

ASSERT - KVALITETSKONTROLL AV MARKSTABILISERING MED ELEKTRISK RESISTIVITETSTOMOGRAFI (ERT)

Torleif Dahlin ^A, Mikael Lumetzberger ^A, Per Hedblom ^A, Simon Rejkjær ^A, Martin Holmén ^B

^A Teknisk geologi, LTH/Lunds universitet

^B SGI, Linköping

SAMMANFATTNING

Markstabilisering blir allt vanligare för exploatering av områden med dålig bärighet. Det finns dock 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 har fokus på hållfastheten i den stabiliserade volymen, och förutsätter att bindemedlet har härdat.

FoU-projektet ASSERT har fokus på kvalitetskontroll med hjälp av elektrisk resistivitetstomografi (ERT). Tanken är att använda metoden i omedelbar anslutning till inblandning av bindemedel för att avgränsa den markvolym som har behandlats med bindemedel från obehandlade delar. ERT skulle då 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. Vidare finns det potential för volymstäckande kvantifiering av hållfasthetstillväxten via korrelation mellan förändring av resistivitet och förändring i hållfasthet under härdningsprocessen, men det torde behöva göras plats-specifikt.

Test och verifiering av metoden sker i olika geomaterial i laboratorium och i fält, inklusive fullskaletester för olika typer av stabilisering. Vidare ingår metodutveckling och anpassning för tillämpningen, för att metoden ska bli tillräckligt robust och snabb för att kunna användas rutinmässigt på ett hållbart sätt. Fältförsök har genomförts med att installera elektroder i KC-pelare och jetpelare i direkt anslutning till stabiliseringen. Laborrietester har hittills gjorts för KC-stabilisering av lera och för stabilisering av muddermassor.

SUMMARY

Soil stabilisation is becoming increasingly common for the development of areas with poor bearing capacity. However, there is a need for better and volume-wide control methods for quality assurance. The control methods can be divided into two steps, where the first takes place in immediate connection to the mixing of binders to check whether the entire intended volume has been successfully treated, or whether there are zones that need completion. The second step focuses on the strength of the stabilised volume and assumes that the binder has cured.

The R&D project ASSERT focuses on quality control using electrical resistivity tomography (ERT). The idea is to use the method in immediate connection with the mixing of binders to delineate the soil volume that has been treated with binders from untreated parts. ERT could then be used to quickly check the results of the stabilisation, so that supplementary measures can be taken in zones of insufficient treatment while personnel and equipment are in place. Furthermore, there is potential for volume-wide quantification of strength growth via correlation between change in resistivity and change in strength during the curing process, but this would probably need to be done on a site specific basis.

Testing and verification of the method takes place in different geomaterials in the laboratory and in the field, including full-scale tests for different types of stabilisations. Furthermore, method development and adaptation for the application are included, so that the method becomes sufficiently robust and fast to be used routinely in a sustainable manner. Field trials have been carried out by installing electrodes in lime-cement columns and jet columns in direct connection to the stabilisation. Laboratory tests have so far been carried out for lime-cement stabilisation of clay and for stabilisation of dredged masses.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Markstabilisering i olika former är vanligt för exploatering av områden med dålig bärighet. Det finns flera olika metoder för markstabilisering, t.ex. KC-pelare, jetpelare 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 ofta i rader, eller i gitter så att de bildar skivor eller block. *Jetpelare* tillverkas genom att man borrar sig ned till planerat djup och därefter samtidigt som borren roteras tillbaka till markytan injekterar en cementsuspension under högt tryck. *Masstabilisering* utförs genom att lösa material som lera, slam, torv och muddermassor blandas med ett bindemedel för att skapa en stabil yta som underlag för någon form av byggande. Bindemedlet blandas ofta ner i materialet som ska stabiliseras med något som kan liknas vid en stor visp, eller ifall det gäller muddermassor kan blandningen ske i en tank eller bassäng.

Markstabilisering är ofta mycket attraktivt ekonomiskt jämfört med alternativa metoder. Det ger också möjlighet att utnyttja lokalt material som annars skulle blivit ett deponeringsproblem. Det bidrar till reducerat transportbehov, eftersom transporter av bortschaktat material och ersättningsmassor elimineras. I många fall är markstabilisering det enda praktiskt och ekonomiskt genomförbara alternativet.

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 handhavande av den påverka resultatet. Kvalitetskontroll kan göras genom sondering, kärnbörning eller utgrävning av hela testpelare, vilket är både kostsamt och förstörande.

1.2 Syfte

ASSERT-projektets syfte 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 göras i omedelbar anslutning till 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 det 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. Det finns olika etablerade metoder för sådan kontroll, vilka dock i många fall är förstörande. ERT har 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 resistivitetsmätning som kontrollmetod av markstabilisering i laboratorium och fältskala.

2 FÄLTFÖRSÖK

2.1 Utveckling av metodik och utrustning 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 borrhålsmätning. 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 (Olsson et al. 2020).

För att göra upprepade mätningar i stabiliserade pelare kan en elektrod kabel installeras direkt i denna, och den blir då ingjuten när pelaren härdar. För att kunna utnyttja stabiliseringsriggen för att installera elektrod kabeln behöver den vara tillräckligt slank för att föras ner inuti borrhållsträngen, och den behöver vara tillräckligt styv för att säkerställa att den nedersta delen inte dras upp när borrhållsträngen dras tillbaka. Vidare bör den förses med ett antal temperaturgivare eftersom resistiviteten är temperaturberoende. Modulära prototypkablar med 8 elektroder vardera som kan kombineras till större utlägg har byggts, i kombination med temperaturgivare av typ PT1000. 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.

2.2 Fältförsök med test av stabiliserade pelare

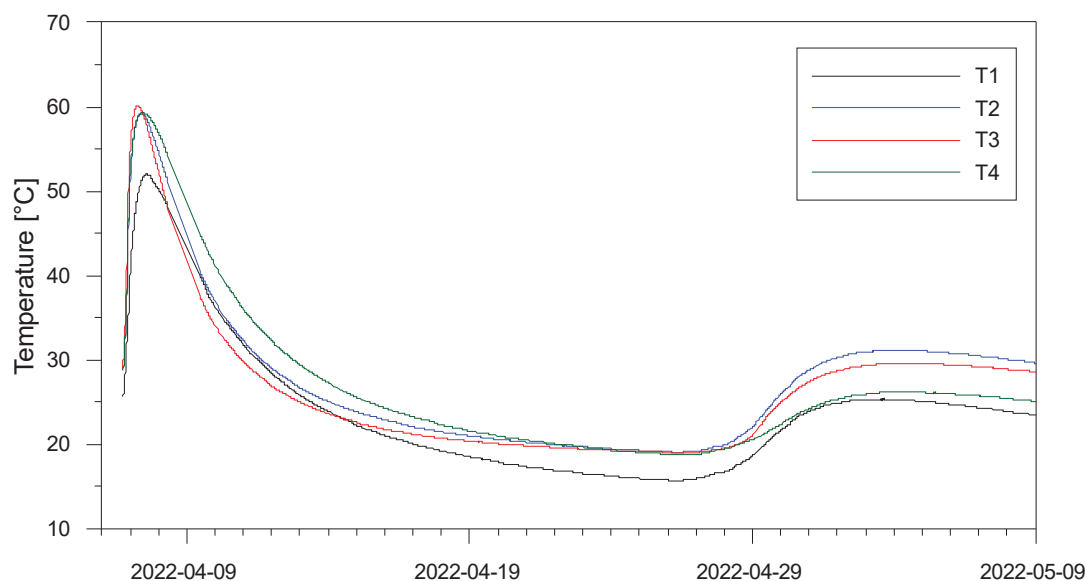
Test med installation av elektroder och temperaturgivare i jetpelare har genomförts i Moss i Norge i anslutning till ett järnvägsprojekt, i en formation där det förkommer kvicklera. För att det skulle vara möjligt att särskilja effekten av den enskilda pelaren utfördes den utanför den del av området som man arbetade i 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 elektrodstängen med hjälp av stabiliseringsriggen vilket fungerade bra (Figur 1).



Figur 1. Fältförsök med installation av elektroder och temperaturgivare i jetpelare i Moss.

ERT-mätningarna gjordes med en ABEM Terrameter LS2. Under de första 2 dyggen (6-8 april) genomfördes 4 mätomgångar, följt av ytterligare en mätomgång efter en månad (9 maj). 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 beror 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 2), 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 följd av att ytterligare pelare hade utförts i närheten (Nilsagård & Knutsson 2022).



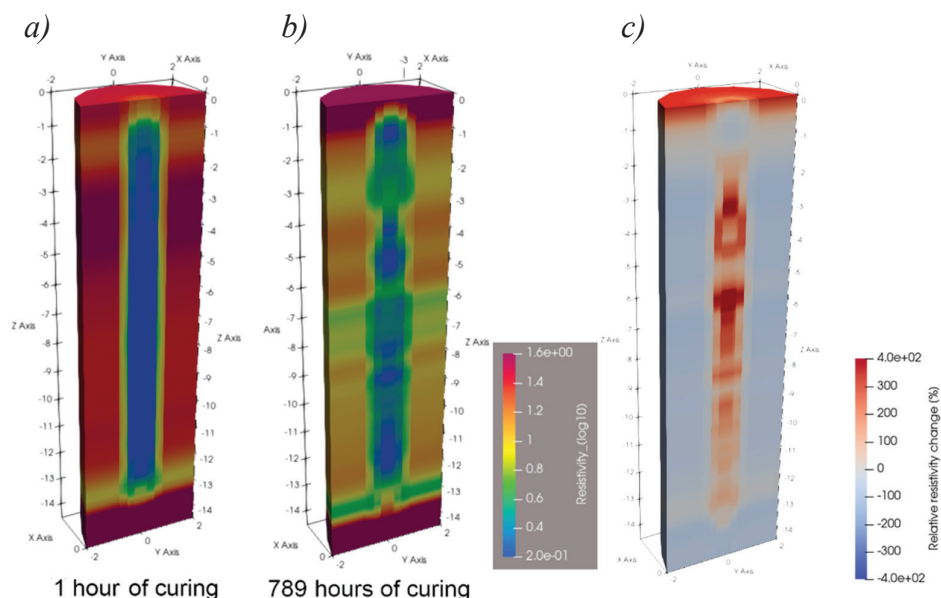
Figur 2. Temperaturmätning i jetpelare i Moss.

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 användas. Detta finns inte tillgängligt kommersiellt, men ny funktionalitet har som möjliggör det har implementerats i programbiblioteket pyGIMLi (Rücker et al. 2017).

Mätresultaten visar en lågresistiv zon som geometriskt sett väl motsvarar förväntad stabiliserad volym, där kontrasten i resistivitet mot omgivande material är över en tiopotens (Figur 3). Kontrasten i resistivitet minskar sedan successivt för varje mätomgång, men större delen av den förmodat behandlade volymen har fortfarande lägre resistivitet än omgivande material efter en månad (Nilsagård & Knutsson 2022). Detta skiljer sig från resultat från liknande försök 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 temperaturkorrigering 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 installationen hade schaktats bort när mätningen skulle genomföras.

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, 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 resistivitetsmätning vid fler tidpunkter, vilket skulle kunna uppnås med ett instrument som är installerat på plats och mäter automatiskt med regelbundna intervall, exempelvis dagligen.



Figur 3. Resultat från fältförsök med installation av elektroder i jetpelare i Moss; a) resistivitet 1 timme efter behandling, b) resistivitet 33 dygn efter behandling, c) förändring i resistivitet mellan a) och b) (Nilsagård & Knutsson 2022).

3 LABORATORIEFÖRSÖK

3.1 Utveckling av metodik och utrustning för laborieförsök

Specialdesignade lock till provbehållare till provtagningscylindrar enligt SGF-standard har utvecklats, och olika prototypgenerationer har testats och utvärderats. Locken har inbyggda elektroder och temperaturgivare, och är avsedda för laboriemätningar (Figur 4). Det finns fyra tårtbitsliknande elektroder i varje lock för att möjliggöra att 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 (Binley & Slater 2020). Syftet är att kunna göra oförstörande resistivitetsmätning på geotekniska materialprover så att samma prover kan användas för bestämning av geotekniska parametrar, och därigenom säkerställa att resultaten blir relevanta och jämförbara. Efter att mätsekvenser optimerats och mätinställningar

för instrumentet justerats har det givit goda resultat mättekniskt sett. En design för tillverkning m.h.a. laserskärning av elektroderna och 3D-utskrift av hållarna för dessa har legat till grund för tillverkning av ett 20-tal uppsättningar som sedan använts för mät försök. Efter en första omgång med laboratoriemätningar justerades designen baserat på praktiska erfarenheter från användningen.



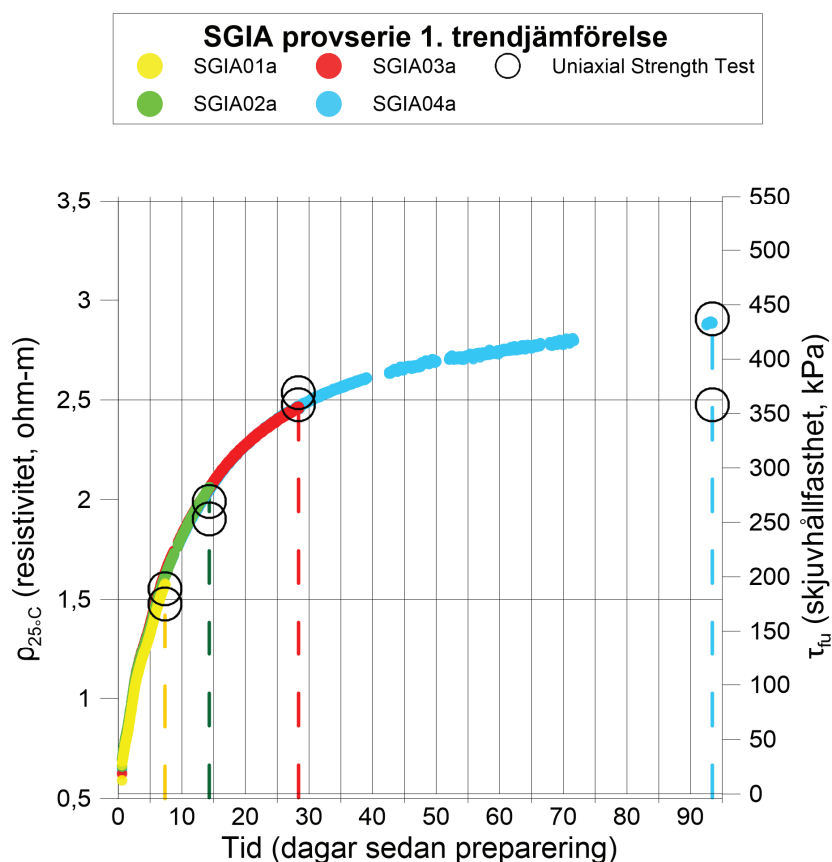
Figur 4. Lock med elektroder och temperaturgivare för icke-förstörande resistivitetmätning på material i provtagningscylindrar enligt SGF-standard (utan O-ringar monterade).

3.2 Laborieförsök

En serie laboriemätningar med 8 parallella prover med KC-inblandning under härdning har genomförts, för att om möjligt etablera en korrelation mellan resistivitet och geotekniska parametrar som också bestäms i labbet. Automatiserade mätningar med resistivitet och temperatur gjordes flera gånger per dag på de 8 provbehållarna i SGIs laboratorium i Linköping, där hållfasthetstester gjordes på samma prover (Figur 5). Resistivitet är temperaturberoende. Temperaturdata användes för att räkna om resistivitetsdata (ρ) till en standardiserad motsvarighet vid 25°C ($\rho_{25^{\circ}\text{C}}$). Resultaten ser lovande ut med avseende på möjligheten att etablera korrelationer mellan tillväxt i resistivitet och hållfasthet (Figur 6).



Figur 5. Laborieförsök med KC-inblandning i SGIs laboratorium.



Figur 6. Resultat från laboratorieförsök med KC-inblandning.

Provserier med stabiliserade muddermassor har genomförts i samarbete med PEAB och Byggnadsmateriallära på LTH med samma upplägg. Ytterligare provserier planeras.

4 SLUTSATSER

Metodik och prototypkablar för att installera elektroder med hjälp av stabiliseringsriggen har fungerat bra i såväl KC-pelare som jetpelare. Mätresultaten visar förändringar i resistiviteten längs pelaren som stämmer väl överens med den volym som skulle stabiliseras, med initial sänkning av resistiviteten följt av gradvis ökning. Variationer i resistivitet som kan tänkas bero på variation i jordlagerföljd eller kvalitet på stabiliseringen visar potential för kvalitetskontroll, men det kan inte utvärderas på grund av avsaknad av referensdata från andra metoder. Mätdatakvaliteten försämrades efterhand vilket kanske beror på elektrodkorrosion vilket behöver utredas och hanteras. Ytterligare tester behövs med avseende på

mättekniska aspekter och tillgång till referensdata. Vidare bör tester göras i flera olika geomaterial för att bättre kunna utvärdera tillämpbarheten.

Resultaten av mätning på stabiliserade jordprover i laboratoriet visar att tillväxten i resistivitet följer ett likartat förlopp som tillväxten av hållfasthet vid enaxlig tryckprovning. Detta tyder på att det skulle kunna vara möjligt att hitta korrelationer mellan resistivitetstillväxt och hållfasthet. Detta behöver verifieras med fler provserier som helst ska avspegla olika jordmaterial och olika typer och halter av bindemedel.

5 TILLKÄNNAGIVANDE

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, PEAB och Keller Grundläggning. Per-Ivar Olsson bidrog aktivt i arbetet med utveckling av elektrodlock för laboriemätning på stabiliserade prover. Vi vill tacka Keller Grundläggning AB och dess personal för givande samarbete i samband med fältförsöket i Moss. Vi vill också tacka Edvin Nilsagård och Rebecka Knutsson för utomordentliga insatser och bra samarbete under deras examensarbete, inom vilket försöket i Moss genomfördes, samt Tina Martin och Peter Jonsson, Teknisk geologi LTH, för handledning. Vidare Thomas Günther på LIAG i Hannover, Tyskland, för stöd i samband med användningen av pyGIMLi.

6 REFERENSER

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.

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).

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.

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.