finns flera olika metoder för markstabilisering, i projektet behandlas främst KC-pelare, jetinjektering och masstabilisering. *KC-pelare* görs genom att ett blandningsverktyg förs ner i marken till önskat djup och när verktyget dras upp matas torrt bindemedel ut under rotation. Pelarna utförs normalt i rader, eller så tätt att de bildar skivor eller block. *Jetinjektering* används för att tillverka cementstabiliserade pelare i marken på plats, s.k. jetpelare. Tillverkningen sker genom att man borrar sig ned till planerat djup och därefter samtidigt som borren roteras tillbaka till markytan injektera en cementsuspension under högt tryck. *Masstabilisering* utförs genom att lösa material som lera, slam och torv på plats blandas med ett torrt bindemedel för att skapa en stabil yta som underlag för någon form av byggande. Bindemedlet blandas ned i materialet som ska stabiliseras med något som kan liknas vid en stor visp.

Oavsett stabiliseringsmetod finns behov av bättre kontrollmetoder, det vill säga metoder som på ett tids- och kostnadseffektivt sätt verifierar att utfallet av stabiliseringen är som avsett och kvantifierar den stabiliserade volymens egenskaper. I fallet pelare är det viktigt att de är kontinuerliga och det inte finns djupintervall utan eller med ringa stabilisering, eftersom det leder till att de inte fungerar som avsett vilket kan få dramatiska konsekvenser. Slutresultat av stabiliseringen påverkas av typ av jordmaterial, typ av bindemedel och tekniska parametrar i samband med inblandningen av bindemedlet. Variation i jordmaterialets sammansättning, till exempel omväxlande lager av sand och organiska sediment, kan leda till oönskad heterogenitet. Vidare kan fel i utrustning och dess handhavande påverka resultatet. Kvalitetskontroll kan göras genom att borra ut kärnor, eller gräva ut hela testpelare i fallen KC-pelare eller jetpelare, vilket är både kostsamt och förstörande.

Kontrollen kan delas upp i två steg, där det första består av att kontrollera om hela den avsedda volymen behandlats eller om det behövs kompletterande insatser i delar av volymen. Det andra steget avser kontroll av hur effektiv stabiliseringen har varit med avseende på mekaniska egenskaper. Den första kontrollen behöver ske i direkt anslutning till att stabiliseringen utförs, så att komplettering kan göras medan utrustning och manskap finns på plats och innan bindemedlet har härdat i behandlade delar av volymen. I detta skede har ringa stabilitetstillväxt skett eftersom bindemedlet inte hunnit härda, varför seismiska metoder inte är aktuella. Det finns däremot flera dokumenterade exempel på att de elektriska egenskaperna förändras drastiskt när bindemedel blandas ner i marken (Dahlin et al., 1999; Lindh et al., 2000; Vincent et al., 2017). Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) är därför ett intressant alternativ för att kartlägga vilka delar av den aktuella volymen som har behandlats och identifiera zoner som behöver kompletteras. Mooney & Bearce (2017) har visat att man kan uppskatta verklig diameter på jetpelare inom 5% inom ett intervall av 0,9 till 2,5m. För att detta ska fungera i rutintillämpning måste metoden dock vidareutvecklas och anpassas så att den blir tillräckligt robust och enkel att handha i de krävande miljöerna som är aktuella. Vidare att resultaten redovisas tillräckligt snabbt i en form som gör att de kan användas för återkoppling till entreprenören. Vidare behöver metoden utvärderas i olika typer av jordar, där t.ex. den låga resistiviteten i saltvattenavsatta leror kan utgöra en möjlig begränsning för användbarheten.

En annan parameter som förändras snabbt efter att bindemedlet blandats i är temperaturen, som höjs när bindemedlet härdar. Temperaturmätning har därför använts för att ge ett mått på variationer i homogenitet längs jetpelare. Det kräver dock att temperatursensorer installeras i pelarna, och traditionella sensorer är relativt dyra. När bindemedlet härdat kan seismiska mätningar användas för oförstörande kvalitetskontroll (till exempel Lin et al., 2017). ERT skulle kunna vara ett komplement till seismiken för att i kombination ge bättre 3D modeller. Under härdningen ökar resistiviteten successivt, så att det efter härdning går att hitta samband mellan resistivitet, SPT (standard penetration test) och tryckhållfasthet (Liu et al. 2008; Zhang et al. 2012).

## 2 ASSERT-PROJEKTET

ASSERT-projektets mål är att utveckla volymstäckande kontrollmetoder för markstabilisering, som kan användas rutinmässigt för att säkerställa att hela den avsedda markvolymen har behandlats med tillräckligt bra resultat. Kontrollmetoderna är tänkta som första steget i kvalitetskontrollen och ska i omedelbar anslutning till att stabiliseringen, med syfte att detektera ifall delar av markvolymen inte blivit ordentligt behandlad. Därigenom kan det åtgärdas medan utrustning och personal fortfarande är på plats. Denna del utförs med hjälp av elektrisk resistivitetstomografi (ERT) vilket fungerar i detta skede eftersom de sker en förändring i markens ledningsförmåga när den blandas med cement eller kalk. Kontroll av hur effektiv stabiliseringen har varit med avseende på styvhet och mekaniska egenskaper kan inte

ske omedelbart efter stabiliseringen har utförts då det kräver reaktionstid på dagar eller veckor innan materialet har härdat tillräckligt. Den kontrollen skulle kunna ske med hjälp av seismik, men det ingår inte i detta projekt. Projektet drog igång med full bemanning under 2019 är planerat att pågå till och med 2021.

## 2.1 Forskningsfrågor

Forskningsdelen i ASSERT har fokus på att besvara följande frågor:

- Fungerar metoden i alla typer av jordmaterial, eller blir resistivitetskontrasten för dålig i vissa konduktiva jordar såsom marint avsatt lera?
- Hur väl kan den stabiliserade volymen avgränsas för olika typer av stabilisering?
- Kan resistiviteten användas för att ge ett relativt mått på mängd bindemedel?
- Hur bra geometrisk upplösning kan man uppnå med olika mätupplägg i förhållande till vad som krävs för kvalitetskontroll av stabiliserade pelare resp. masstabilisering?
- Hur lång tid efter bindemedelsinblandning är det optimalt att göra ERT för kontroll? Hur förändras resistiviteten med tiden efter inblandningen?
- Hur ska elektrodprober designas och byggas för att kunna installeras och avinstalleras på ett tids- och kostnadseffektivt sätt samtidigt som de ger tillräckligt bra upplösning?
- Vilka mätstrategier och mätkonfigurationer är mest lämpliga med avseende på tillräckligt bra upplösning på ett tids- och kostnadseffektivt sätt för olika typer av stabilisering? Vad innebär detta för utformningen av mätinstrumenten?
- Vilka mättekniska krav ska ställas på mätinstrumenten? Kan man få tillräckligt bra resultat med så liten mätström att det är ofarligt ur personsäkerhetssynpunkt?

## 2.2 Metodutveckling

Utvecklingsdelen syftar till att utveckla ett optimerat verktyg för kvalitetskontroll av markstabilisering i omedelbar anslutning till inblandningen av bindemedel. Optimeringen innebär att metoden ska göras tillräckligt robust för att användas i alla väder i den tuffa miljö det rör sig om. Vidare ska den vara tillräckligt snabb för att ge resultat medan den utrustning och personal som utför stabiliseringen är på plats, och kan göra kompletteringsarbeten utan ny mobilisering. Verkyget ska tas fram genom anpassning och utveckling av ERT, med syfte att göra metoden robust och lättanvänd med rutinemässig användning som kontrollmetod. Personsäkerhet är en viktig fråga eftersom de ERT instrument som normalt används skickar ut mätsignaler med ström och spänning på nivåer som kan vara skadliga om de används på ett felaktigt sätt. Detta kräver utveckling och anpassning av såväl hårdvara som mjukvara.

### 2.3 Resultatspridning och implementering

Ett viktigt steg i projektet är att demonstrera tekniken i full skala i verkliga projekt, och de fältförsök som planeras inom ramen för detta projekt avses vara en del av detta. Detta öppnar förhoppningsvis möjligheter för att testa tekniken i ytterligare projekt, vilket kan bana väg för användning på bredare front. Utvecklingsdelen i projektet är tänkt att leda fram till fungerande prototyper för specialanpassade användarvänliga och snabba mätinstrument och programvaror, med avsikten att de ska göras tillgängliga för de aktuella aktörerna i branschen (det vill säga främst konsulter och entreprenörer).

## 3 PROJEKTAKTIVITETER

Projekttaktiviteter framskrider parallellt på flera fronter, här presenteras dels vilka aktiviteter som är tänkta att utföras i projektet dels sådana som redan är avklarade.

### 3.1 Utveckling och anpassning av utrustning och programvara

Elektrodprober för ERT som medger tids- och kostnadseffektiv kvalitetskontroll av KC-pelare och jetpelare ska utvecklas. Viktiga egenskaper är anpassbarhet och robusthet. Inledande testmätning för verifiering och kalibrering av designen utförs med hjälp av befintlig utrustning.

Provhållare ska designas för laboriemätningar med inbyggda elektroder för resistivitetsmätning. Test och verifiering, samt om så erfordras, modifiering av designen, utförs innan de börjar användas rutinmässigt. Design och utveckling av en prototyp till ett specialanpassat mångkanaligt robust fältinstrument för extra snabb ERT med anpassat lättanvänt användargränssnitt. Mätdata ska automatiskt skickas upp till en server i direkt anslutning till datainsamlingen, och visualiserade resultat snabbt bli tillgängliga via robust läsplatta eller fältdator. Detta möjliggörs genom webbaserad lösning för automatiserad datakvalitetskontroll, och vid behov automatisk filtrering av data. Vidare snabb inversmodellering av ERT data och visualisering på plats för att ge möjlighet att bedöma behov av komplettering och vägleda det fortsatta arbetet.

Hittills i projektet har design tagits fram för relativt billiga elektrodkablar för installation i KC-pelare och ett antal prototypkablar har tillverkats. En studie för nytt och snabbare ERT-instrument har genomförts och lämpliga komponenter har identifierats och valts ut. Prototyp för mångkanalig mottagardel är tillverkad. Arbetet med att automatisera och snabba upp datahanteringsflödet har haft huvudfokus på effektivisering och stabilisering av algoritmer för signalbehandling och filtrering av rådata. Detta har gjort att det steget blivit flera gånger snabbare. Numerisk modellering av provbehållare för laboriemätningar har genomförts, vars resultat har diskuterats med en verkstad för tillverkning av en prototyp.

### 3.2 Numerisk modellering

Numerisk modellering kommer användas som verktyg för design av elektrodprober. Vidare för att utvärdera hur små zoner som man har missat att behandla som går att detektera. Upplösning av mätningen är beroende på om man mäter från ytan eller med borrhålelektroder, och det kan vara nödvändigt att hitta en lämplig kombination av dessa. Numerisk modellering kommer också användas för att simulera olika undersökningsscenarier, med optimering av upplösning och mättid. Slutdesignen av prototypinstrumentet kommer baseras på bland annat detta.

Numerisk modellering för att utvärdera några olika designidéer av provbehållare till laborieförsök har gjorts i COMSOL Multiphysics®.

### 3.3 Laborieförsök

Laborieförsök utförs på prover med olika mängd bindemedel inblandade i proverna för att utreda hur stor kontrast i elektriska egenskaper det blir för olika typer av jordar i kombination med olika bindemedelsinblandning. I detta fall ska mätning ske i nära anslutning till inblandningen av bindemedel, samt i ett antal tidssteg för att kunna bedöma när det är optimalt att göra kontrollen. Kontrasten i resistivitet mellan behandlad och obehandlad jord är en viktig parameter för metodens upplösningsförmåga.

Vidare ska laborieförsöken ligga till grund för att utreda och ta fram eventuellt samband mellan mängd och typ av bindemedel, resistivitet, skjuvvågshastighet och skjuvhållfasthet, vilket måste ske efter att härdning skett. Mätningarna görs med de utvecklade provbehållarna försedda med elektroder och böjelement, samt med enaxiella tryckförsök. Genom detta kan man eventuellt också ta fram samband som gör att man kan koppla de elektriska egenskaperna till relativ halt av bindemedel eller relativ styvhet. Kombinerat med andra data skulle detta kunna användas som ett hjälpmedel för interpolering och extrapolering av punktmätta egenskaper.

Ingen laborieförsöksaktivitet har ägt rum då utrustning för mätning i provbehållare ej ännu är tillverkad och utprovad.

### 3.4 Fullskaliga fälttester

Fullskaliga fälttester kommer genomföras i anslutning till planerade projekt med markstabilisering med olika typer av stabiliseringsteknik, med fokus på KC-pelare, jetpelare och masstabilisering. Genom att gräva ut stabiliserade pelare respektive genom borrhåle i stabiliserade volymer skulle det vara möjligt att utvärdera hur väl ERT lyckades avgränsa den behandlade volymen.

Dessa försök utförs i nära samverkan med respektive entreprenör, och i samråd med respektive problemägare. ERT utförs så snart det är möjligt att få tillträde, data tolkas med inversion och visualiseras ”on-line” så att resultaten kan användas för att bedöma eventuella behov av kompletterande bindemedelsinblandning i delar av den stabiliserade volymen. En stor del av mätförsöken kommer utföras med tillfälligt



installerade elektroder som avlägsnas efter slutförd mätning. Detta är en viktig del i test och utvärdering av metodanpassningen, då det är viktigt att snabbt kunna installera och avinstallera mätutrustningen i praktisk tillämpning. Det är inte säkert att det är möjligt att bygga så billiga elektrodsträngar för test av pelare att det är ekonomiskt försvarbart att lämna dem kvar i konstruktionen i alla lägen, utan att man vill kunna återanvända dem. Ytelektroder installeras på de stabiliserade ytorna i direkt anslutning till att bindemedlet blandats i de massor som ska stabiliseras för samtliga stabiliseringsmetoder. Försök kommer också göras med permanent installerade elektroder som gjuts in i konstruktionen för att kunna följa resistivitets förändring under härdningsförloppet. Elektrodsträngar installeras i utvalda pelare i fallen KC- och jetpelare. Plattelektroder installeras ytligt i de stabiliserade ytorna så att ändkontaktdonen på elektrodablarna förblir åtkomliga efter att överlasten lagts på.

Flera möjligheter att göra tester i anslutning till verkliga projekt förväntas infalla innan optimerat instrument och programvara hunnit utvecklats tillräckligt långt. I dessa fall kommer mät försök, databearbetning, tolkning och visualisering av resultaten göras med befintlig utrustning och programvara. Mätresultaten kommer kunna användas för test av delar av dataflödet i de specialanpassade lösningar som utvecklas, och för kalibrering av programvaran. Efterhand som utvecklingen framskrider kommer de utvecklade prototyperna användas.

### 3.5 Fälttester KC-pelare vid Västlänken

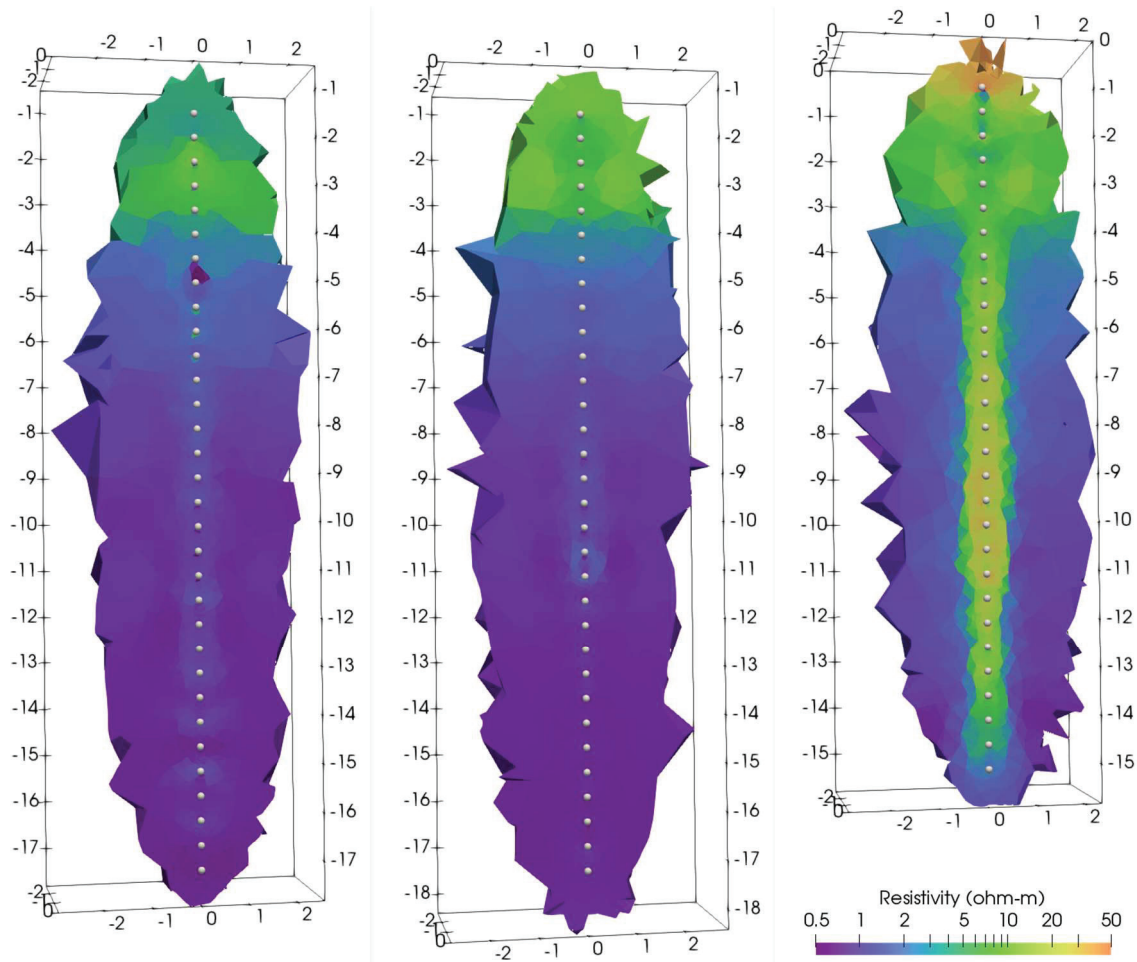
De första testerna (Figur 1) utfördes vid Västlänken sommaren 2018 på KC-pelare innan, vid och efter stabilisering. Testerna visade på att det går att få elektrisk kontrast för behandlad och obehandlade massor även i marint avsatt lera men att det finns utmaningar i tolkning av data som behöver lösas (Olsson et al., 2019).



Figur 1. Första fälttester med ERT i Göteborg, sommaren 2018. Här användes ERT-kablar till för borrhålsmätning i slitsade grundvattenrör.

Tabell 1. Sammanfattning av dataset från de första testerna.

Dataset	Topp (m)	Botten (m)	Utsträckning (m)	Datapunkter
Innan stabilisering	-1.6	-17	15.5	568
Vid stabilisering	-1.6	-17	15.5	606
Efter stabilisering	-1.0	-15	14	468



Figur 2. Inversmodeller för det första fälttesterna för dataset från innan, vid och efter stabilisering (från vänster till höger). De färgade volymerna visar resistivitet för modellerna inom ett område som bedöms ha hög modellsäkerhet (modelltäckning över 1). De vita prickarna markerar elektroddimensionerna.

I uppföljande fälttester har installation i KC-pelare med hjälp av KC-rigg i Västlänkenprojektet testats i nära samarbete med entreprenören. Testet visade att den relativt billiga kabeldesignen var tillräckligt robust och olika bottenförankringsdon har testats för att hitta ett utförande som gör att mätkabeln stannar kvar i marken när borrstålet dras upp. Utvärdering av mätdata från försöken har ännu ej utförts i skrivande stund.





*Figur 3. Uppföljande fälttester med ERT i Göteborg, hösten 2019. Här installerades specialdesignade, relativt billiga, ERT-kablar i KC-pelare. Riggen till vänster är redo att börja producera KC-pelare medan den högra riggen står beredd att direkt installera bottenförankringsdon och mätkabel.*

### 3.6 Andra aktiviteter

Två examensarbeten pågår inom ramen för projektet. Ett arbete vid Lunds universitet (Teknisk Geologi) har fokus på branschens olika behov av kvalitetssäkring, det andra arbetet vid Göteborgs Universitet (Geovetarcentrum) har fokus på mätförsök.

## 4 FORTSÄTTNING I NÄRTID

Arbetet med projektets olika aktiviteter kommer fortsätta med samma bemanning under 2020. Fokus kommer ligga på att tillverka och utvärdera provhållare för laboriemätningar samt motsvarande för instrumentprototyp för snabbare fältmätningar. Val av optimala mätprotokoll och utlägg ska också studeras genom numerisk modellering. Om lämpliga tillfällen för ytterligare fälttester dyker upp kommer vi även utföra ytterligare fälttester. Detta kan till exempel vara jetinjekteringar eller masstabiliseringar i lämpliga geologiska miljöer eller utökade undersökningar av gitter med KC-pelare, men det är viktigt att försöken kan utföras på ett systematiskt sätt så att resultaten från testerna blir användbara.

Under arbetets gång har det även diskuterats möjligheter kring att använda sig av ett loggingförfarande som ersätter ett fullt utlägg för att undvika hantering av långa mätutlägg samt underlätta installation och avinstallation. Detta skulle eventuellt kunna fungera som en utökad CPT-R med fler elektroder. Generellt bör utveckling av sådan utrustning även beakta instrumentering för att mäta frekvensberoende uppladdningsegenskaper, alltså ett loggingsystem för att mäta spektral inducerad polarisation, utöver resistivitet.

## 5 ERKÄNNANDEN

Arbetet har utförts inom InfraSweden2030 projektet “Kvalitetskontroll av markstabilisering med elektrisk resistivitetstomografi” (Vinnova project id 2018-00649) finansierat av Vinnova, Formas, Energimyndigheten, SBUF, Trafikverket, NCC and PEAB. Vi vill tacka NCC, Svenska dmix AB, SMG (Soil Mixing Group), MiljöGeo i Västervik AB och HydroResearch AB för utmärkt samarbete under fälttesterna. Andres Saul Gonzales Amaya och Simon Rejkjær på Teknisk Geologi, Lunds universitet, möjliggjorde fälttesterna sommaren 2018.

## 6 REFERENSER

- Dahlin, T., Svensson, M., Lindh, P., 1999. *DC Resistivity and SASW for validation of efficiency in soil stabilisation prior to road construction*, in: 5th EEGS-ES Meeting. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406466>
- Lin, C.-H., Lin, C.-P., Dai, Y.-Z., Chien, C.-J., 2017. *Application of surface wave method in assessment of ground modification with improvement columns*. J. Appl. Geophys. 142, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.05.007>
- Lindh, P., Dahlin, T., Svensson, M., 2000. *Comparisons between different test methods for soil stabilisation*, in: ISRM International Symposium 2000, IS 2000.
- Mooney, M.A., Bearce, R.G., 2017. *Assessment of Jet Grout Column Diameter during Construction Using Electrical Resistivity Imaging*, in: Grouting 2017. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 42–51. <https://doi.org/10.1061/9780784480809.005>
- Olsson, P., Rejkjær, S., Dahlin, T., 2019. *Field-Scale Quality Control of Lime-Cement Pillar in Conductive Clay Using Electrical Resistivity Tomography*, in: Near Surface Geoscience 2019- 1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM. European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902561>
- Vincent, N.A., Shivashankar, R., Lokesh, K.N., Jacob, J.M., 2017. *Laboratory Electrical Resistivity Studies on Cement Stabilized Soil*. Int. Sch. Res. Not. 2017, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/8970153>