

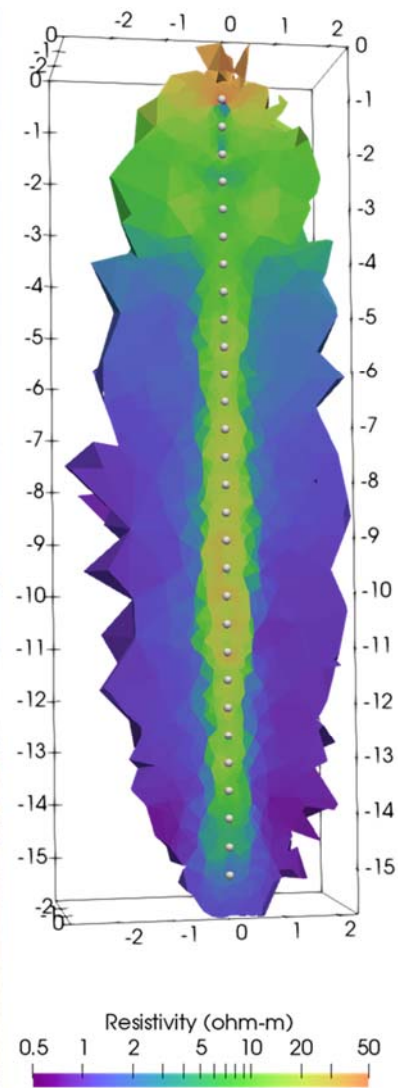
SBUF 13581, TRV 2018/113651, VINNOVA 2018-00649

## Kvalitetskontroll av markstabilisering med elektrisk resistivitetstomografi

### ASSERT (Assessment of Soil Stabilisation using Electrical Resistivity Tomography)

Torleif Dahlin

Teknisk geologi, LTH/Lunds universitet



2024-02-16

ISRN LUTVDG/(TVTIG-3102)/1-47/(2024)

## Förord

Detta arbete har utförts inom ramen för projektet Kvalitetskontroll av markstabilisering med elektrisk resistivitetstomografi / ASSERT (Assessment of Soil Stabilisation using Electrical Resistivity Tomography). Finansiering som möjliggjorde detta arbete tillhandahölls av SBUF - Svenska byggbranschens utvecklingsfond (dnr 13581), Trafikverket (TRV 2018/113651), och InfraSweden/Vinnova-Formas-Energimyndigheten (dnr 2018-00649). Vidare bidrog NCC AB, PEAB AB och Keller Grundläggning AB med naturinsatser.

Tack till:

- Projektgruppen på Teknisk geologi, LTH, för utmärkta insatser och stimulerande samarbete inom ramen för projektet, som bestod av:
  - Per Hedblom (forskningsingenjör)
  - Mikael Lumetzberger (doktorand)
  - Per-Ivar Olsson (postdoktor)
  - Simon Rejkjær (forskningsingenjör)Material i rapporten som saknar referenser är framtaget av projektgruppen.
- Samarbetsparterna i projektet, med följande kontaktpersoner:
  - Martin Holmén, SGI
  - Lars Nilsson, NCC AB
  - Nils Rydén, PEAB AB
  - Ronald Veider, Keller Grundläggning AB
- Referensgruppen för bidrag med goda råd och synpunkter:
  - Helgard Anschütz, NGI.
  - Håkan Eriksson, GeoMind
  - Leif Jendeby, COWI
  - Per Lindh, Trafikverket
  - Lovisa Moritz, Trafikverket
  - Tara Wood, Ramböll
- Kollegorna på Teknisk geologi, LTH, för stöd av allehanda slag.
- Personalen från NCC, SMG (Soil Mixing Group), MiljöGeo i Västervik AB och HydroResearch AB för gott samarbete under fälttesterna med KC-pelare vid Västlänken 2018. Vidare Andres Gonzales Amaya från Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, hjälp med att genomföra mätningarna.
- Svenska Dmixab AB för tillhandahållande av resurser och bra samarbete under fälttesterna med KC-pelare vid Västlänken 2019.
- SMG (Soil Mixing Group) för tillhandahållande av resurser och gott samarbete i samband med testerna med KC-pelare i Bålsta 2020. Filip Buczynski för hjälp med genomförandet av försöken.
- Skanska AB för tillmötesgående vid testmätningen på en stabiliserad yta vid ESS.
- PEAB AB för samarbete kring inledande mät försök med jetpelare i Örebro 2021.
- Keller Grundläggning AB för tillhandahållande av resurser och trevligt samarbete kring fälttesterna med jetpelare i Moss 2022.

- Martin Holmén med kollegor i SGIs laboratorium för bra samarbete i samband med försökserien med KC-stabilisering där.
- Mohammadhossein Gholampoor, Lars Wadsö, Stefan Backe och Per Lindh för bra samarbete i samband med försökserierna med stabilisering av muddermassor i LTHs laboratorium, i samverkan med SBUF-projekt 13692 "Metodik för stabilisering av muddermassor".
- Stefani Maždin, Rebecka Knutsson, Edvin Nilsagård och Mårten Petersson för utmärkta insatser och trevligt samarbete i samband med deras respektive examensarbeten. Vidare Per-Ivar Olsson, Mikael Lumetzberger, Tina Martin och Peter Jonsson, Teknisk geologi, LTH, samt Anders Bergström, NCC, för handledning av examensarbetena.
- Thomas Günther, LIAG (Leibniz Institute of Applied Geophysics), Hannover, Tyskland, för stöd i samband med användande av pyBERT/pyGIMLi.
- Anders Vest Christiansen och Andrew Kass, Aarhus Universitet, Danmark, för stöd i samband med användande av AarhusInv.

#### Omslagsbild

Foto: Torleif Dahlin    Grafik: Per-Ivar Olsson

## Sammanfattning

Projektet har fokus på kvalitetskontroll av markstabilisering med elektrisk resistivitetstomografi (ERT). Stabilisering kan göras i form av KC-pelare, jetpelare, ytstabilisering och masstabilisering, genom inblandning av cement, kalk, slagg, flygaska eller kombinationer av dessa. Markstabilisering kan vara mycket attraktivt för såväl miljö som ekonomi, men det finns behov av bättre metoder för kvalitetskontroll.

Resultaten visar att ERT har stor potential för av volymstäckande icke-förstörande kvalitetskontroll. Detta har visats genom laboratorieförsök med KC-stabilisering av lerjord och stabilisering av muddermassor med en blandning av cement och slagg som kombinerats med seismisk mätning och hållfasthetstest på proverna. Vidare genom fältförsök med fältmätning i KC-pelare och jetpelare.

Inblandning av bindemedel leder till att resistiviteten minskar, genom tillförsel av joner och genom att temperaturen ökar. Detta gör att metoden kan användas för att kontrollera resultatet av stabiliseringen i direkt anslutning till att den utförts, så att kompletterande åtgärder i zoner med otillräcklig inblandning kan vidtas medan personal och utrustning finns på plats. Kontrasten blir sämre i konduktiva jordar såsom marint avsatt lera, vilket i vissa geomiljöer kan tänkas vara begränsande för metoden för kontroll i direkt anslutning till att stabiliseringen har utförts.

När bindemedlet härdar ökar resistiviteten på ett sätt som kan korreleras med hållfasthetstillväxten, vilket öppnar för volymstäckande icke-förstörande verifiering av styvheten med potential för prediktering av slutlig hållfasthet i relativt tidigt skede. Det behövs dock laboratorieförsök med mätning av både resistivitets- och hållfasthetstillväxt med olika typer av geomaterial för att verifiera resultaten och göra dem mera generellt tillämpbara.

Metodik, prototyputrustning och -programvara har utvecklats inom ramen för projektet, för mätning av resistivitet i laboratorium såväl som i fältförsök. Det finns mättekniska utmaningar som kräver väl anpassad utrustning och mätprocedur. Resultaten visar på stor potential där fältresultaten dock behöver verifieras med referensdata från andra kontrollmetoder.

# Innehållsförteckning

<b>Innehåll</b>	<b>Sida</b>
Förord	1
Sammanfattning	3
Innehållsförteckning	4
Bakgrund	5
Syfte	7
Förväntade resultat och effekter	8
Metodbeskrivning	9
Mätprincip	9
Kvalitetskontroll av data	10
Modelltolkning via inversion	10
Resistiviteten i olika geomaterial	12
Labororiemätning	13
Genomförande	15
Utrustning och metodik för labororiemätning på stabiliserade prover	15
Utrustning och metodik för test av stabiliserade pelare	18
Anpassning och utveckling av tolkningsprogramvara	20
Mätteknisk utveckling	21
Resultat	22
Laborieförsök	22
KC-stabiliserade prover	22
Stabiliserade muddermassor	24
Fältförsök	26
Test med mätning i slitsade rör i KC-pelare	26
Tester med elektrodinstallation i KC-pelare	30
Test med elektrodinstallation i jetpelare	35
Slutsatser	41
Förslag till fortsatt arbete	43
Litteraturförteckning	44
Bilaga 1. Publikationer	47
Konferensbidrag	47
Examensarbeten	47

## Bakgrund

Markstabilisering i olika former är vanligt för exploatering av områden med dålig bärighet, bland annat för att det medför stora ekonomiska besparingar jämfört med alternativa metoder. I många fall är markstabilisering det enda praktiskt och ekonomiskt genomförbara alternativet. Markstabilisering är attraktivt sett ur ett hållbarhetsperspektiv eftersom man kan utnyttja lokalt material som annars skulle ha blivit ett deponeringsproblem. Man sparar in värdefulla råvaror i form av naturgrus eller bergkross så att de kan sparas som resurs för användning i sammanhang där det inte finns rimliga alternativ, vilket är resurseffektivt och viktigt ur ett hållbarhetsperspektiv. Markstabilisering bidrar också till minskad koldioxidbelastning genom att reducera transportbehovet, eftersom transporter av bortschaktat material och ersättningsmassor elimineras, dock är tillverkningen av bindemedel förknippat med koldioxidutsläpp. Det finns möjligheter att använda restprodukter som en resurs, till exempel aska, för att reducera bindemedlets miljöbelastning.

Markstabilisering kan också användas för att kapsla in förorenad mark in-situ för att förhindra föroreningsläckage, så att man slipper ta till kostsam och miljöstörande urschaktning, borttransport, behandling och deponering på annan plats. En stor fördel med stabilisering av föroreningar in-situ är att man undviker skadlig exponering i samband hantering av de förorenade massorna.

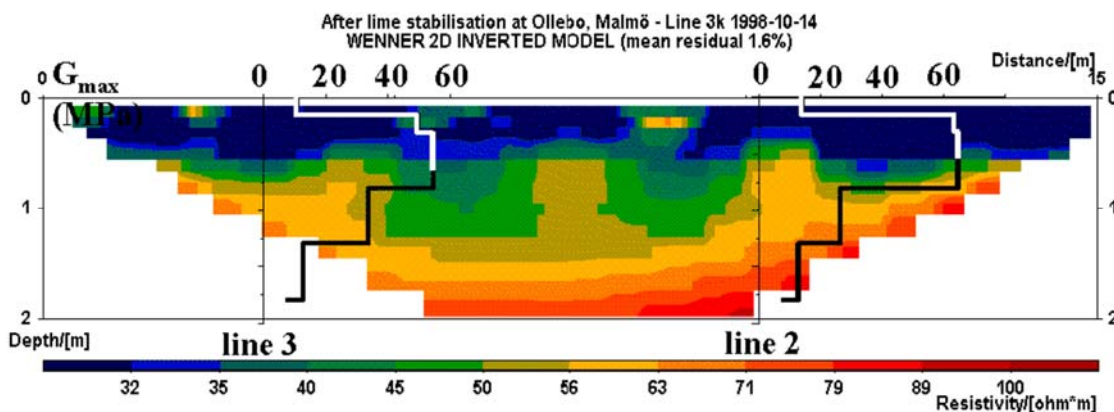
Det finns flera olika metoder för markstabilisering. *Ytstabilisering* innebär att man fräser ned bindemedel i de översta decimetrarna av det jordmaterial som ska stabiliseras. Metoden kan användas till att stabilisera ytskiktet inför till exempel ett vägbygge eller i kombination med pelarförstärkning för att skapa ett pelardäck. *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, så kallade 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. *Stabilisering och solidifiering av muddermassor*, som ofta är förorenade, utförs genom att muddermassorna blandas med bindemedel i en tank innan det pumpas in i volymen. Jämfört med att lägga de förorenade muddermassorna på deponi har detta flera fördelar. Man slipper både deponiavgifter och transportkostnader till deponi. Vidare får man byggmaterial på plats och kan spara på råvara från till exempel bergtäkt, vilket är fördelaktigt ekonomiskt och med tanke på hushållning med resurser. Genom att det blir färre transporter minskas koldioxidutsläppen.

Man kan också stabilisera förorenade bottensediment på plats vilket minskar risken för föroreningsläckage till omgivande vatten och vattenlevande organismer. Efter att bindemedlet tillförts lägger man i allmänhet på en överlast av bergkross. Detta görs med syfte att påskynda konsolidering, samt förbättra den förstärkta volymens homogenitet och mekaniska egenskaper.

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 vid byggande på dem. 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 inhomogenitet. 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.

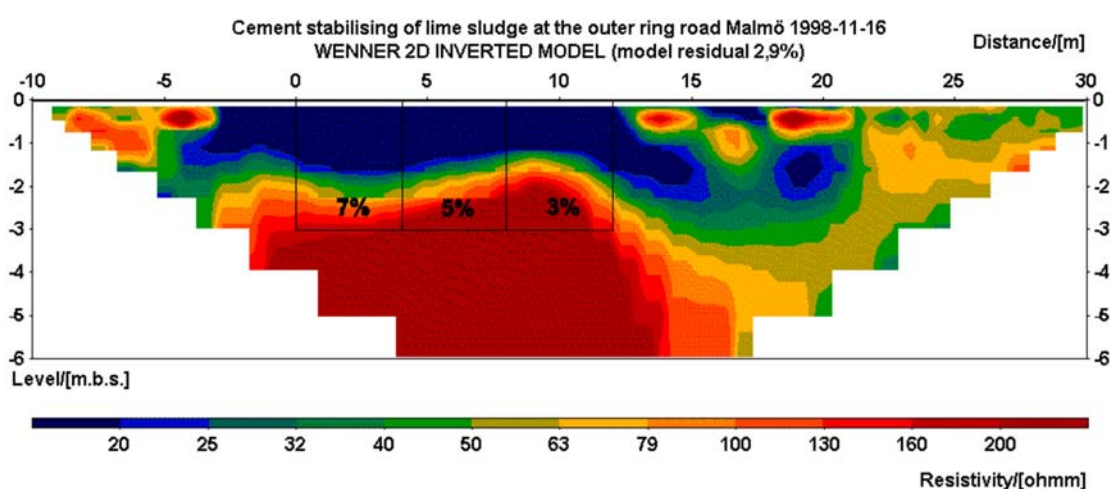
Kontrollen kan delas upp i två delar, där den första består av att kontrollera om hela den avsedda volymen behandlats eller om det behövs kompletterande insatser i delar av volymen. Denna kontroll bör ske i direkt anslutning till att stabiliseringen utförs, så att komplettering kan göras medan utrustning 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 har visats att de elektriska egenskaperna däremot förändras drastiskt när bindemedel blandas ner i marken (Vincent et al. 2017; Lindh et al. 2000; Dahlin et al. 1999). 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, se exempel i Figur 1 och Figur 2. Mooney & Bearce (2017) har visat att man kan uppskatta verklig (as-built) diameter på jetpelare inom 5% inom ett intervall av 0,9 till 2,5m. De föreslår en 6 m lång mätprob av typ CPT-resistivitet med 20 ringelektroder på ett minsta avstånd på 0,3 m som kan mäta med elektrodavstånden 0,3, 0,6, 0,9 and 1,2 m. För att detta ska fungera i rutintillämpning måste metoden dock 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.



Figur 1. Exempel på ERT och ytvågsseismiska resultat från ytstabilisering. Den stabiliserade delen framträder genom sin låga resistivitet (blå), där det av luckor i det lågresistiva lagret framgår att man inte lyckats blanda i bindemedel längs hela sträckan. Ytvågsseismiken i två punkter har använts för att beräkna G-modulen (Dahlin et al. 1999).

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 att temperatursensorer installeras i pelarna, där traditionella sensorer ger punktinformation medan optisk fiber kan ge kontinuerlig information längs pelaren.

När bindemedlet härdat kan seismiska mätningar användas för oförstörande kvalitetskontroll (t.ex. Lin et al. 2017). Rydén och Lindh (2015) har utvärderat oförstörande seismiska mätningar från toppen av jetpelare, och dragit slutsatsen att det finns svårigheter men också potential att kunna utvecklas till en framtida kostnadseffektiv oförstörande kontrollmetod. Kompletterande mätningar med så kallad vertikal seismisk profilering (VSP) eller ytvågsseismik typ MASW rekommenderas för framtida mätningar. En komplikation är svårigheten att komma åt att placera sensorer i den stabiliserade volymen under den överlast som normalt läggs på. Det vore en fördel att kunna installera sensorer i samband med att stabiliseringen utförs, som är så billiga att de kan lämnas kvar efter att mätningarna har utförts. Detta vore möjligt om optisk fiber används som seismisk sensor, och tack vare teknikutveckling på senare år har det nu öppnats möjlighet att göra det (Parker et al. 2014). Samma optiska fiber skulle också kunna användas till temperaturmätning.



Figur 2. ERT mätt över område som behandlats med cementstabilisering, där den avsedda utbredningen för den behandlade volymen markerats tillsammans med procent cementinblandning. Det framgår tydligt att djupet på den behandlade zonen understiger det planerade, och att det varierar. Vidare ser det ut som att stabiliseringsmedlet spridits i sidled utanför den behandlade ytan. (Dahlin et al. 1999).

ERT skulle kunna vara ett komplement till seismiken i Steg 2, för att i kombination ge bättre 3D modeller. Under härdningen ökar resistiviteten successivt, så att det under eller efter härdning kan tänkas att det skulle gå att hitta samband mellan resistivitet, SPT (standard penetration test) och tryckhållfasthet (Liu et al. 2008; Zhang et al. 2012).

## Syfte

Syftet är att genom bättre kvalitetskontroll av markstabilisering kunna optimera mängd bindemedel och säkerställa att hela den avsedda volymen har behandlats med tillräckligt bra resultat, för ekonomiska och miljömässiga besparingar och undvikande av tekniska problem.

Projektets mål är att anpassa, utveckla och testa elektrisk resistivitetstomografi (ERT) som volymstäckande kontrollmetod för markstabilisering, för rutinmässig användning för att säkerställa att hela den avsedda markvolymen har behandlats med tillräckligt bra resultat.



Kontrollmetoden är tänkt att kunna användas som ett första steg i kvalitetskontrollen i omedelbar anslutning till stabiliseringen, med syfte att detektera ifall delar av markvolymen inte blivit ordentligt behandlad. Därigenom skulle det kunna åtgärdas medan utrustning och personal fortfarande är på plats. Denna del skulle kunna utföras med hjälp av ERT under förutsättning att det sker en tillräckligt stor förändring i markens ledningsförmåga när den blandas med bindemedel.

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. Det finns olika etablerade metoder för sådan kontroll, vilka dock i många fall är förstörande. ERT skulle kunna ha en potential även för volymstäckande kontroll av styvhetstillväxt genom korrelation mellan förändring i resistivitet och hållfasthetstillväxt under härdningsprocessen som kan följas direkt från reaktionsstart.

Projektets mål är att anpassa, utveckla och testa metodik och utrustning för att tillämpa resistivitetmätning som kontrollmetod av markstabilisering i laboratorium och fältskala, för volymstäckande kvalitetskontroll.

## **Förväntade resultat och effekter**

Markstabilisering är mycket attraktivt sett ur ett hållbarhetsperspektiv eftersom man kan utnyttja lokalt material som annars skulle blivit ett deponeringsproblem. Man sparar in värdefulla råvaror i form av naturgrus eller bergkross så att de kan sparas som resurs för användning i sammanhang där det inte finns rimliga alternativ, vilket är resurseffektivt och viktigt ur ett hållbarhetsperspektiv.

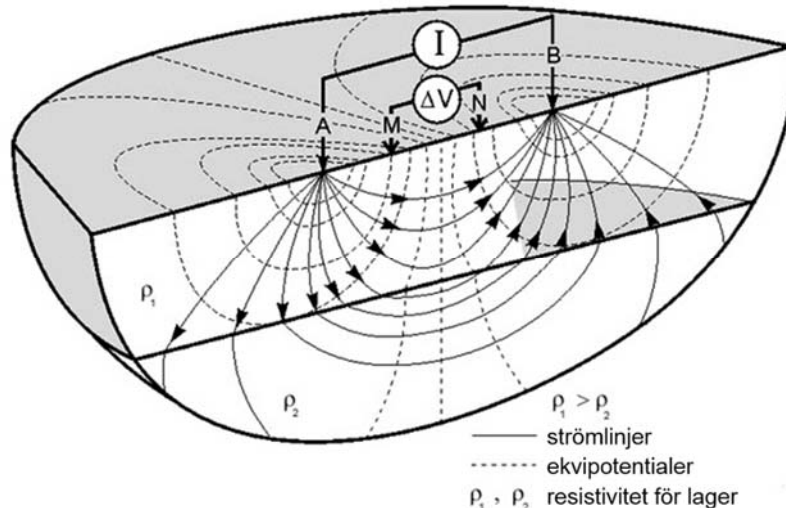
Markstabilisering bidrar också till minskad koldioxidbelastning genom att minska transportbehovet genom att eliminera transporter av bortschaktat material och ersättningsmassor. Det är dock centralt med kontrollmetoder för att säkra att resultatet blir det avsedda i hela den stabiliserade volymen, och ERT kan ha en viktig roll i detta. Det är väsentligt att ha en snabb metod som kan visa om man lyckats få ut bindemedel i hela volymen, eller om det finns missar som behöver åtgärdas, och här har ERT stor potential att kunna bli en rutinmetod. Om detta kan ske medan utrustning och manskap finns kvar på plats kan kompletterande åtgärder vidtas till en ringa merkostnad och utan onödig miljöbelastning i form av exempelvis transporter.

Med bättre kontrollmetoder kan man få ökad acceptans för att använda markstabilisering istället för att schakta bort och ersätta material på plats. Därmed kan man spara mer värdefulla råvaror, och undvika deponering och onödiga transporter.

# Metodbeskrivning

## Mätprincip

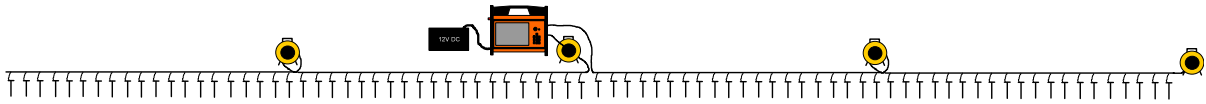
Markens resistivitet (specifika elektriska motstånd) kan mätas genom att skicka kontrollerade strömpulser mellan två elektroder samtidigt som spänningen mäts mellan ett annat elektrodpar (Figur 3). Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) bygger på systematisk mätning med många olika elektrodkombinationer för att erhålla rumslig information. Data används för att med hjälp av en form av avancerad passningsräkning, invers numerisk modelltolkning (inversion), skapa en modell av fördelningen av resistivitet i tvärsnitt eller volymer i marken. Oftast används finita elementmetoden (FEM) för modellberäkningarna i två (2D) eller tre dimensioner (3D) beroende på hur data samlats in. Markens resistivitet beror främst på vatteninnehåll, kemisk sammansättning och finmaterialinnehåll, samt fördelningen av dessa. Det är viktigt med referensdata från andra metoder för att göra en bra tolkning av resultaten, men placeringen av punkter för t.ex. borrhning och provtagning kan optimeras baserat på ERT-resultaten.



Figur 3. Princip för elektrisk resistivitetmätning illustrerad på en tvålagerföljd, där A och B är strömelektroder, medan M och N är potentialelektroder (modifierad från Seidel & Lange 2007).

Resultatet från en enskild mätning med 4 elektroder är ett medelvärde av resistiviteten, den skenbara resistiviteten ( $\rho_a$ ), viktat av den tredimensionella (3D) känslighetsfördelningen i den undersökta volymen (Binley & Slater 2020). Det som mäts är resistans och genom att multiplicera med en geometrisk faktor som beror på elektrodplaceringen kan man beräkna skenbar resistivitet. Genom att utföra en sekvens av mätningar med olika elektrodavstånd och placering på elektroderna kan man erhålla information om den rumsliga fördelningen av resistiviteten i 2D eller 3D beroende på hur undersökningen utförs. Genom upprepad mätning på samma elektrodutlägg kan man följa förändring i resistivitet.

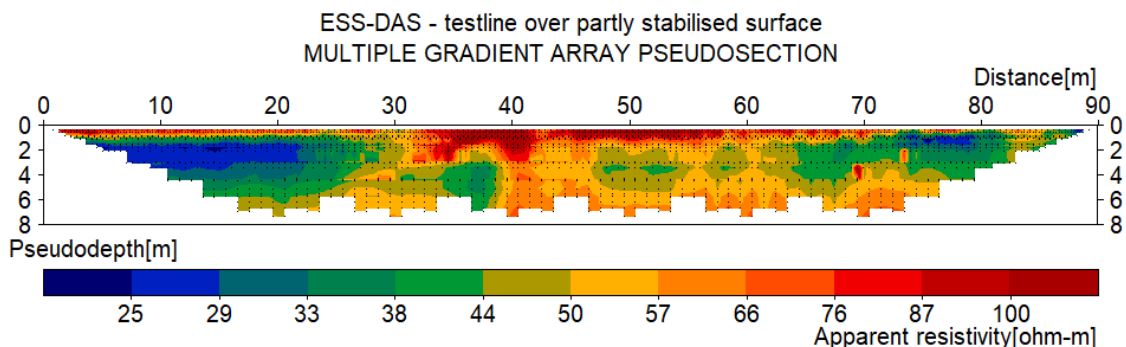
Resistivitetsundersökningar utfördes förr som profilering eller sondering, men numera nästan uteslutande som ERT vilket kan ses som kombinerad profilering-sondering. Man använder typiskt flera tiotal elektroder som ansluts via multielektrodkablar (Figur 4), varefter instrumentet automatiskt mäter hundratals eller tusentals elektrodkombinationer enligt en fördefinierad mätsekvens.



Figur 4. Skiss på typiskt mätlägg för 2D ERT, i detta fall med 81 elektroder. Utläggets längd varierar beroende på elektroavstånd och antal elektroder.

## Kvalitetskontroll av data

Mätdata från 2D ERT kvalitetskontrolleras ofta genom att rita upp dem som pseudosektioner, där den skenbara resistiviteten ritas upp som funktion av medianen för undersökningsdjupet som funktion av mittpunkten för elektrodläggningen eller spänningselektroden (beroende på vad som passar bäst för den aktuella elektrodgeometrin). Med hjälp av en pseudosektion och erfarenhet kan man snabbt avgöra om datakvaliteten är tillräckligt bra (Figur 5), dock kan det vara svårt att tillämpa för 3D-undersökningar och borrhålstomografi.



Figur 5. Exempel på pseudosektion med övervägande bra datakvalitet men där ett fåtal datapunkter kring 70 m och pseudodjup 2-4 m kan redigeras bort.

Det går att kvantifiera mätdatakvaliteten med hjälp av reciprocitetsprincipen, som innebär att man teoretiskt sett kan byta plats på ström- och potentialelektroden (Figur 3) och ändå få samma mätvärde. Om mätresultaten skiljer sig åt beror det på olika typer av mätfel, vilket man utnyttjar genom att beräkna observationsfel:

$$e_{obs} = \left| \frac{R_{normal} - R_{reciprocal}}{(R_{normal} + R_{reciprocal})/2} \right| \quad \text{Formel 1}$$

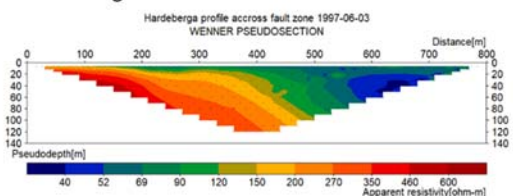
Nackdelen med reciproka mätningar är att det krävs dubbelt så många mätningar för en fullständig kvalitetskontroll, vilket tar lång tid att genomföra. I praktiken kan ofta det ta fyra gånger så lång tid på grund av att det är svårare att utnyttja instrumentets förmåga att mäta i många kanaler samtidigt vid de reciproka mätningarna, vilket gör att det sällan används i praktisk tillämpning.

## Modelltolkning via inversion

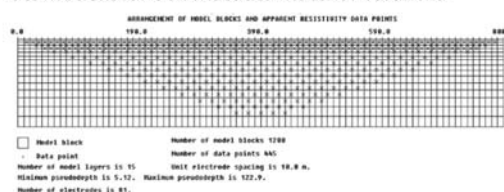
För att tolka data från ERT är det nödvändigt att skapa modeller av fördelningen av de fysikaliska egenskaperna i marken som mätningen avser. Det kan man göra med hjälp av så kallad invers numerisk modelltolkning (inversion). Inversionen sker genom att tolkningsprogramvaran anpassar fördelningen av resistivitet i modellcellerna genom s.k.

iteration. Detta innebär att programvaran antar en startmodell och justerar den i ett antal steg. Målet är att hitta en modell av fördelningen av materialegenskaper i marken, som gör att de simulerade mätdata som modellen ger upphov till (modellsvaret) så väl som möjligt stämmer överens med uppmätta data (Figur 6).

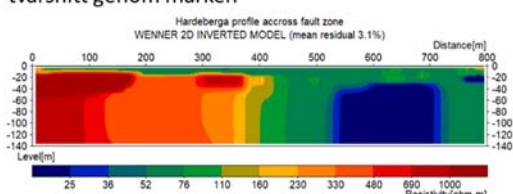
Pseudosektion = uppmätta data efter ev. signalbehandling och filtrering



Inversion (invers numerisk modelltolkning) = iterativ anpassning av resistivitetsfördelningen så att modellsvaret och mätdata matchar varandra

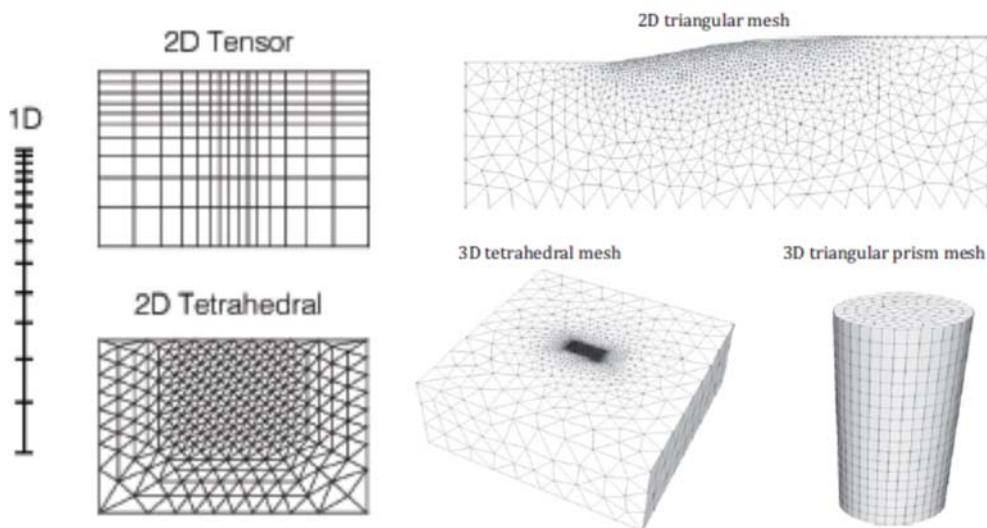


Modellsektion = tolkad modell av resistiviteten i vertikalt tvärsnitt genom marken



Figur 6. Principen för inversion av resistivitetsdata består av att skapa en modell av resistivitetsfördelningen i marken genom att med hjälp av en iterativ process anpassa en modell så att modellsvaret så väl som möjligt efterliknar uppmätta data.

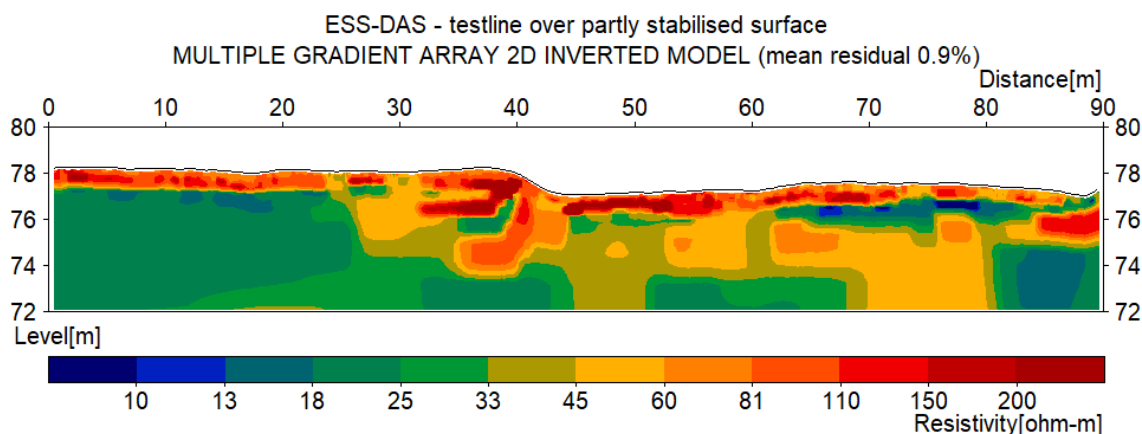
Beroende på hur data samlats in kan man skapa 2D eller 3D modeller (Oldenburg et al. 2023), eller en serie kopplade 1D modeller (Figur 7). Ofta använder man finita differens- (FD) eller finita elementmetoden (FEM) för att skapa modellen, där den senare är att föredra om det finns topografi att ta hänsyn till eller vid komplicerade mätgeometrier.



Figur 7. Exempel på olika modelldiskretiseringar (från Oldenburg et al. 2023; Binley & Slater 2020).

Det finns olika programvaror för inversion av ERT-data från mätningar med elektroderna på markytan i såväl 2D som 3D, som även stödjer elektroder i borrhål. De kommersiella

programmen Res2dinv (Loke et al. 2003) och Res3dinv är väl beprövade och stabila, och fungerar väl i de flesta standardbetonade tillämpningar (exempel i Figur 8) men har begränsningar för mera speciella geometrier. En sådan begränsning är att de inte går att konfigurera för att hantera den geometri som är aktuell vid tester med stabilisering av singelpelare, där den stabiliserade pelaren kan antas vara mer eller mindre cirkulärsymmetrisk.

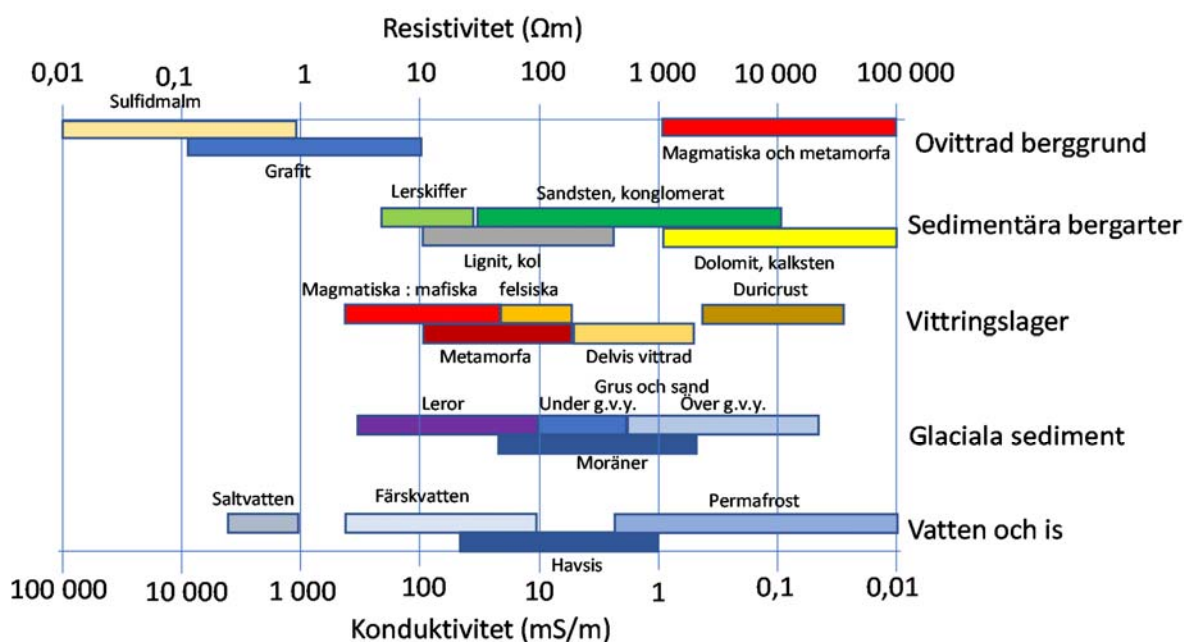


Figur 8. Exempel på inverterad sektion baserad på data från ERT med topografi.

## Resistiviteten i olika geomaterial

Resistiviteten styrs i huvudsak av vatten- och finmaterialinnehållet i marken, då de vanligaste jord- och bergartsbildande mineralen i praktiken är isolatorer. Mängd vatten, joninnehåll i vattnet samt hur vattnet är fördelat i materialet är viktiga faktorer. Lerinnehåll har stor betydelse för resistiviteten, och lerhaltiga och organiska jordar har normalt låga resistivitet. Exempel på typiska resistiviteter visas i Figur 9. Torrt kristallint berg har hög resistivitet, medan uppsprucket vattenförande berg leder till lägre resistivitet. Vittring sänker resistiviteten ytterligare, där långt gången lervittring kan leda till väldigt låga resistiviteter. Vidare har vissa malmmineral metallisk ledningsförmåga vilket kan ge mycket låg resistivitet.

Sediment som har bildats i en saltvattensmiljö, till exempel marin lera, har typiskt mycket låga resistiviteter (enstaka  $\Omega\text{m}$  eller lägre) medan lakustrin lera ligger högre (några tiotal  $\Omega\text{m}$ ). Marin lera som har lakats ut så att den omvandlas till kvicklera har högre resistivitet än lera som inte är urlakad (Rankka et al. 2004). Grovkorniga sediment som sand och grus ligger oftast högre (några hundra  $\Omega\text{m}$  vattenmättade), men om vatteninnehållet har hög salthalt kan de bli lågresistiva.



Figur 9. Typiska resistiviteter respektive konduktiviteter för olika material, där konduktivitet är inversen av resistivitet, d.v.s.  $\sigma = 1/\rho$  (efter Palacky 1987).

Resistiviteten är vidare beroende av temperaturen. Resistiviteten ökar med sjunkande temperatur, beroende på minskad mobilitet hos jonerna i vattnet då viskositeten ökar, och vid tjäle ökar resistiviteten kraftigt. Oftast tar man inte hänsyn till temperaturvariationer i anläggningstekniska tillämpningar, men i vissa fall kan man utnyttja det som ett naturligt spårämne.

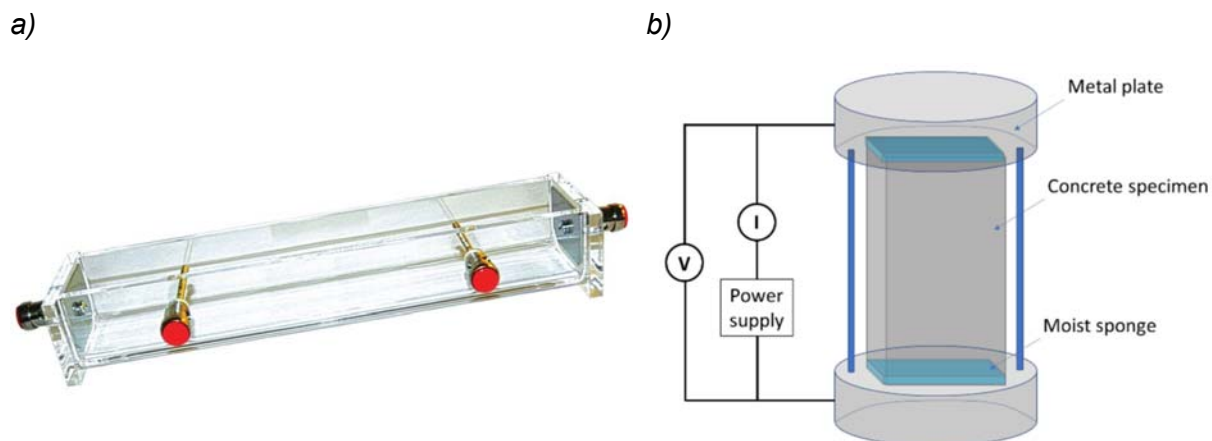
Det är möjligt att mäta markens elektriska uppladdningsförmåga, så kallad inducerad polarisation (IP), med samma instrument. IP-effekterna kopplar till materialets inre struktur och kan i en del fall ge värdefull kompletterande information relaterad till materialegenskaperna och exempelvis kemiskt innehåll. Vissa typer av mineraliseringar ger upphov till stora IP-effekter och metoden är därför vanlig i vissa typer av malmprospektering. ERT kombinerat med IP-mätning kallas ofta DCIP-tomografi (Jeppsson et al. 2022; Binley & Slater 2020).

Genom övervakning, det vill säga upprepad mätning på samma elektrodlägg, kan man spåra förändringar i bland annat vatteninnehåll och kemi. Om den geologiska sammansättningen är konstant, vilket oftast är fallet, kan man spåra små förändringar. Eftersom temperaturen påverkar de elektriska egenskaperna kan den behöva beaktas.

## Labororiemätning

Traditionellt görs resistivitetmätningar i geotekniska laboratorier genom att packa jordproverna i fyrkantiga jordlådor (Figur 10a), med strömöverföring mellan metallplattor i varje ände av provet och potenzialelektroder som penetrerar genom det (ASTM 2005). Det gör att det inte är möjligt att ostört mäta resistiviteten hos samma prover som ska användas för mekaniska tester. För att få jämförbara mekaniska testdata är det viktigt att inte störa proverna genom att trycka in elektroder i dem.

Det finns en standard för hur man utför mätningar på betongprover med två-elektrodkonfiguration (Figur 10b), men även fyr-elektrodkonfiguration förekommer (Akhnoukh 2021; Cosoli et al. 2020). Två-elektrodmätning enligt ASTM G187-05 sker med en frekvens på mätsignalen omkring 100 Hz eller högre. Det kan leda till att mätresultatet inte blir jämförbart med resultaten från ERT, som sker med likströmpulser på en till några sekunder, ifall det undersökta materialet ger upphov till IP-effekter. Om man utför två-elektrodmätning har man ingen kontroll på elektrodkontaktmotståndet vilket kan leda till stora mätfel vid låga frekvenser.



Figur 10. a) "Geotechnical soilbox" för mätning på störda jordprover enligt ASTM G187-18 (från <https://www.globalgilson.com/soil-resistivity-test-soil-box>), och b) anordning för två-elektrodmätning på ostörda prover enligt ASTM G187-05 (Cosoli et al. 2020).



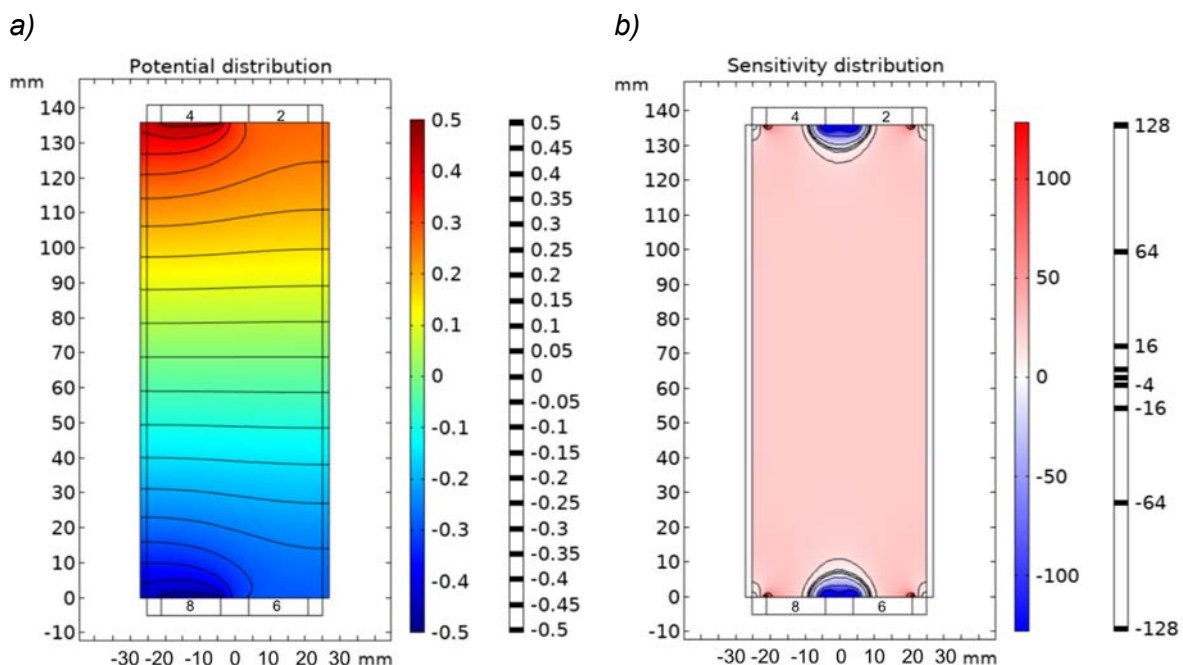
## Genomförande

Upplägget för genomförandet består av litteraturstudie, metodutveckling, mät försök, sammanställning och analys av resultaten. I metodutvecklingen ingår prototyp utveckling av utrustning för mätning på materialprover i laboratorium och i fält i stabiliseringsprojekt. Vidare utveckling av metodik, algoritmer och programvara för hantering, bearbetning och analys av mätdata.

De artiklar och examensarbeten som har publicerats i projektet återfinns i Bilaga 1 "Publikationer".

## Utrustning och metodik för laboriemätning på stabiliserade prover

Metodik och mätutrustning har utvecklats för att göra det praktiskt att genomföra mätserier på stabiliserade prover i laboratorium, med jämförande mekaniska mätningar. Provtagningscylindrar med 50 mm innerdiameter och 170 mm längd, enligt SGF-standard (SGF 2009), används ofta i samband med försök med olika bindemedelsinblandning inför stabiliseringsprojekt. Specialdesignade lock till sådana provbehållare med inbyggda elektroder och temperaturgivare (Figur 12) har därför utvecklats. Locken har fyra tårtbitsliknande elektroder i varje lock för att kunna skicka ström och mäta spänning utan att använda samma elektrod samtidigt, vilket annars ger okontrollerbara mätfel. Genom att växla funktion på elektroderna kan man göra reciproka mätningar som gör det möjligt att beräkna mätfelens storlek (Formel 1).



Figur 11. Resultat av FEM-modellering som visar: a) spänningsfördelningen i ett tvärsnitt genom provbehållaren, och b) känslighetsfördelningen i samma tvärsnitt (Dahlin et al. 2023a).



Numerisk modellering av elektroddesignen med finita elementmetoden (FEM) utfördes i Comsol Multiphysics (v. 5.5) för att kunna utvärdera olika elektroddesigner. Speciellt två konstruktioner baserade på fyra elektroder i varje lock men med olika elektroddesign (pajbitar respektive cirkulära) och en design med endast två elektroder i varje lock (koncentriska ringar). Här visas endast resultaten för pajbitsformade elektroder som är den utformning som valdes. Baserat på denna geometri, diskretisering, materialegenskaper och randvillkor, beräknades stationära lösningar för alla möjliga strömelektrodkombinationer, se exempel på en kombination i Figur 11. FEM-modelleringsresultaten användes för numeriska uppskattningar av de geometriska faktorerna (K) för alla möjliga kvadrupoler (4-elektrodkombinationer) baserat på potential och ström för de relevanta elektroderna i modellen.

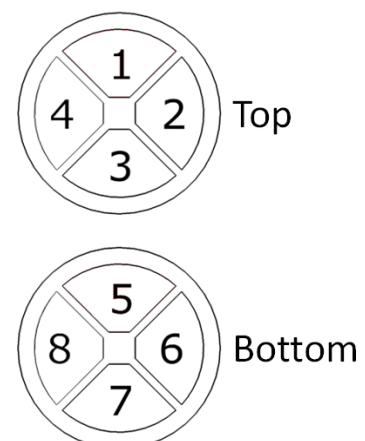
Elektroddlocken möjliggör oförstörande resistivitetsmätning på materialprover så att samma provkroppar kan användas för seismisk mätning och enaxiella tryckförsök. Efter några prototypgenerationer för elektroddlocken, och efter att mätsekvenser optimerats och mätinställningar för instrumentet justerats har det gett goda resultat mättekniskt sett.

Vi använder en design med 3D-utskrivna provcylinderlock (Figur 12), där ytan på de 3D-tryckta delarna gjorts vattentät genom impregnering med Dichtol WFT 1532. Elektrodderna är gjorda av rostfritt stål och laserskurna från en 5 mm tjock platta, som limmas på plats innan insidan tätas med ett injutningsmedel av polyuretan för att säkerställa vattentät och elektrisk isolering av anslutningarna till elektroderna. Eftersom resistiviteten är starkt temperaturberoende, och bindemedelsreaktionen resulterar i uppvärmning av provet, kan temperaturmätning parallellt med resistivitetsmätningen vara väsentlig. Temperatursensorer av typ Pt1000 är integrerade i elektroddlocken, placerade mellan elektroderna, för anslutning till temperaturloggar. Ett 20-tal uppsättningar har tillverkats och använts för mätförsök.

a)



b)

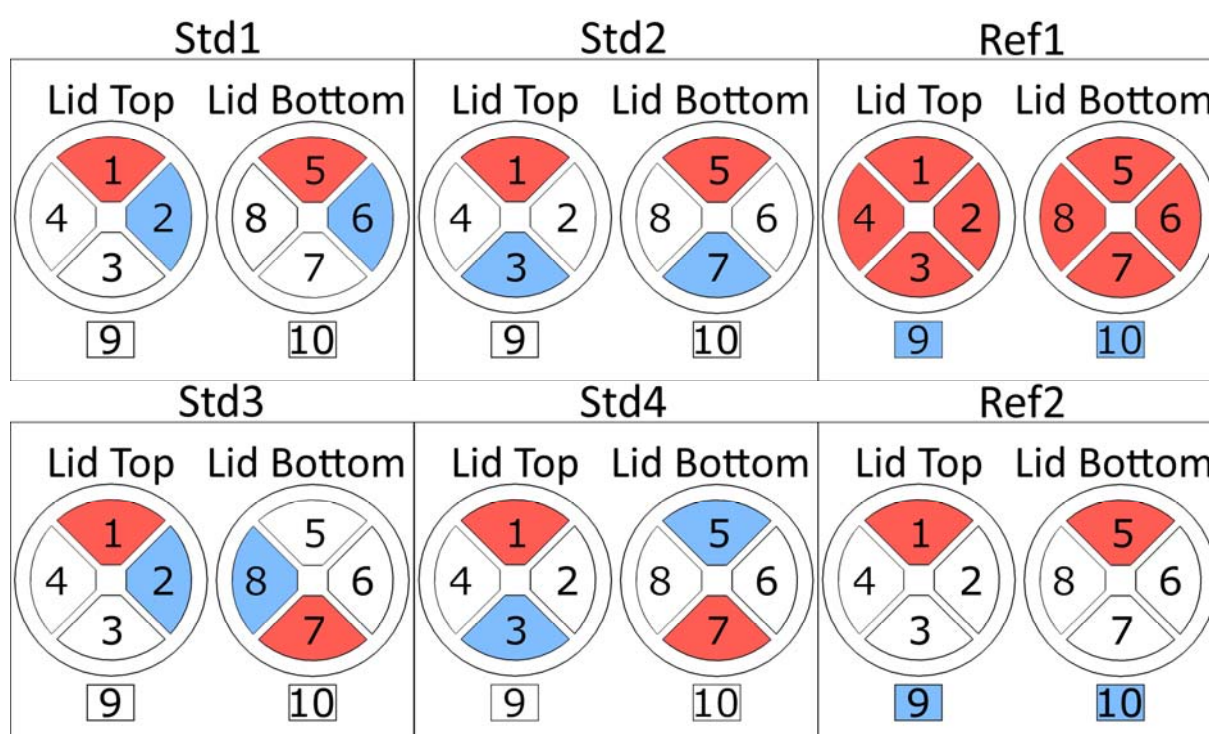


Figur 12. a) Lock med elektroder och temperaturgivare för icke-förstörande mätning av resistivitet på material i provtagningscylindrar enligt SGF-standard, och b) använd numrering av elektroderna.

Den fysiska elektroddesignen utvärderades genom att mäta på provhållaren fylld med kranvatten och konduktivetsreferensvätskor med ett ABEM Terrameter LS2-instrument. Dessutom gjordes testmätningarna med en provcylinder med hål borrade för potentialelektroder, så att potentialskillnaden kan mätas mellan strömelektroder på traditionellt sätt som referens.

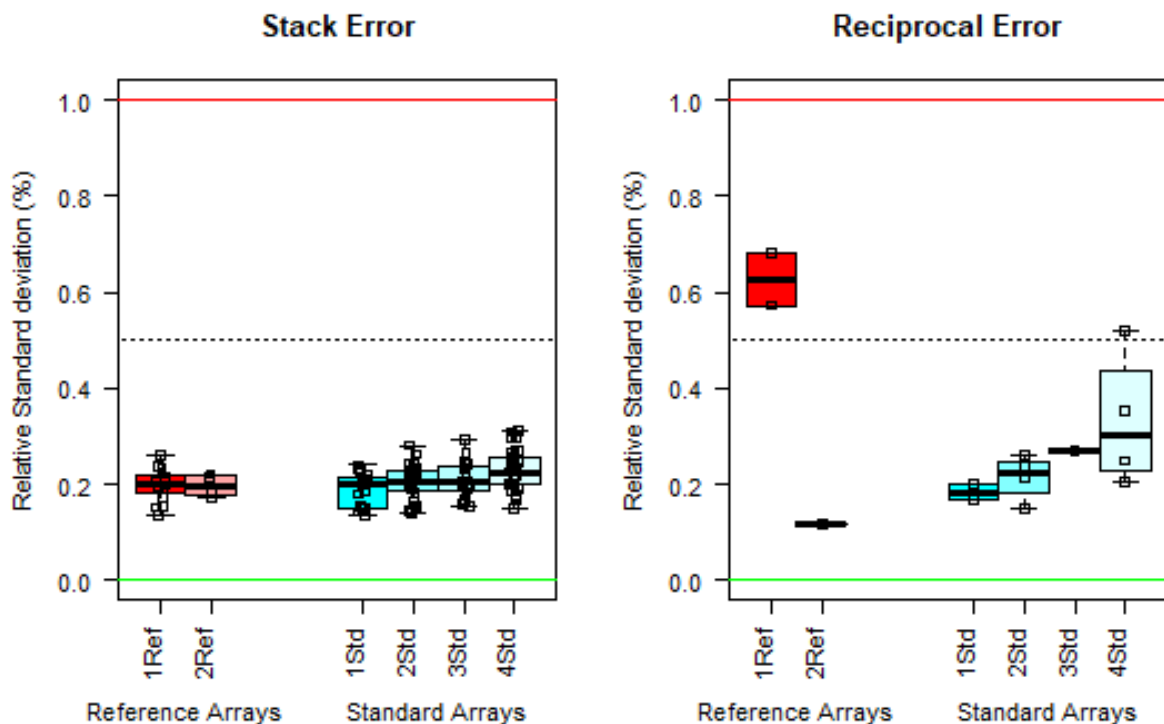
Olika elektrodkombinationer mellan ändelektroder (Figur 13) har testats, till exempel med strömelektroder (C1 och C2) ovanför varandra (Figur 13; Std2) och mitt emot varandra

(Figur 13; Std4), och potenzialelektrodena (P1 och P2) på motsvarande sätt. Alla elektrodkombinationer roterades varvet runt, vilket resulterar i data som möjliggör statistisk utvärdering samt analyser av datakvaliteten via reciproka datapar. Vidare gjordes mätningar för utvärderingsändamål mellan referenselektrodena på sidan av provcylindern samtidigt som ström skickades mellan alla fyra elektroderna i vardera änden av cylindern kopplade till varandra (Figur 13; Ref1). I detta fall genereras ett ström- och potentialfält som är väsentligen identiskt med det för en enda plattelektrod i varje ände av cylindern, så att detta kan betraktas som referensmätningar med analytisk geometrisk faktor baserad på tvärsnittsarean och avståndet mellan potenzialelektrodena. Mätningar gjordes också för referenselektrodena med användning av enstaka par av en pajbitslektrod (Figur 13; Ref2). Utöver detta kan mätningar göras till exempel med samtliga elektroder i vardera locket, vilket ger ett mått på resistiviteten närmast det locket. Det skulle kunna användas för att ge en uppfattning om eventuella inhomogeniteter.



Figur 13. Exempel på olika mätkombinationer där rött markerar strömelektroder och blått potenzialelektroder. Nummer 9 och 10 är referenselektroder monterade i hål borrade i sidan på en SGF-cylinder (Dahlin et al 2023a).

Mätförsök med provbehållaren fylld med kranvatten samt konduktivitetsreferensvätskor har gett data av bra kvalitet men det har också visat att mätprocessen och instrumentuppsättningen måste utformas noggrant. Det är viktigt att inte skicka för mycket ström för att undvika elektrokemiska processer vid ytan av strömelektrodena som producerar gas och resulterar i korrosion av elektroderna, vilket i sin tur leder till försämring av datakvaliteten, där 1 mA har visat sig fungera bra. Vidare är mätsekvensen viktig för att reducera effekter från elektroduppladdning i mätdata (Dahlin 2000). Noggrann orientering av elektrodlocken i förhållande till varandra, samt dokumentation av avståndet mellan dem, är också avgörande för noggrannheten av de uppskattade geometriska faktorerna. Resultaten (Figur 14) visar att datavariabilitet och de reciproka mätfelen kan hållas under 1 %.



Figur 14. Resultat från testmätning med provbehållaren fylld med kranvatten. Förkortningarna på x-axeln refererar till Figur 13 (Dahlin et al. 2023a).

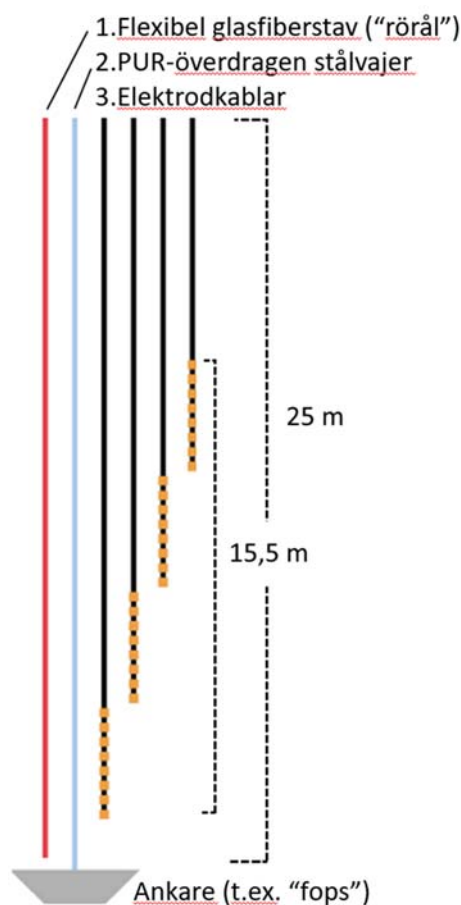
De geometriska faktorerna beror på den specifika geometrin i det aktuella fallet, t.ex. lockets relativa rotation och avståndet mellan elektroderna i varje ände av cylindern. Detta innebär att de geometriska faktorerna kommer att variera med provets längd och måste bestämmas experimentellt eller via FEM-modellering. Genom att använda data från referenselektroderna (Figur 3; Std1) för att först bestämma vattenresistiviteten i provcylindern baserat på analytisk geometrisk faktor kan de andra geometriska faktorerna bestämmas experimentellt. Ett annat alternativ är att mäta på en standardlösning för kalibrering av konduktivetsmätare men detta kräver även korrigering av temperatureffekter.

## Utrustning och metodik för test av stabiliserade pelare

Om man vill göra ERT i enskilda stabiliserade pelare med bibehållen upplösning mot djupet kan man föra in elektroder i mitten av pelaren längs hela dess längd. I de första testerna i projektet installerades slitsade plaströr i KC-pelare i vilka man i sin tur kunde sänka ner elektrodkablar avsedda för borrhålmätning. Det fungerade bra mättekniskt när elektrodablarna väl var på plats, men det visade sig dock vara svårt att föra ner de slitsade plaströren hela vägen till pelarens botten. Vidare hade det vid upprepad mätning efter en månad trängt in stabiliseringsmedel i röret och härdat vilket gjorde att den nedersta delen inte var åtkomlig.

För att göra upprepade mätningar i stabiliserade pelare kan en elektrod kabel installeras direkt i denna, och den blir då ingjuten när pelaren härdat. För att kunna utnyttja stabiliseringsriggen för att installera elektrod kabeln behöver den vara tillräckligt slank för att föras ner inuti borrhållningen, och den behöver den förankras i botten eller vara tillräckligt styv för att säkerställa att den nedersta delen inte dras med upp när borrhållningen dras tillbaka. Vidare bör den förses med ett antal temperaturgivare eftersom resistiviteten är temperatur-

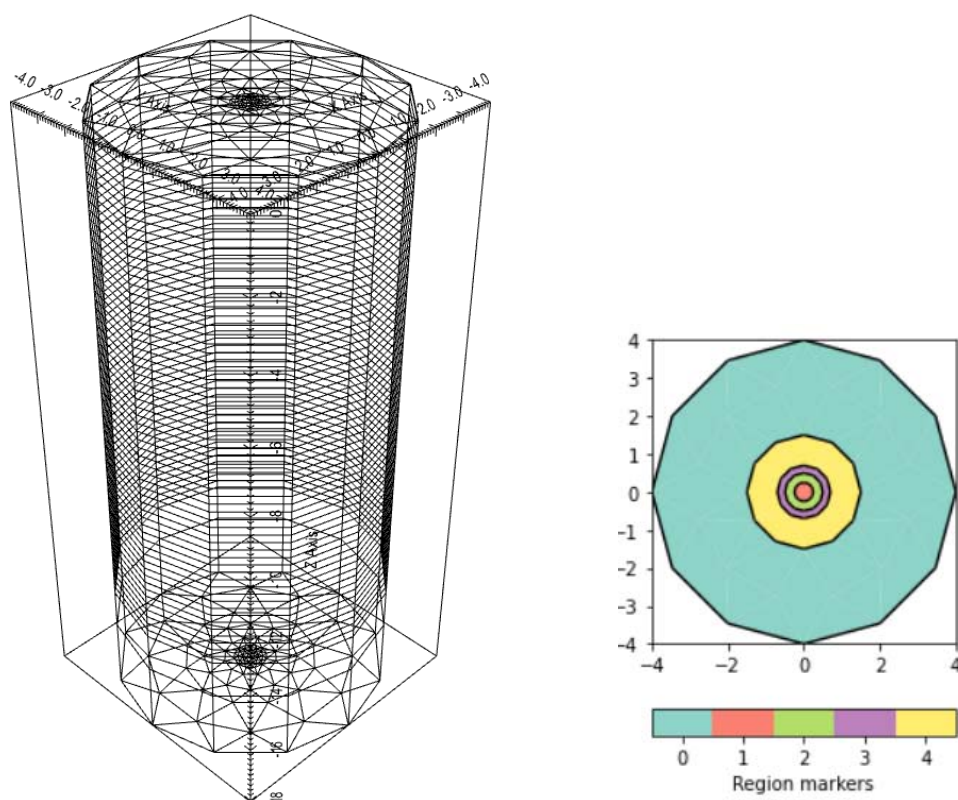
beroende. Modulära prototypkablar med 8 elektroder vardera som kan kombineras till större utlägg har byggts, se skiss i Figur 15. Genom uppstyvning med flexibel glasfiberstav av typ rörål har de fungerat bra att installera i såväl KC-pelare som jetpelare. Det har dock visat sig att mätdatakvaliteten delvis varit problematisk såväl med kopparelektroder som med rostfritt stål i elektroderna. Grundläggande mät försök med kablarna i bland annat borrhål har visat att det går att uppnå resultat av hög mätteknisk kvalitet i andra mätmiljöer än stabiliserad jord. För temperaturmätning har ett antal temperaturgivare av typ PT1000 som tejplats fast på kabelpaketet och anslutits till en datalogger använts.



Figur 15. Kabeldelar som tejpas ihop med "silvertejp" för montering i stabiliserade pelare med en stabiliseringsrigg). 1.  $\varnothing=9$  mm. Styv glasfiberkabel ("rörål", röd i figuren) behövs för att stabilisera andra kablar och förhindra att de kollapsar och hamnar på fel avstånd från varandra i pelaren. 2.  $\varnothing=6,5$  mm. Slitstark polyuretanbelagd stålvtajer (blå i figuren). Vajern är fäst vid en fops (nederst på bilden), som används för att förankra kablarna i marken när borrhången dras tillbaka. 3. Kabel  $\varnothing=5,5$  mm, elektrod  $\varnothing=10-15$  mm. Elektrodkablar (svarta i figuren) av varierande längd med 8 stålektroder vardera (orange i figuren) i ena änden placeras tillsammans för att bilda en ett utlägg med 32 elektroder med 0,5 m mellanrum varje elektrod. Total längd på elektrodutlägget 15,5 m (Grafik: Mikael Lumetzberger).

## Anpassning och utveckling av tolkningsprogramvara

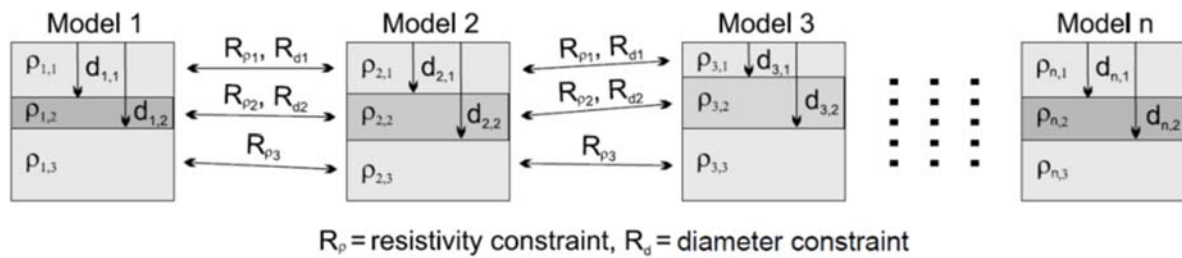
Programbiblioteket pyGIMLi med öppen källkod erbjuder inversion i 2D och 3D med FEM för modellberäkningarna, och goda möjligheter till anpassning för olika geometrier (Rücker et al. 2017). Det har använts för cirkulärsymmetrisk geometri av Ronczka et al. (2020), vilket har använts som utgångspunkt för att anpassa det för stabiliserade pelare (Nilsagård & Knutsson 2022). Den cirkulärsymmetriska geometrin innebär att markens uppbyggnad modelleras som ett antal koncentriska ringar som är staplade på varandra, och vars resistivitet kan variera mot djupet och mellan ringarna men är konstant inom varje ring (region) som har konstant radie.



Figur 16. Elementuppbyggnad för en cirkulärsymmetrisk modell bestående av ett antal, koncentriska ringar som är staplade på varandra, och vars resistivitet kan variera mot djupet och mellan ringarna men är konstant inom varje ring (region) (Nilsagård & Knutsson 2022).

Programvaran AarhusInv, som är utvecklad vid Aarhus Universitet i Danmark, är en integrerad del av den kommersiella programvaran Aarhus Workbench (Auken et al. 2015). Den finns även tillgänglig utan användargränssnitt för forskningsändamål och den har stöd för cirkulärsymmetrisk geometri baserat på Nielsen (2007). Den cirkulärsymmetriska geometrin innebär att markens uppbyggnad modelleras som ett antal koncentriska ringar som är staplade på varandra, där radien på de enskilda ringarna i detta fall kan varieras längs pelaren. Varje nivå av ringar modelleras som en radiell 1D-modell som kopplas ihop med intilliggande ringar med så kallad Laterally Constrained Inversion (LCI), vilket kan ses som "elastiska band" som hindrar alltför stora variationer mellan intilliggande nivåer vilket är nödvändigt för att stabilisera inversionsprocessen (Auken et al. 2003).





Figur 17. Principskiss som illustrerar Laterally Constrained Inversion (LCI). Notera att skissen ska roteras 90° medurs för vertikala pelare och att endast den vänstra halvan av tvärsnittet visas i skissen (modifierad från Auken et al. 2003).

## Mätteknisk utveckling

För att kunna genomföra mät försöken i laboratorium på ett rationellt sätt har arbete genomförts för att få till stånd en automatiserad, robust och repeterbar datainsamlings- och datahanteringsprocess. Det har skett genom utveckling av algoritmer för automatiserad mätning, dataöverföring, bearbetning och visualisering, så att mätdata samlas in med avsedda tidsintervall utan avbrott. Avsikten var att också använda dessa rutiner för fältförsök med övervakning av härdningsförloppet i stabiliserade pelare, men det har inte gått att genomföra på grund av att det inte erbjudits någon lämplig testlokal.

# Resultat

## Laboratorieförsök

### KC-stabiliserade prover

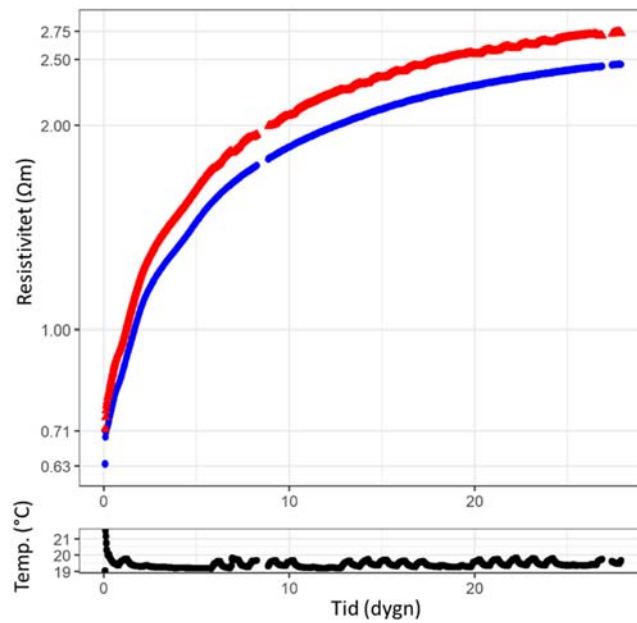
Laboratiemätning på stabiliserade prover av en grå lera från Göteborgstrakten med 70 % vattenkvot har gjorts i samarbete med SGI i deras laboratorium i Linköping. Proverna stabiliserades med 30 % kalk och 70 % cement, med en bindemedelsmängd på 60 kg/m<sup>3</sup>, där en serie med 8 parallella prover genomfördes. Två omgångar blandades som vardera fördelades på fyra prover för resistivetsmätning plus parallella prover (omgång 1 och omgång 2). Automatiserade mätningar av resistivitet och temperatur gjordes flera gånger per dag fram till tre månader efter KC-inblandningen (Figur 18), dock med ett uppehåll i data i cirka 20 dagar i senare delen av försöket på grund av instrumenthaveri under semestern.

Tidsseriemätningen av resistivitet åtföljdes av hållfasthetstester i form av seismisk mätning och enaxiella tryckförsök på samma prover. Ett prov vardera från vardera omgången plus motsvarande parallella prover togs ut efter 7, 14, 28 och 93 dagar (Figur 18).

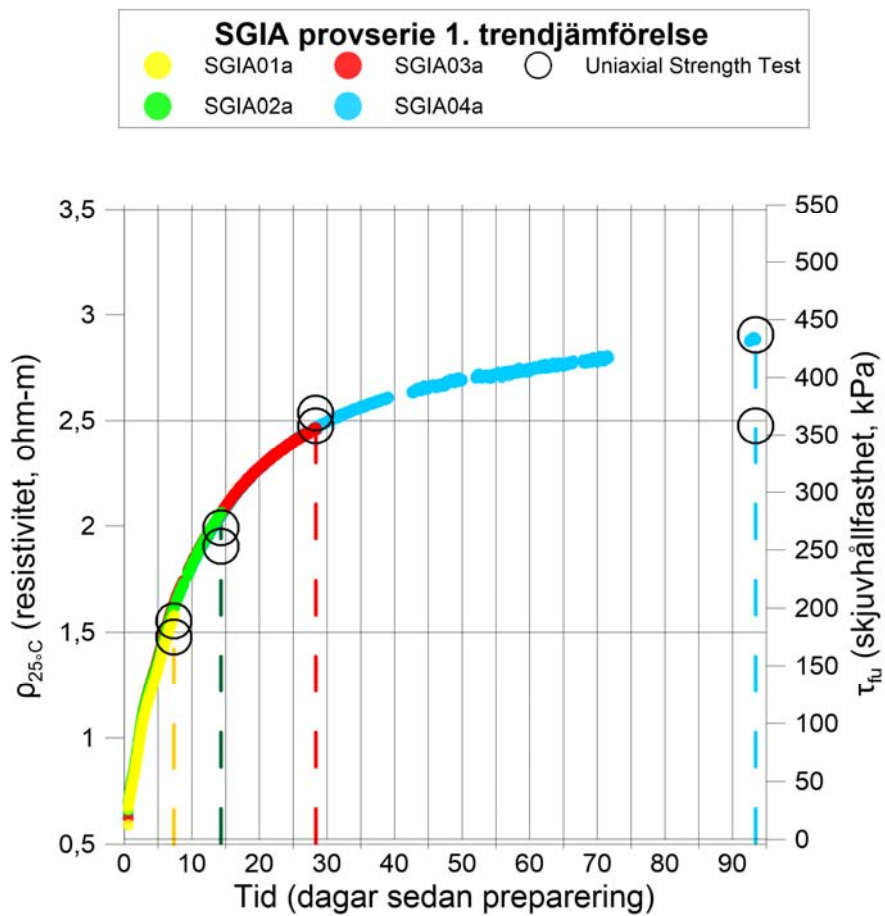


Figur 18. Laboratorieförsök med KC-inblandning i SGIs laboratorium (Dahlin et al. 2023b).

Vid närmare betraktande av mätdata syns systematiskt återkommande små variationer som överlagrats på den ökande trenden i resistivitet (Figur 19, röd kurva). Variationerna korrelerar mot små variationer i temperatur (cirka 1 °C) mellan natt och dag under veckorna (Figur 19, nedre kurva), med ökning dagtid när personal är på plats i lokalerna, medan variationen uteblir under helgerna. Temperaturkurvan visar också en ökning på några få grader C i början efter bindemedelsinblandningen. Temperaturdata användes för att räkna om resistivetsdata ( $\rho$ ) till en standardiserad motsvarighet vid 25°C ( $\rho_{25^\circ\text{C}}$ ), se Figur 19 blå kurva där temperatureffekten i princip försvinner.



Figur 19. Resultat från laborieförsök med KC-inblandning med synlig temperatureffekt. (röd) och med korrigering för temperatureffekt till motsvarande 25 °C (blå), samt uppmätt temperatur (svart) (Grafik: Mikael Lumetzberger).



Figur 20. Resultat från laborieförsök med KC-inblandning (Dahlin et al. 2023b).



Resultaten visar att de uppmätta resistiviteter från proverna som löpte parallellt tills de togs ut ligger ovanpå varandra i diagrammet och således visar på hög grad av repeterbarhet (Figur 20). Skjuvhållfastheten från de enaxiella tryckförsöken följer en trend för hållfasthetstillväxt som i hög grad liknar resistivitetstillväxten fast med större spridning. Detta tyder på att det torde finnas möjlighet att etablera korrelationer mellan tillväxt i resistivitet och hållfasthet, åtminstone empiriska för ett specifikt geologiskt material.

## Stabiliserade muddermassor

Laboratiemätning på stabiliserade muddermassor från bland annat Arendal i Göteborgs hamn har gjorts i samarbete med PEAB och Byggnadsmateriallära, LTH, i deras laboratorium.

Tre provserier med 8 parallella prover för resistivitetmätning genomfördes, samt fyra provserier med 16 parallella prover (Figur 21). I de första provomgångarna var datakvaliteten för resistivitetmätningarna stabil, men de höga vattenhalterna i muddermassorna gjorde att hållfastheten inte blev tillräckligt bra. Vid övergången till prover med lägre vattenhalter uppstod problem med stora luftblåsor och sprickor i de stabiliserade proverna, som ledde till skenande resistiviteter och stora mätosäkerheter om defekterna uppstod intill elektroderna. Eftersom de beräknade måtten på mätosäkerhet var höga visar det att metoden kan detektera denna typ av problem när de uppstår. Detta ledde till ändrad rutin för packning av proverna, där proverna fylldes i cylindrarna i 5-6 omgångar och packades noggrant med hjälp av en rundstav för varje omgång. I ett par fall förekom även uttorkning i änden av prov som ledde till försämrad datakvalitet, vilket hanterades med hjälp av utstansade cirkulära bitar fiberduk (Wettexduk) för bibehållande av fukt och bra elektrodkontakt i ändarna på provcylindrarna.

De två senaste provserierna utfördes med samma muddermassor och bindemedelsinblandning, vardera med tre grupper med olika vattenkvot och fem olika vattencementtal (VCT) som fördelades mellan provbehållarna enligt Tabell 1. En blandning av 40 % byggcement och 60 % slagg (Merit) användes som bindemedel vid försöken, vilket blandades med 75 rpm i 5 minuter. Den 16:e provbehållaren fylldes med dekanteringsvätska från reducering av vattenkvoten i provmaterialet. Dubbla uppsättningar av motsvarande prover tillverkades för parallella mätningar av hållfastheten.

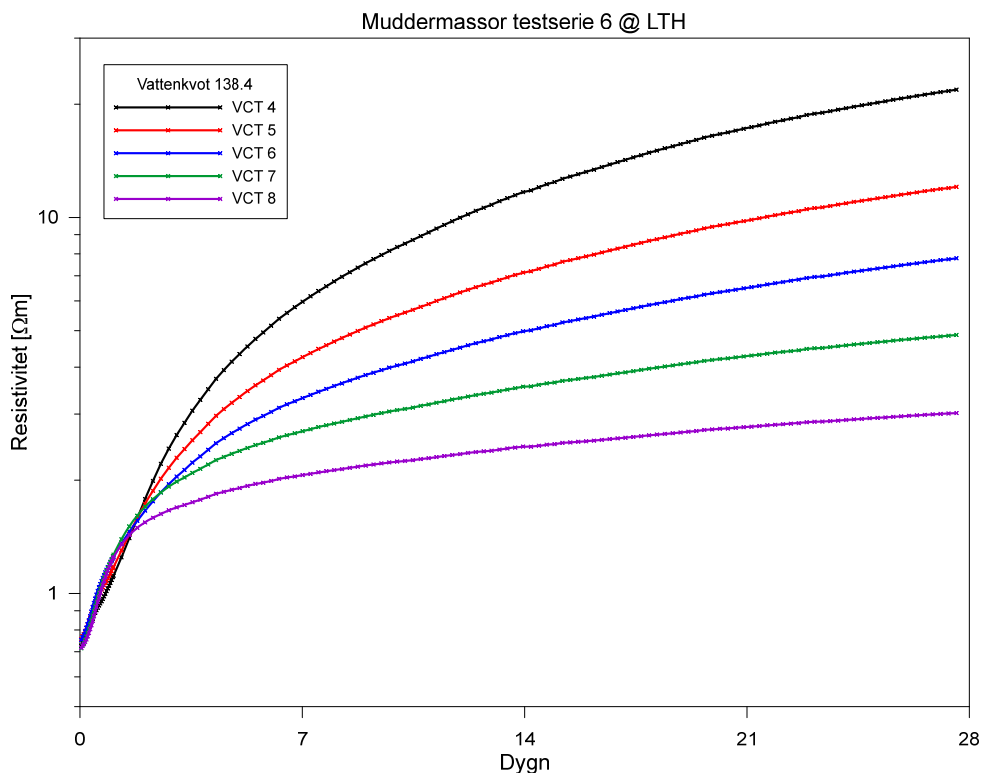
Tabell 1. Fördelning av prover med olika vattenkvot och vattencementtal (VCT) mellan provbehållarna.

Vattenkvot [%]	VCT				
	4	5	6	7	8
138,4	01	02	03	04	05
185,4	06	07	08	09	10
269,6	11	12	13	14	15

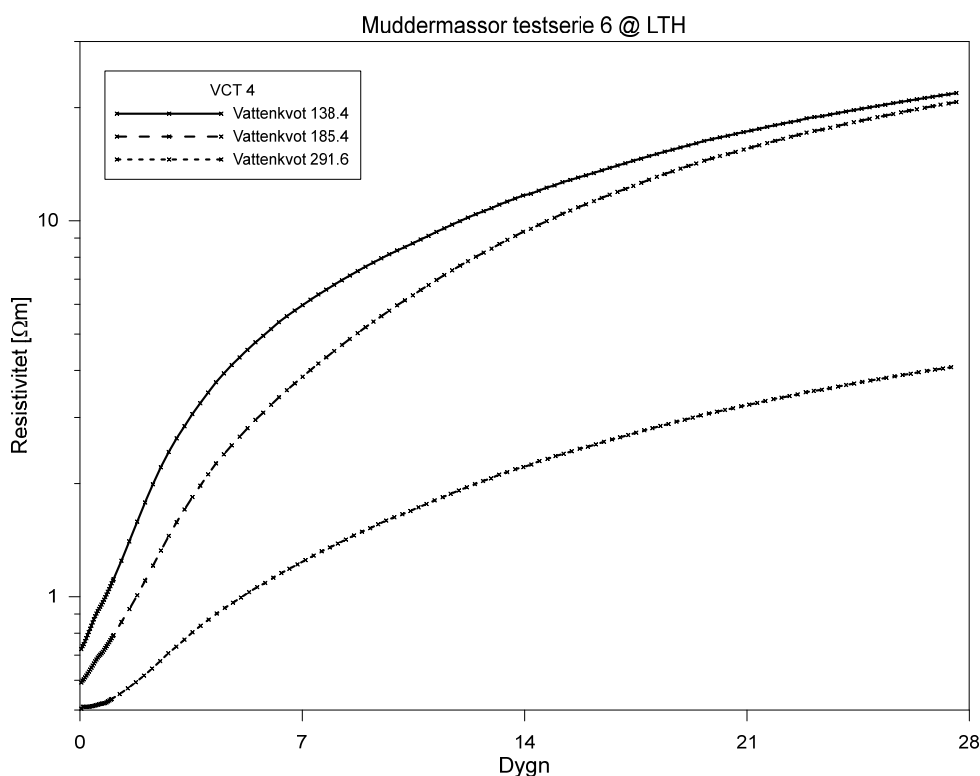


Figur 21. Två grupper med laboratorieprover görs redo för mätning (Foto: Torleif Dahlin).

Resistivetsdata från laborieförsöken har inte utvärderats tillsammans med data från de enaxiella tryckförsöken och de seismiska mätningarna än. Resultaten visar dock tydligt att resistivetsökningen kopplar mot vattencementtal och vattenkvot, se Figur 22 respektive Figur 23. Det gör att det är troligt att det går att hitta praktiskt användbara samband som gör att ERT skulle kunna användas för kvalitetskontroll av styvhetstillväxt med rumslig täckning. Genom analys av ökningstakten kan det tänkas att det finns potential för prediktering av styvhetstillväxten innan det är praktiskt möjligt att genomföra mekaniska tester.



Figur 22. Exempel på resultat från laboriemätning på stabiliserade muddermassor med olika vattencementtal.



Figur 23. Exempel på resultat från laboriemätning på stabiliserade muddermassor med olika vattenkvot.

## Fältförsök

ERT-mätning i samband med markstabilisering kan i vissa fall utföras på sedvanligt sätt med elektroder utplacerade längs markytan, men det är förmodligen begränsat till ytstabilisering och vissa typer av masstabilisering. I samband med KC-pelare och jetpelare är det ett par faktorer som gör att man är hänvisad till att mäta i borrhål med slitsade filter eller med elektrodsträngar installerade direkt i pelaren:

1. Hela arbetsytan är täckt med ett lager grov makadam som förhindrar eller försvårar elektrodkontakt.
2. Kravet på tillräckligt bra upplösning av variation i geometri och egenskaper längs hela pelarens längd kan inte uppnås med enbart ytbaserade elektroder.

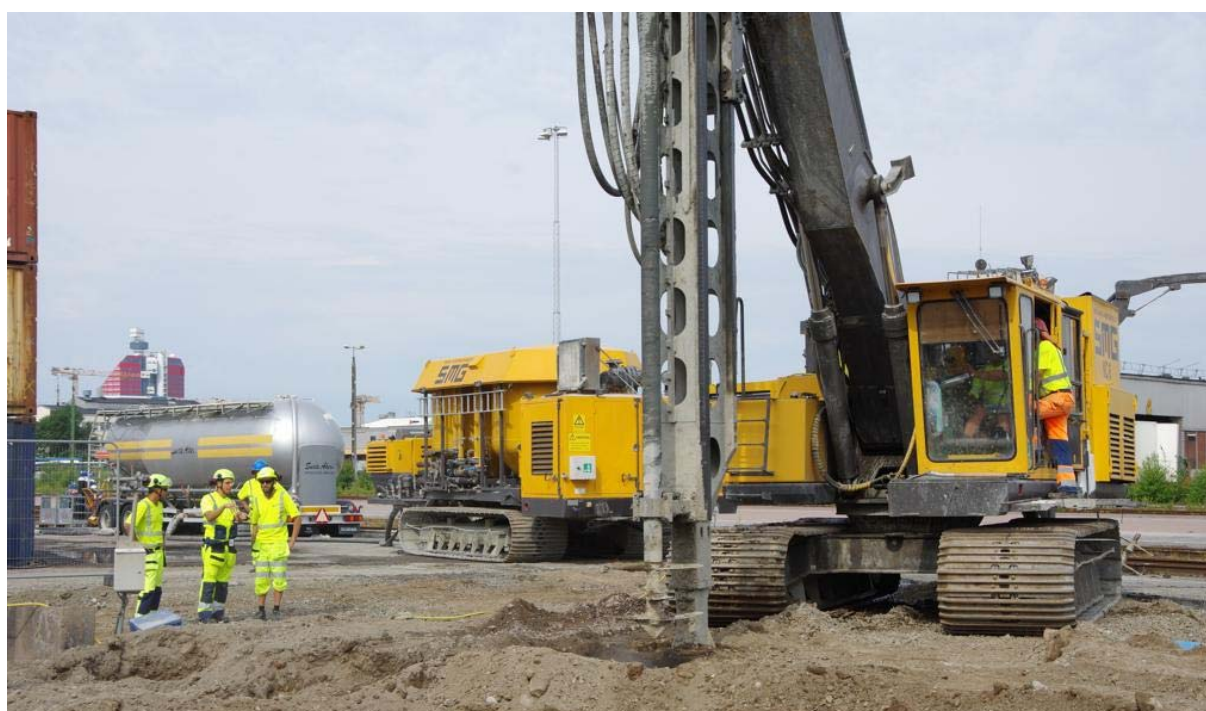
## Test med mätning i slitsade rör i KC-pelare

Försök med att installera slitsade rör i KC-pelare för mätning av ERT utfördes vid Västlänken 18-20 juli 2018. Testerna utfördes i ett avgränsat område i anslutning till ett provfält för KC-pelare för Västlänken med SMG (Soil Mixing Group) som entreprenör (Figur 24).

Slitsade rör av PEH med yttre-/innerdiameter 63/51 mm ("miljörör") avsedda för observation och provtagning av grundvatten installerades i tre pelare stabiliserade med KC50/50 med 50 – 80 kg/m<sup>3</sup> bindemedel (Tabell 2). Diametern för KC-inblandningen var 800 mm för samtliga. Vidare installerades ett slitsat rör i obehandlad mark som referens för naturliga förhållanden.

Tabell 2. Testinstallationer i KC-pelare Västlänken 2018.

Beteckning	Bindemedel [kg/m <sup>3</sup> ]	Djup [m.u.m.y.]	Elektrod-antal	Elektrod-utlägg [m]
KCVL-LTH-1	50	10,8	21	10
KCVL-LTH-2	50	17,1	32	15,5
KCVL-LTH-3	80	15,1	28	13,5
KCVL-LTH-4	-	17,1	32	15,5



Figur 24. Utrustning för stabilisering med KC-pelare som användes i samband med tester sommaren 2018 (Foto: Torleif Dahlin).

De slitsade rören installerades genom att de trycktes ner i centrum av den stabiliserade pelaren i direkt anslutning till att den tillverkats, i centrum av pelaren där borrsträngen förts ner och upp, med hjälp av en geoteknisk borrarbandvagn (Figur 25). Det visade sig dock att det var svårt att få ner de slitsade rören till botten av den stabiliserade pelaren i det första försöket på grund av att de deformerades när de trycktes ner, vilket resulterade ett djup på drygt 10 m. Genom att stabilisera det slitsade röret invändigt med geotekniska borrarstål gick det att föra ner påföljande rör längre, dock inte till fullt önskat djup för den tredje pelaren.



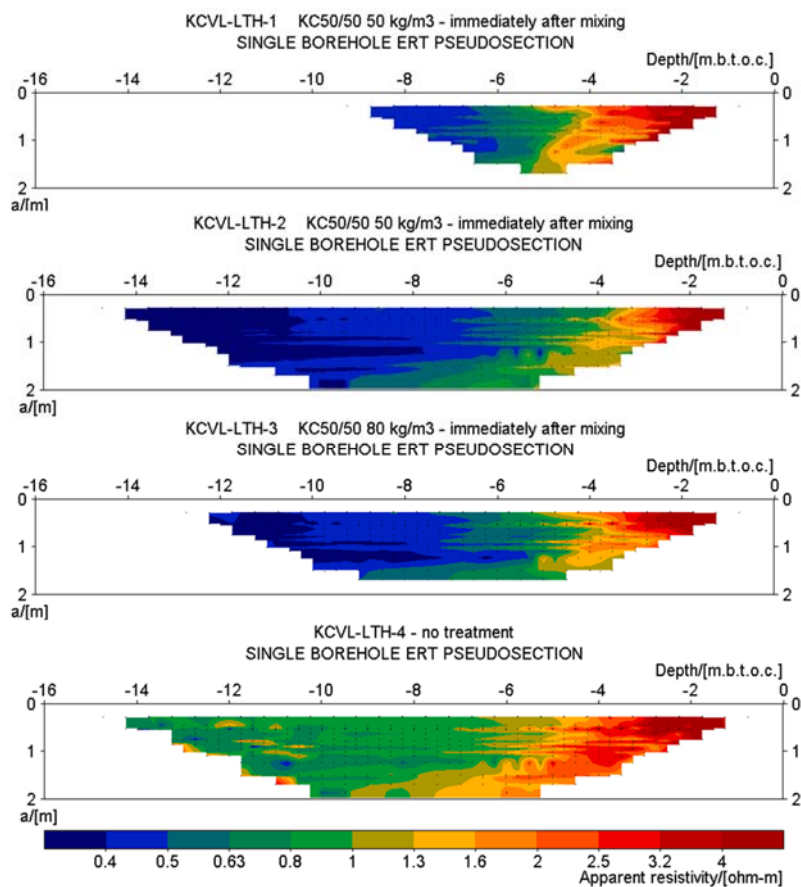


*Figur 25. Fälttester med ERT i Göteborg, sommaren 2018. Här gjordes mätningarna med ERT-kablar för borrhålsmätning som fördes ner i slitsade grundvattenrör (Foto: Torleif Dahlin).*

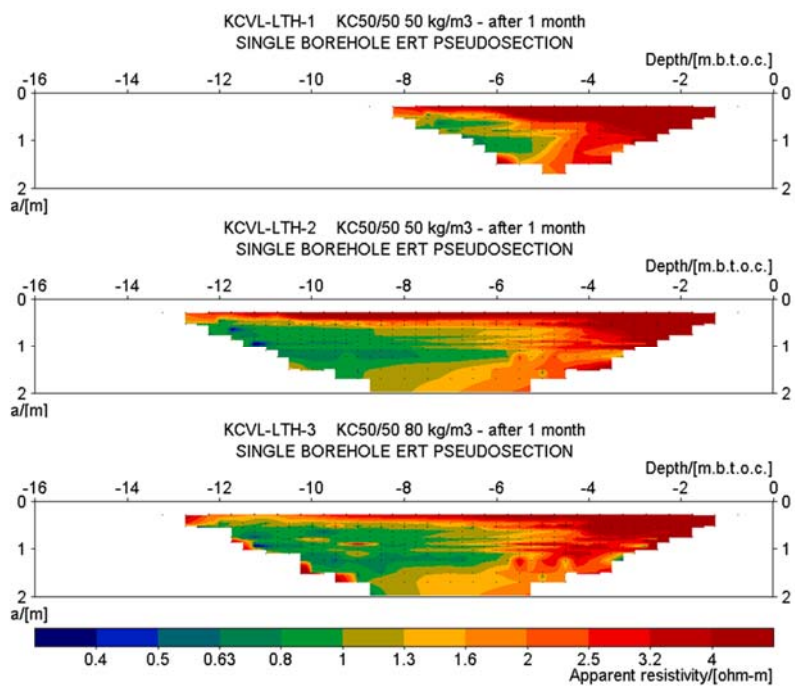
Mätningar genomfördes i direkt anslutning till att stabilisering hade genomförts genom att hänga ner en elektrodskabel avsedd för borrhålsmätning i de slitsade rören och mäta med expanderad multipel gradientkonfiguration (full-range gradient array) där spänningar mäts inte bara mellan strömelektrodena utan även utanför dessa (Zhou et al. 2020; Dahlin & Zhou 2006). Resultaten visade att det fungerade väl mättekniskt sett med bra datakvalitet att döma av pseudosektionerna (Figur 26). Pseudosektionerna visar också att det går att få elektrisk kontrast mellan behandlade och obehandlade massor, i form av en signifikant sänkning av den skenbara resistiviteten, även i marint avsatt lera.

När upprepade mätningar skulle genomföras en dryg månad senare (2018-08-24) visade det sig att de nedersta 2 m av KCVL-LTH-2 inte var åtkomliga, synbarligen för att bindemedel hade trängt in och härdats i den nedersta delen av det slitsade röret, medan övriga rör var oförändrat åtkomliga. Resultaten visar att de skenbara resistiviteter mestadels liknade bakgrundsvärdena i den obehandlade referensen, dock med en tydlig höjning för de kortaste elektrodavstånden vilket torde bero på härdning av bindemedlet.

Förutom att åtkomligheten för upprepade mätningar kan vara begränsad vid mätning i slitsade plaströr, så kan de ge upphov till sämre upplösning av pelarens diameter. Detta är en följd av att en signifikant del av den utsända strömmen vid mätningarna fokuseras i vätskan inne i plaströret så att en mindre del går i pelaren (Bearce et al. 2015).

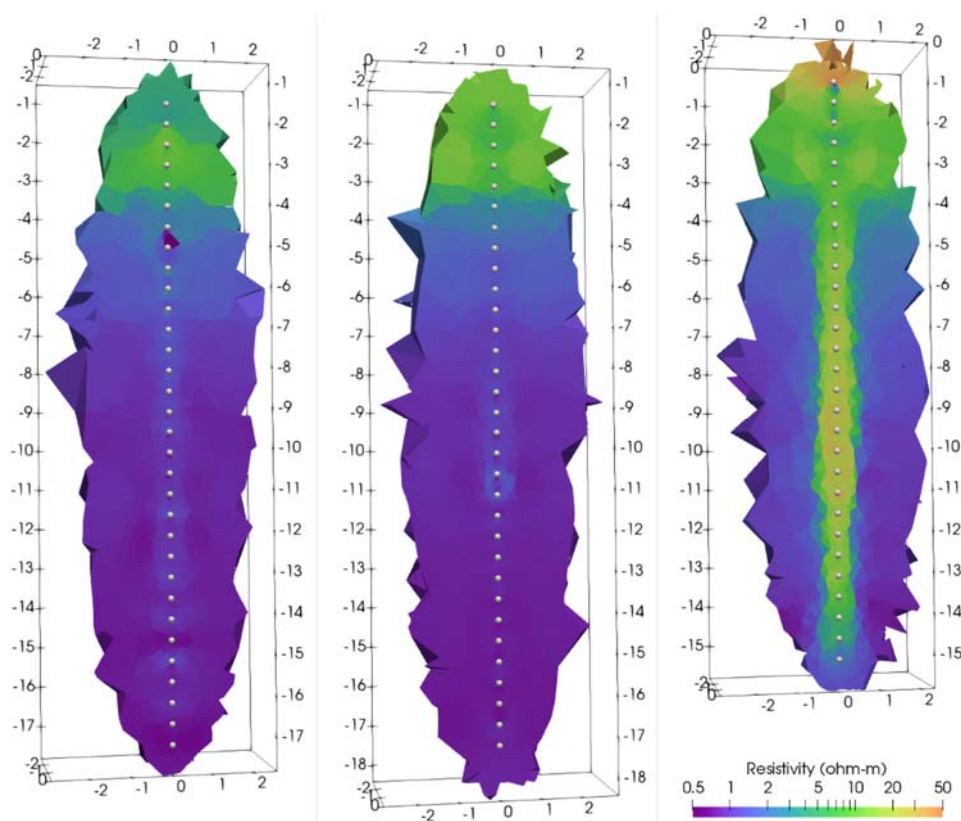


Figur 26. Pseudosektioner från testmätning i KC-stabiliserade pelare vid Västlänken, där KCVL-LTH-1, KCVL-LTH-2 och KCVL-LTH-3 mättes i direkt anslutning till stabiliseringen.



Figur 27. Pseudosektioner från testmätning i KC-stabiliserade pelare vid Västlänken drygt en månad efter stabiliseringen.

Mätdata inverterades i 3D med pyGIMLi vilket resulterade i modellerna i Figur 28, där de färgade volymerna visar resistivitet för det område som bedöms ha hög modellsäkerhet (modelltäckning över 1). De vita prickarna markerar elektroddpositionerna. Till skillnad mot pseudosektionerna syns det ingen tydlig skillnad mellan de nyligen tillverkade KC-pelarna och den obehandlade referensen. Det skulle kunna bero att inställningarna i inversionen inte är optimala, kanske i kombination med att informationen från en relativt begränsad mängd mätdata ska användas till att bestämma egenskaperna i en stor mängd modellceller i 3D. Data från den upprepade mätningen efter en dryg månad visar däremot en tydligt avgränsad högresistiv zon längs pelaren vars diameter ser ut att vara i linje med den nominella diametern 0,8 m, och där resistiviteten varierar synbart längs pelaren med högst resistivitet omkring 10 m djup vilket skulle kunna avspegla kvalitetsvariation.



Figur 28. Inversmodeller (pyGIMLi) från testmätning i KC-pelare, från vänster till höger; referens utan stabilisering (KCVL-LTH-4), strax efter stabilisering och efter en månad (KCVL-LTH-2). De färgade volymerna visar resistivitet för modellerna inom ett område som bedöms ha hög modellsäkerhet (modelltäckning över 1). De vita prickarna markerar elektroddpositionerna (Olsson et al. 2020).

### Tester med elektrodinstallation i KC-pelare

Tester med att installera elektrodsträngar direkt i KC-pelare med hjälp av KC-riggen har utförts i marin lera i anslutning till Västlänken vid två tillfällen under hösten 2019, i nära samarbete med Svenska Dmixab AB (Figur 29). Olika bottenförankringsdon testades för att hitta ett utförande som gör att mätkabeln stannar kvar i marken när borrhöret dras upp, bland



annat FOPS-vinge (Figur 30). Vid det första försöket var ankardonet underdimensionerat, vilket i kombination med misstanke om att elektrod-kabeln inte var fullt utsträckt längs sin hela längd ledde till att kabeln med förstärkning an PUR-överdragen stål-vajer kompletterades med en flexibel glasfiberstav (så kallad "rörål").



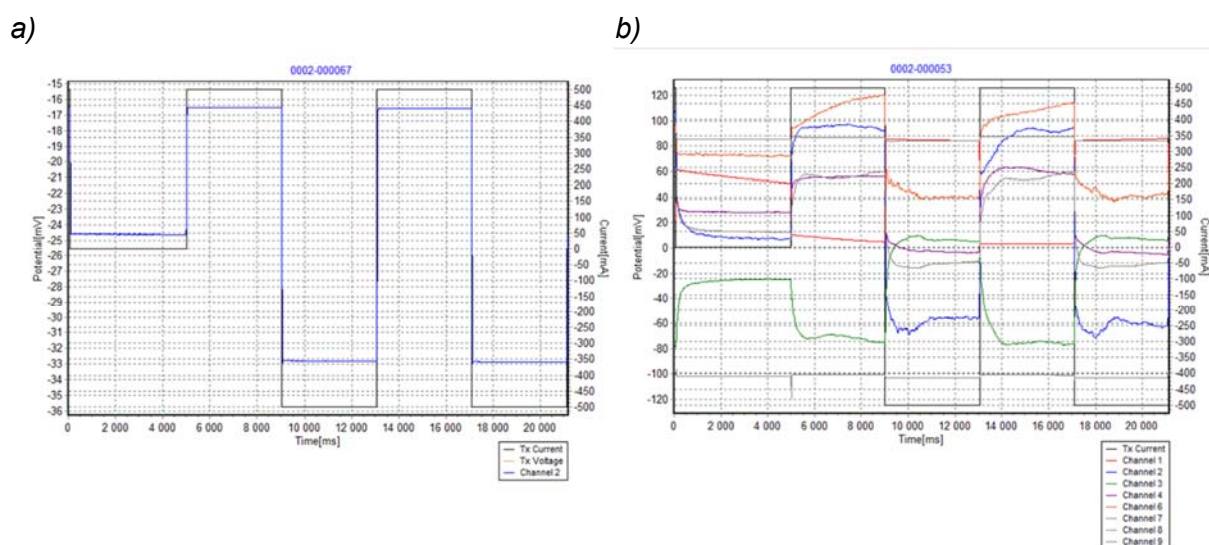
*Figur 29. Fälttester med ERT i anslutning till Västlänken i Göteborg, hösten 2019. Här installerades anpassade, relativt billiga, prototypkablar för ERT i KC-pelare. Riggen till vänster är redo att börja producera KC-pelare medan den högra riggen står beredd att direkt installera bottenförankringsdon och mätkabel (Foto: Per-Ivar Olsson).*



*Figur 30. Elektrod-kabeln förankrades i botten på KC-pelaren med hjälp av FOPS-vinge vid försöken på Västlänken (Foto: Mikael Lumetzberger).*



Mätdata uppvisar en del kraftigt störda signaler vars orsak inte har kunnat fastställas (Figur 31), det skulle kunna röra sig om till exempel elektrokemiska effekter eller elektriska signalstörningar som ledde till att de inverterade modellerna har ett stökigt utseende och inte är trovärdiga. Orsaken har inte kunnat fastställas ännu, men elektroderna skulle kunna vara en orsak. Efterföljande tester i andra mätmiljöer har visat att de metallhylsor som de utgörs av hade en tunn genomskinlig beläggning som inte hindrar strömsändning men som påverkar spänningsmätningens kvalitet. Beläggningen hade inte heller avslöjats vid kabeltest med multimeter som gjordes i samband med tillverkningen. Behandling av elektrodernas yta med smärgelduk eller fint sandpapper förbättrade datakvaliteten signifikant.



Figur 31. Exempel på uppmätta mätsignaler vid Västlänken 2019: a) utan, respektive b) med tydliga signalstörningar.

Ett försök med installation av elektrod kabel i KC-pelare i lakustrin lera genomfördes i samarbete med SMG inom deras underentreprenad i Logicenter i Bålsta i januari 2020. Installationen gjordes kvällstid när entreprenören hade kapacitet som kunde avvaras, med placering där stabiliseringsarbetena pågick. Elektrosträngen kunde tack vare glasfiberstaven föras in i borrsträngen utan svårigheter (Figur 32) och fästas i en FOPS-vinge, och den kunde sedan installeras i centrum av KC-pelaren med hjälp av stabiliseringsriggen (Figur 33).



*Figur 32 Elektrodkabeln förs in i borrhållningen på KC-riggen och avslutas med FOPS-vinge som förankring i botten av KC-pelaren i Bålsta (Foto: Torleif Dahlin).*



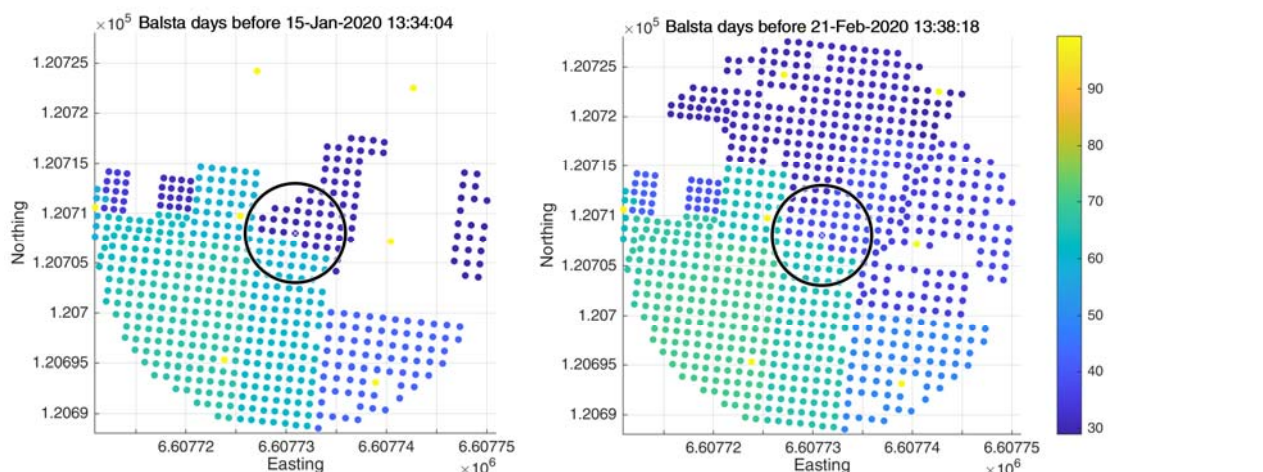
*Figur 33. Installation av elektrodkabel i centrum av KC-pelare i Bålsta (Foto: Torleif Dahlin).*





Figur 34. ERT-mätning med elektrodskabel i centrum av KC-pelare i Bålsta  
(Foto: Torleif Dahlin).

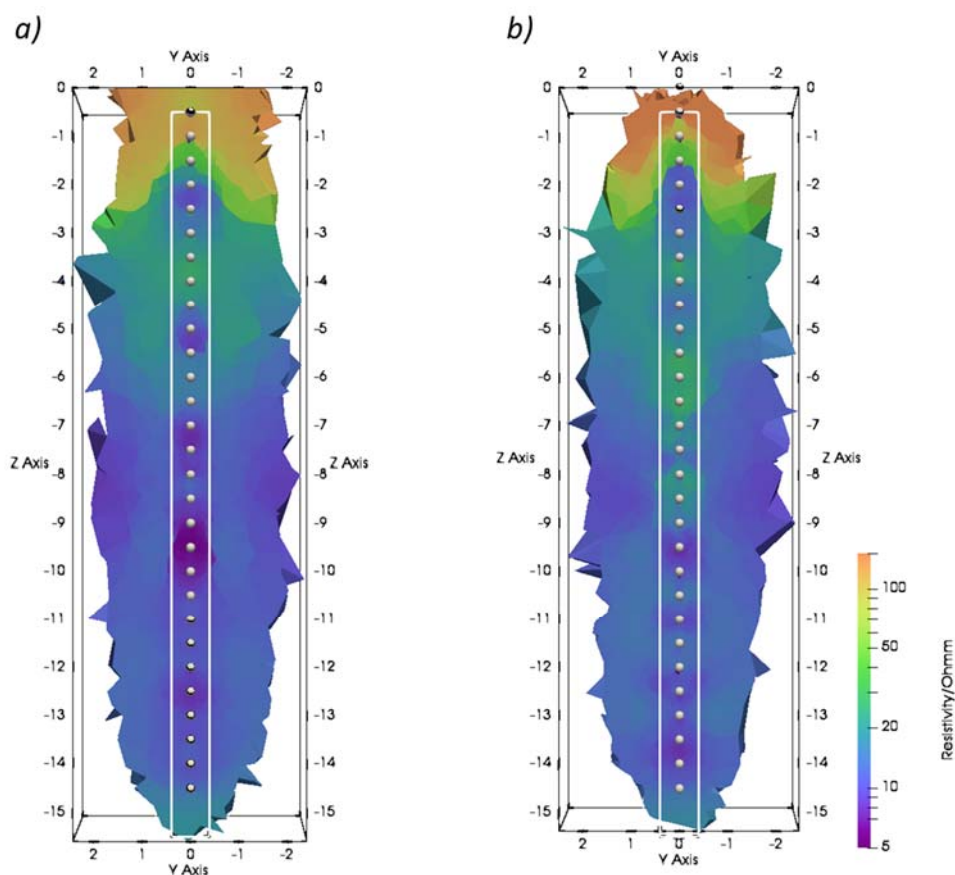
Figur 34 visar pågående mätning på den installerade kabeln ca 12 timmar efter att kabeln hade installerats, på grund av att installationen avslutades sent på kvällen var det inte möjligt att mäta i direkt anslutning till installationen. Den KC-pelare som testet utfördes på låg inne i en grupp med nyligen tillverkade pelare (Figur 35), och man fortsatte att tillverka pelare i omgivningarna. Mätdata torde vara starkt påverkade av förhöjda temperaturer, men eftersom temperaturen inte mättes är det okänt hur mycket förhöjda de var.



Figur 35. KC-pelare i Bålsta 15/1 respektive 21/2, med testpelarens läge markerat  
(Grafik: Per-Ivar Olsson).

Figur 36 visar inverterade modeller baserade på mätdata från ett halvt respektive 37 dygn efter stabiliseringen, där man kan se att resistiviteten generellt har ökat längs pelaren. Så

kallad time-lapse inversion och analys av förändringen i resistivitet skulle troligen ge en tydligare bild av denna.



Figur 36 3D inverterade modeller (pyGIMLi) från Bålsta, baserade på data mätta efter; a) 12 timmar, b) 37 dygn (Grafik: Per-Ivar Olsson).

### Test med elektrodinstallation i jetpelare

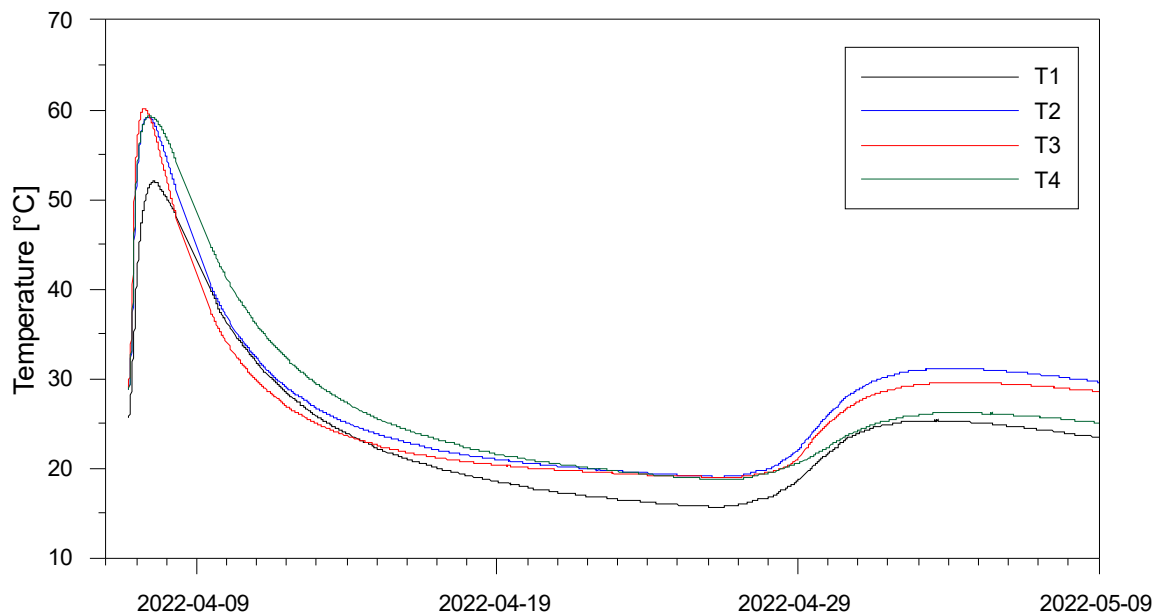
Inledande mindre försök med installation av elektroder i jetpelare gjordes i Örebro i samarbete med PEAB AB. Test med installation av både elektroder och temperaturgivare i jetpelare genomfördes i Moss i Norge i anslutning till ett järnvägsprojekt, i en formation där det förekommer kvicklera. För att det skulle vara möjligt att särskilja effekten av den enskilda pelaren utfördes den utanför den del av området som man arbetade för tillfället, så att den kunde betraktas som singelpelare initialt och tills att man några veckor senare byggde ytterligare pelare i dess närhet. Installationen gjordes genom att föra ner elektrodsträngen med hjälp av stabiliseringsriggen vilket fungerade bra (Figur 37).





*Figur 37. Fältförsök med installation av elektroder och temperaturgivare i jetpelare i Moss (Foto: Torleif Dahlin).*

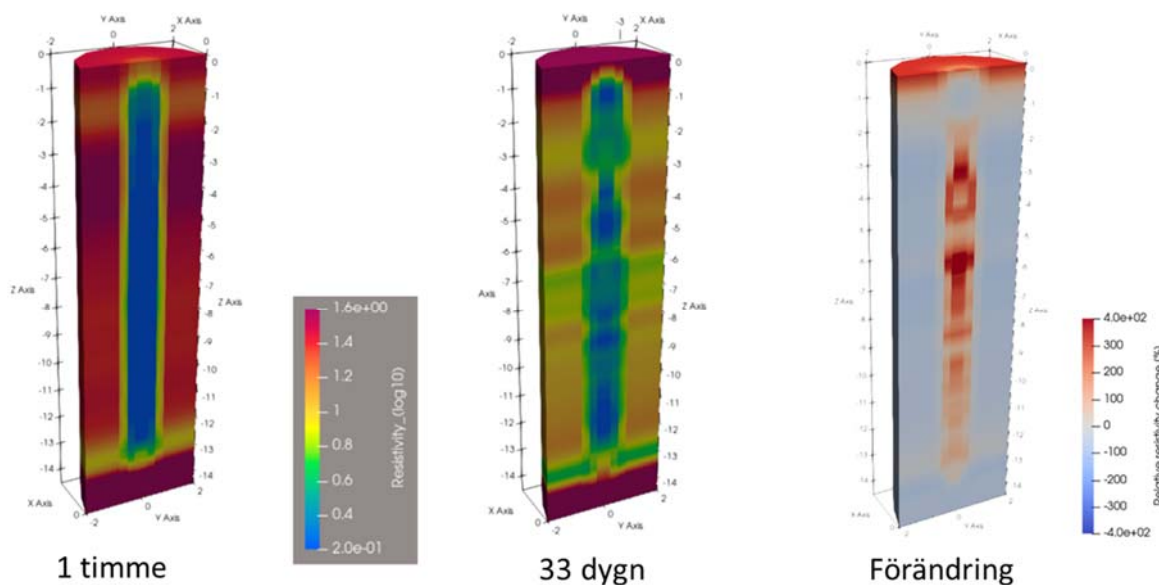
ERT-mätningarna gjordes med en ABEM Terrameter LS2. Under de första 2 dyggen (6-8 april) genomfördes 4 mätomgångar (med början 1, 17, 26 respektive 41 timmar efter stabiliseringen), följt av ytterligare en mätomgång efter en månad (9 maj). Det hade varit intressant att mäta fler gånger i nära anslutning till stabiliseringen, men den skedde sent på dagen och det var inte tillåtet att vara kvar på arbetsplatsen på kvällen. Mätdatakvaliteten var initialt övervägande god med ett fåtal dåliga data men försämrades dock efterhand som fler mätningar gjordes, och det finns en hypotes om att det skulle kunna bero på korrosion av elektroderna vilket motiverar försök med olika åtgärder. En datalogger med GSM-uppkoppling användes för att läsa av temperaturen från Pt1000-givare placerade på 4 olika nivåer under marken (Figur 38), vilket visade att temperaturen gick upp till som mest cirka 60 °C under de första dyggen efter stabiliseringen varefter den klingade av successivt. I slutet av april ökade temperaturen igen som följt av att ytterligare pelare hade utförts i närheten (Nilsagård & Knutsson 2022).



Figur 38. Temperaturmätning i jetpelare i Moss.

För att få korrekt geometri från mätning i enstaka stabiliserade pelare, vilket gjordes här och är relevant för inledande tester i stabiliseringsprojekt, måste inversionsprogramvara som kan hantera cylindriska geometrier (Figur 7) användas. Detta finns inte tillgängligt kommersiellt, men ny funktionalitet som möjliggör det har implementerats i programbiblioteket pyGIMLi (Rücker et al. 2017). I denna inversion är radien på ringarna i inversionsmodellen konstant och har ett fåtal ringar, där en av dem har valts till att sammanfalla med den nominella radien för pelaren. Detta innebär att modellen kan förväntas avspegla variationer i resistivitet längs pelaren väl, medan en avvikelse i radie i verklig pelare kommer att ge upphov till variation i resistivitet för att kompensera för det när radien inte kan varieras.

Mätresultaten visar en lågresistiv zon ( $<1 \Omega\text{m}$ ) som geometriskt sett väl motsvarar förväntad stabiliserad volym, där kontrasten i resistivitet mot omgivande material är över en tiopotens (Figur 39). Kontrasten i resistivitet är som störst vid mätningen efter 17 timmar och minskar sedan successivt för varje mätomgång. Större delen av den förmodat behandlade volymen har dock fortfarande lägre resistivitet än omgivande material efter en månad (Nilsagård & Knutsson 2022). Detta skiljer sig från resultat från försöken med KC-pelare, där resistiviteten i den stabiliserade volymen var högre än i omgivande mark efter en månad (Olsson et al. 2020). Det har inte gjorts någon temperaturkorrigerig av data eller modeller i samband med inversionen, och den förhöjda temperaturen när den sista mätningen genomfördes bidrar till att sänka resistiviteten vid det tillfället, vilket kan vara en del av förklaringen till de genomgående lägre resistiviteterna i omgivning såväl som i pelare. Det är också tänkbart att härdningsförloppet inte var helt avslutat. Avsikten vara att mäta vid ytterligare ett tillfälle när den nya temperaturpuls hade klingat av och härdningen fortgått ytterligare tid, men elektrodinstallationen hade nyligen schaktats bort när mätningen skulle genomföras.

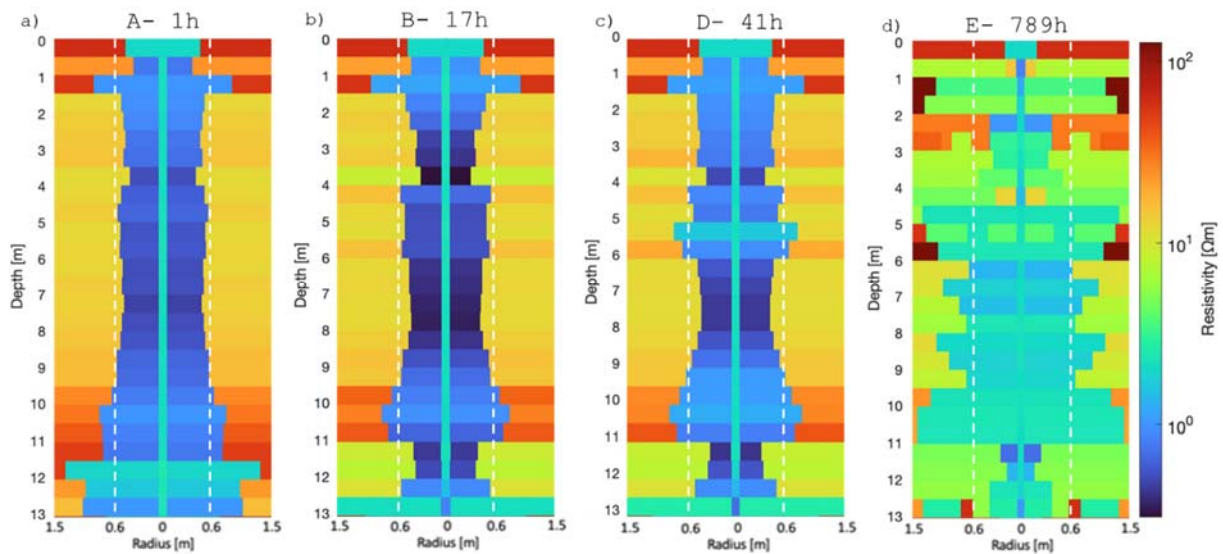


Figur 39. Resultat från fältförsök med installation av elektroder i jetpelare i Moss, resistivetsmodell från 3D inversion (pyGIMLi). Resistivitet 1 timme efter behandling, resistivitet 33 dygn efter behandling, samt förändring i resistivitet mellan dessa (Nilsagård & Knutsson 2022).

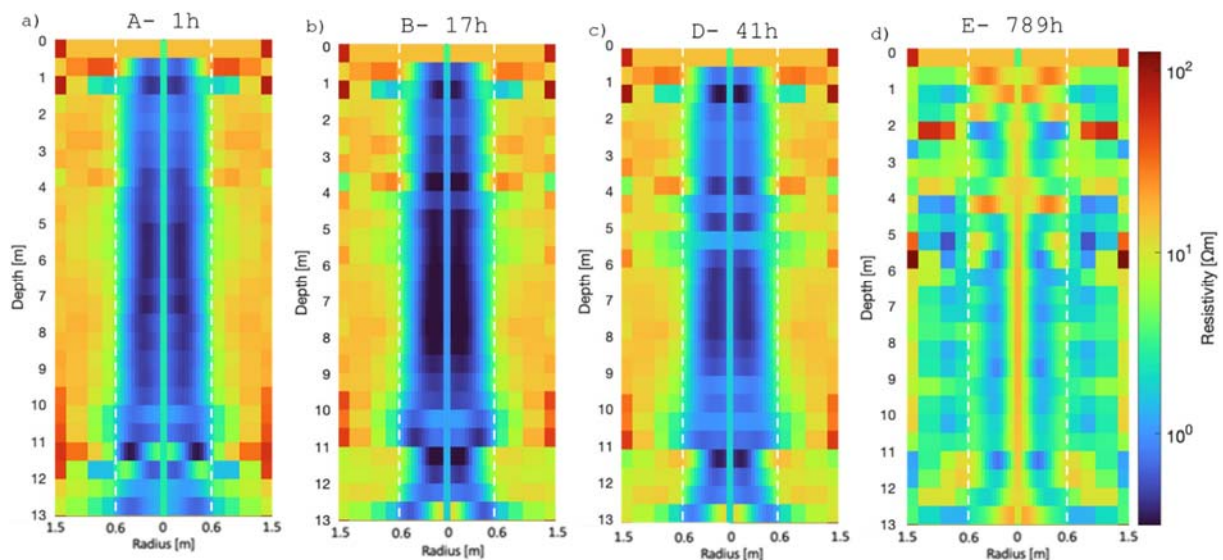
Mätdata från jetpelaren har även inverterats med cirkulär cylindriska modeller hjälp av programvaran AarhusInv (Auken et al. 2015; Nielsen 2007). Inversionsprogrammet har testats mot en svit med syntetiska modellresponser med varierande radier för den simulerade jetpelaren. Modellresponserna beräknades med samma programvara, och slumpmässigt brus på olika nivåer lades på data för att simulera mätstörningar före inversionen. Resultaten visade att inversionen avspeglade den modellerade radien väl med vissa begränsningar, och försämrad upplösning med högre brusnivåer (Pettersson 2023).

Inversionen har gjorts med två olika typer av modeller; med få ringar med variabel radie respektive många ringar med fast radie. I fallet med få ringar användes endast två ringar plus den halvoändliga volymen runt om. I mitten sattes en fast radie lika med borrhängens diameter, i praktiken är en vertikal cylinder, medan startmodellen i nästa ring hade jetpelarens nominella radie men tilläts variera. Figur 40 visar resultaten från fyra av de fem mätningar som gjordes (den utelämnade från 26 timmar liknar den från 41 timmar). Pelaren har en resistivitet  $<1 \Omega\text{m}$  medan omgivande mark ligger i storleksordningen  $20 \Omega\text{m}$  vilket är rimligt för kvicklera. Radien på den lågresistiva pelaren varierar mot djupet, men också en del mellan mätomgångarna (Figur 40a-c). Detta kan bero förmodligen på att de förekommer mätstörningar i data men kan också delvis tänkas vara kopplat till temperaturförändringar i pelaren under härdningsförloppet, vilket också förändrar resistiviteten. Det skulle troligen kunna hanteras bättre genom att, förutom att optimera datakvaliteten och ta hänsyn till temperaturen, koppla ihop inversionen mellan tidsstegen i så kallad time-lapse inversion. Vid det sista tidssteget, efter 33 dygn, är övergången mellan pelare och omgivande mark otydlig med lägre kontrast (Figur 40d). Vid mättillfället hade temperaturen i hela markvolymen gått upp som en följd av byggande av jetpelare runt testpelaren, förutom att härdning av pelaren skett.





Figur 40. Resultat från fältförsök med installation av elektroder i jetpelare i Moss, resistivetsmodell från inversion med cirkulär cylindrisk modell med 2 ringar (AarhusInv); a) 1 timme, b) 17 timmar, c) 41 timmar, och 33 dygn efter behandling. Nominell pelarradie är markerad med vit streckad linje (Petersson 2023).



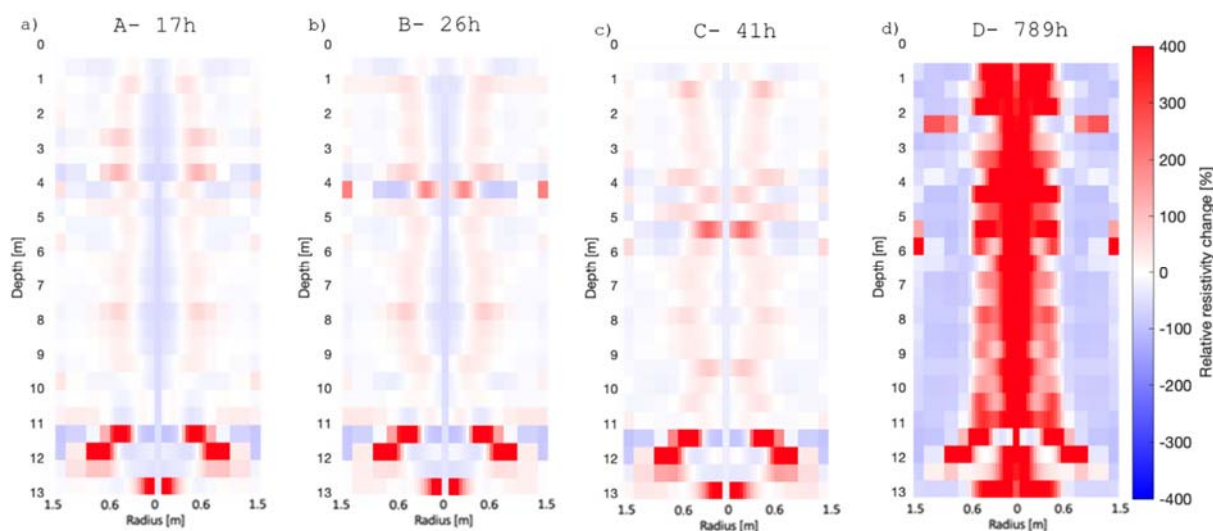
Figur 41. Resultat från fältförsök med installation av elektroder i jetpelare i Moss, resistivetsmodell från inversion med cirkulär cylindrisk modell med många ringar (AarhusInv); a) 1 timme, b) 17 timmar, c) 41 timmar, och 33 dygn efter behandling. Nominell pelarradie är markerad med vit streckad linje (Petersson 2023).

Inversionen med cylindriska koordinater och många koncentriska ringar gav modeller med mera gradvisa övergångar mellan jetpelare och omgivande mark, vilket är en följd av inversionen med mjukhetsband mellan intilliggande modellringar och -djupnivåer (Figur 41a-c). Huvuddragen i modellerna liknar de som är inverterade med få ringar (Figur 40), så tillvida att större avvikelser i radie indiceras på samma nivåer om än inte så tydligt. Modellen från 33 dygn efter stabilisering visar ingen synbar avgränsning för pelaren (Figur



41d), men mittcylindern efter borrsträngen avtecknar sig tydligt med högre resistivitet än omgivningen. Figur 42 visar den relativa förändringen i resistivitet mellan mätningen efter 1 timme och efterföljande mätningar. Förändringen från 1 timme till 17, 26 respektive 41 timmar är inte så stor förutom i botten där det likartade utseendet för samtliga dessa tyder på att det beror på artefakter på grund av mätstörningar i data från det första mätilfallet. Det är möjligt att några få data borde ha tagits bort före inversionen av data från 1 timme, kanske har kvalitetskontrollen av data varit mindre sträng där eftersom det övervägande var bättre kvalitet. Förändringen är mycket tydlig till mätningen efter 33 dygn där jetpelaren framstår som ett område med ökad resistivitet (Figur 42d), på liknande sätt som för resultaten från inversion med pyGIMLi (Figur 39).

Det har inte varit praktiskt möjligt att på ett enkelt sätt rita upp förändringen i resistivitet från modellerna med få ringar eftersom radien för ringarna (diskretiseringen) skiljer sig åt mellan tidsstegen. Ett sätt att lösa det hade kunnat vara att göra en time-lapse inversion där alla tidsstegen är med, och med utgångspunkt från resultaten välja den "bästa" geometrin för att sedan göra om inversionen med fixerade radier för att optimera resistivitetera.



Figur 42. Resultat från fältförsök med installation av elektroder i jetpelare i Moss, förändring i resistivitet jämfört med den 1 timme efter behandling baserat på inversion med cirkulär cylindrisk modell med många ringar (Aarhuslv); a) 17 timmar, b) 26 timmar, c) 41 timmar, och d) 33 dygn efter behandling (Petersson 2023).

Variationen i resistivitet längs jetpelaren, och med diametern längs delar av den, reflekterar troligen variation i egenskaper som skulle kunna kopplas till geologiskt material eller kvalitet. Tyvärr finns det inga referensdata från kvalitetskontroll av jetpelaren med annan metod, och inte heller någon detaljerad geologisk information tillgänglig. Förändringen i resistivitet som funktion av tid innehåller information som sannolikt skulle kunna korreleras mot mekaniska egenskaper på motsvarande sätt som för laboriemätningarna om det fanns tillgång till relevanta referensdata. Det skulle också krävas resistivitetmätning vid fler tidpunkter, vilket skulle kunna uppnås med ett instrument som är installerat på plats och mäter automatiskt med regelbundna intervall, exempelvis dagligen eller flera gånger per dygn.

## Slutsatser

Resultaten visar att ERT har stor potential för att användas för volymstäckande kvalitetskontroll av markstabilisering. Metoden ger tydliga resultat omedelbart efter stabilisering i geomaterial som inte har alltför låg resistivitet, d.v.s. lakustrin lera, kvicklera, sand, etcetera, där förmodat stabiliserad volym är tydligt avgränsad av lägre resistivitet. I marina leror som inte har lakats ur och i marina muddermassor kan det bli en mindre sänkning av resistiviteten som följd av temperaturökningen, dock blir resultaten tydligast genom högre resistivitet än omgivande ostabiliserat material efter att bindemedlet härdat. Variationer i resistivitet i den stabiliserade volymen som uppmätts i fältförsöken avspeglar troligen kvalitet, det behöver dock verifieras med relevanta referensdata. En obesvarad fråga är varför resistiviteten i den härdade jetpelaren i försöket i Moss inte är högre än för ostabiliserad kvicklera efter en månad. Det finns behov av vidare tester i olika geomaterial och med olika bindemedel för att man ska kunna dra mera generella och säkra slutsatser kring tillämpbarhet och begränsningar för metoden.

Det är möjligt att mäta resistiviteten i en nyttillverkad pelare genom att installera ett slitsat plaströr i den, och hänga ner en elektrod kabel avsedd för ERT-mätning i borrhål. Det kan dock vara svårt att få ner plaströret hela vägen vilket gör att man riskerar att missa den nedersta delen, och vid upprepad mätning finns risk för att stabiliseringsmedel tränger in i röret och blockerar en del av det. Vidare ger det sämre upplösning av pelarens diameter, jämfört med elektroder som har direktkontakt med pelaren, på grund av att en betydande andel av strömmen går i vätskan inne i röret istället för i pelaren.

Prototyper till elektrod kablar för ERT som är flexibla och robusta nog att installeras i KC-pelare och jetpelare med hjälp av stabiliseringsriggen har utvecklats och testats. Installation med KC-rigg och jetstabiliseringsrigg har genomförts i olika entreprenadprojekt vilket har visat att det fungerar i de utmanade mätmiljöer som är typiska i stabiliseringsprojekt. Resultaten är lovande men verifiering med relevanta referensdata behövs. Vidare har datakvaliteten varit otillfredsställande i flera test vilket kan tänkas bero på elektrod korrosion, vilket behöver studeras närmare.

Lock med inbyggda elektroder till provbehållare av SGF-standard har utvecklats och använts för flera mätserier laboriemätningar, där samma prover har använts för seismiska tester och enaxiella trycktester. Mätningarna på KC-stabiliserade visar att tillväxt i resistivitet och styvhet följs åt. Mätserierna på stabiliserade muddermassor med olika vatteninnehåll och mängd bindemedel visar tydligt att resistivitetsökningen kopplar mot vattencementtal och vattenkvot, vilket gör att det förväntas gå att finna korrelation mellan resistivitet och styvhet när dessa data utvärderas. Sammantaget tyder detta på att ERT har stor potential för rumslig kvantifiering av hållfasthet genom korrelation mot mekaniska tester. Även här behövs, förutom utvärdering av befintliga data, vidare tester i olika geomaterial och med olika bindemedel för att man ska kunna dra mera generella och säkra slutsatser om möjligheter och begränsningar.

De utvecklade elektrodlocken med inbyggda elektroder möjliggör resistivitetsmätning på godtyckliga ostörda jordprover i SGF-cylindrar. Detta banar väg för resistivitetsmätning på prover tagna för geotekniska analyser i olika projekt, vilket skulle göra det praktiskt möjligt att bygga upp en databas över resistiviteter hos jordar som kan kopplas till deras geotekniska egenskaper. En sådan databas skulle kunna vara värdefull för tillämpbarheten av ERT i olika geotekniska sammanhang. För att det ska fungera i praktiken torde det dock krävas

förenkling och strömlinjeförning av hela kedjan mätinstrument, mätprocess, datahantering och arkivering.

Numerisk modellering har använts dels för utvecklingen av laboratoriedonen, dels för upplösningförmågan för fältmätning med elektroder installerade i stabiliserade pelare. Invers numerisk modellering (inversion) med olika algoritmer och programvaror har anpassats och testats för tolkning av syntetiska modelldata och fältdata. Även här finns det behov av förenkling och strömlinjeförning av datahantering, databearbetning och arkivering. Arbete med algoritmer och programvara som har gjorts inom ramen för projektet kan snabba upp och förenkla processen inklusive alla steg från datainsamling till visualiserade koordinatsatta modeller. Dock återstår arbete för att knyta ihop de olika stegen till en sömlös process.

## Förslag till fortsatt arbete

De laboratoriemätningar som har gjorts inom detta projekt är begränsade vad avser typ av stabiliserat material och typ av bindemedel. För att kunna utvärdera metodens lämplighet och begränsningar i olika geomiljöer och med olika bindemedel behöver systematiska laboratoriemätningar genomföras med kombinationer av dessa.

Fältförsök med tillgång till referensdata från andra metoder för kvalitetskontroll är nödvändigt för att möjliggöra verifiering, exempelvis framgrävning, kärnborrning eller seismik. Fältförsök behöver göras i olika typer av geomaterial, till exempel sötvattens- och saltvattensavsatt lera, kvicklera, organiska jordar, sand, etc., för olika typer av stabiliseringsmetoder och bindemedel.

Det har förekommit datakvalitetsproblem som kan tänkas vara kopplade till elektrodkorrosion vilket gör detta bör utredas teoretiskt och kombineras med systematiska tester med beaktande av alternativa elektrodmaterial, som till exempel grafit.

För snabb kvalitetskontroll av pelare skulle det vara intressant att utveckla och testa en lång elektrodsond, liknande en lång CPT-R-sond, med tillräckligt stor bredd i inträngningsdjup i den omgivande formationen liknande den som föreslagits av Mooney & Bearce (2017). Det skulle öppna för snabb kvalitetskontroll av nytillverkade pelare med hjälp av resistivitetssondering i centrum av dessa, men inte vara lämpligt för att följa härdningsförloppet.

## Litteraturförteckning

Akhnouk A.K., 2021. Overview of Concrete Durability Evaluation Using Electrical Resistivity. in Collaboration and Integration in Construction, Engineering, Management and Technology.

ASTM (2005) *Standard test method for measurement of soil resistivity using the two-electrode soil box method*. G187–05, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2p.

Auken E., Christiansen A.V., Jacobsen B.H., Foged N. & Sørensen K.I. (2003) Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 53(4), 497-506.

Auken E., Vest Christiansen A., Kirkegaard C., Fiandaca G., Schamper C., Behroozmand A., Binley A., Nielsen E., Effersø F., Christensen N.B., Sørensen K., Foged N. & Vignoli G. (2015) An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data. *Exploration Geophysics*, 46(3), 223-235.

Bearce R. G., Mooney M. A. & Kessouri P. (2015) Electrical Resistivity Imaging of Laboratory Soilcrete Column Geometry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(3), 04015088.

Binley A. & Slater L., 2020. *Resistivity and Induced Polarization - Theory and Applications to the Near-Surface Earth*. Cambridge University Press. ISBN 978-1-108-49274-4, 388p.

Cosoli G., Mobili A., Tittarelli F., Revel G.M. and Chiariotti P., 2020. Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 10, 9152.

Dahlin T., Lumetzberger M., Hedblom P., Rejkjär S. & Olsson P.I. (2023) Novel electrode design for non-destructive resistivity measurement on material in geotechnical standard sample cylinders, in *Procs. Near Surface Geoscience 2023*, Edinburgh, 3-7 September 2023, 5p.

Dahlin T., Lumetzberger M., Hedblom P., Olsson P.I., Rejkjär, S. & Holmén M. (2023) ASSERT - Kontroll av markstabilisering med resistivitetstomografi (ERT), in *Procs. Grundläggningdagen 2023*, Stockholm 2023-03-16, 219-228.

Dahlin T. & Zhou B. (2006) Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4, 113-123.

Dahlin, T. (2000) Electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, 48(1), 181-187.

Dahlin, T., Svensson, M. & Lindh, P. (1999), DC resistivity and SASW for validation of efficiency in soil stabilisation prior to road construction, in *Procs. 5th Meeting of the European Association for Environmental and Engineering Geophysics*, 5-9 September 1999, Budapest, 2p.

Jeppsson H., Dahlin T., Sparrenbom C., Barth J., Persson G., Olofsson B., Rosberg J.-E., Norrman J., Fagerlund F. & Barmen G. (2022) Grundvattenundersökningar. in *Grundvattenboken*, ed. Sparrenbom C. and Jeppsson H., ISBN 9789144135922, 225-320.



- 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. *Journal of Applied Geophysics*, 142, 14–22.
- Lindh, P., Dahlin, T. & Svensson, M. (2000) *Comparisons between Different Test Methods for Soil Stabilisation*, Procs. GeoEng2000, Melbourne, Australia, 14-24 Nov. 2000.
- Liu S.U., Du Y.J., Han L.H. & Gu M.F (2008) Experimental study on the electrical resistivity of soil–cement admixtures. *Environmental Geology*, 54:1227–1233.
- Loke, M.H., Acworth, I. and Dahlin, T. (2003) A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys, *Exploration Geophysics*, 34(3), 182-187.
- Mooney M.A. & Bearce R.G. (2017) Assessment of Jet Grout Column Diameter during Construction Using Electrical Resistivity Imaging, in *Procs. Grouting 2017*, July 9-12, Honolulu, Hawaii, GSP 289, 42-51
- Nielsen E. (2007) *Cylindersymmetrisk DC-Respons – Implementering, Analyse & Inversion*. Specialeoppgave i Geofysik 20001377, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, 140p.
- Nilsagård E. & Knutsson R., 2022. *Application of ERT for Quality Assurance in Jet Grouting Columns; A development of an alternative quality control*. M.Sc. thesis, Lund University. ISRN LUTVDG/(TVTG—5175)/1-113/(2022).
- Oldenburg D. W., Kang S. & Heagy L. J. (2023) Geophysical inversion for engineers. In: *Engineering Geophysics*. CRC Press, ISBN: 978-1-003-18467-6, pp. 10-20.
- Olsson P.I., Rejkjär, S., Hedblom P. & Dahlin T., 2020. ASSERT - Kontroll av markstabilisering med resistivitetstomografi. in *Procs. Grundläggningdagen 2020*, On-line various days due to pandemic, 221-230.
- Palacky G. (1987) Resistivity Characteristics of Geological Targets. In: Nabighian, M., Ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory*, Society of Exploration Geophysicists Tulsa, OK, 53-129.
- Parker T. R., Gillies A., Shatalin, S. V. & Farhadiroushan, M. (2014) “The intelligent distributed acoustic sensing”, *Proc. SPIE*, vol. 9157. p. 91573Q–91573Q–4.
- Petersson M. (2023) *Processing and inversion of ERT data of single stabilized columns with software designed for cylindrical geometry*. Examensarbete, Teknisk geologi, Lunds universitet, ISNR LUTVDG/(TVTG–5181)/1-64/(2023), 64s.
- Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V. and Dahlin, T. (2004) *Quick clay in Sweden*. Report 65, ISSN 0348-0755, ISRN SGI-R--04/65--SE, Statens Geotekniska Institut (Swedish Geotechnical Institute), Linköping, 145p.
- Ronczka M., Günther T., Grinat M. & Wiederhold H. (2020) Monitoring freshwater–saltwater interfaces with SAMOS – installation effects on data and inversion. *Near Surface Geophysics*, 18(4), 333-463.
- Rücker C., Günther T. & Wagner F.M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers and Geosciences*, 109, 106-123.
- Rydén N. och Lindh P. (2015) *Oförstörande provning av jetpelare*, SBUF, Stockholm, rapport id 12841, 32p.

SGF (2009) *Metodbeskrivning för provtagning med standardkolvprovtagare Ostörd provtagning i finkornig jord*, Svenska geotekniska föreningen, SGF Rapport 1:2009, 16p.

Vincent, N. A., Shivashankar, R., Lokesh, K. N., & Jacob, J. M. (2017). Laboratory Electrical Resistivity Studies on Cement Stabilized Soil. *International Scholarly Research Notices*, 2017, 8970153. <http://doi.org/10.1155/2017/8970153>.

Zhang D.-W., Chen L. & Liu S.-Y. (2012) Key parameters controlling electrical resistivity and strength of cement treated soils. *J. Cent. South Univ.*, 19: 2991–2998.

Zhou B., Bouzidi Y., Ullah S. & Asim M. (2020) A full-range gradient survey for 2D electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 18, 609–626.

# Bilaga 1. Publikationer

## Konferensbidrag

- Dahlin T., Lumetzberger M., Hedblom P., Rejkjær S. & Olsson P.I. (2023) Novel electrode design for non-destructive resistivity measurement on material in geotechnical standard sample cylinders, in *Procs. Near Surface Geoscience 2023*, Edinburgh, 3-7 September 2023, 5p.
- Dahlin T., Lumetzberger M., Hedblom P., Olsson P.I., Rejkjær, S. & Holmén M. (2023) ASSERT – Kontroll av markstabilisering med resistivitetstomografi (ERT), i *Procs. Grundläggningdagen 2023*, Stockholm 2023-03-16, 219-228.
- Olsson P.I., Lumetzberger M., Hedblom P. & Dahlin T. (2020) ASSERT - Kontroll av markstabilisering med resistivitetstomografi. in *Procs. Grundläggningdagen 2020*. Stockholm, Sweden, 1 - 10.

## Examensarbeten

- Maždin Stefani (2020) *Kvalitetskontroll av kalkcementpelare - behovsstudie för metodutveckling, sammanställd från litteratur och intervjuer*. Examensarbete, Teknisk geologi, Lunds universitet, [ISRN LUTVDG/\(TVTG-5165\)/1-44/\(2020\)](#), 44s.
- Nilsagård Edvin & Knutsson Rebecka (2022) *Application of ERT for Quality Assurance of Jet Grouting Columns -A development of an alternative quality control*. Examensarbete, Teknisk geologi, Lunds universitet, [ISRN LUTVDG/\(TVTG-5175\)/1-84/\(2022\)](#), 84s.
- Petersson Mårten (2023) *Processing and inversion of ERT data of single stabilized columns with software designed for cylindrical geometry*. Examensarbete, Teknisk geologi, Lunds universitet, [ISRN LUTVDG/\(TVTG-5181\)/1-64/\(2023\)](#), 64s.