

Delrapportering av steg 1 i BeFo projekt 425. Projektet fortsätter i BeFo projekt 511 – steg 2.

Optimering av geoelektrisk tomografi för undermarksbyggande Steg 1

Rapport för BeFo 425

2022-08-19

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning	1
Förord	3
Inledning	4
Bakgrund	4
Kort metodbeskrivning	6
Mätprincip	6
Resistiviteten i olika geomaterial	7
Praktiskt mätförfarande	8
Elektrodkonfigurationer	9
Inducerad polarisation (IP)	10
Modelltolkning via inversion	12
Behov av metod och instrumentutveckling	13
Syfte, mål, avgränsningar, etc.	15
Syfte och mål	15
Omfattning och avgränsningar	15
Koppling till forskningsprogram etc.	15
Koppling till BeFos FUI-program	15
Koppling till Trafikverkets FOI-plan 2019 – 2024	15
Hållbarhetsaspekter	16
Koppling till andra projekt	16
Anpassning av metodik och kravspecifiering	17
Mätmetodik och mätkonfigurationer	17
Litteraturgenomgång	17
Numerisk simulering	22
Kravspecifikation för systemdesign	25
Systemdesign	25
Ingångs- och kontrolldel	25
Strömsändare	25
Reläväxel	26
Kapsling	26
Ingångsegenskaper	26
Utveckling och byggande av instrumentprototyp	28
Principdesign	28

Ingångsdel	29
Strömsändare	29
Reläväxel.....	30
Systemintegrering	31
Instrumentprogramvara.....	31
Mättester.....	32
Laborarietester	32
Fältförsök i begränsad skala	36
Reciproka mätningar för kvantifiering av mätfel.	36
Jämförande fältmätning med Terrameter LS2 som referensinstrument.....	38
Mätning med 32 parallella mätkanaler	41
Diskussion och slutsatser	44
Planerat fortsatt arbete.....	45
Referenser	46
Bilaga 1. Exempel på resultat från numeriska simuleringar av olika elektrodkonfigurationer över geologiska strukturer.....	49
Simulerade modeller	49
Resistivitet - Multiple gradient array 1176 data	50
Resistivitet - Full-range gradient array 2023 data	51
Resistivitet - Full-range gradient array 4065 data	52
IP-effekt - Multiple gradient array 1176 data	53
IP-effekt - Full-range gradient array 2023 data	54
IP-effekt - Full-range gradient array 4065 data	55

Förord

Vi är tacksamma för att NGU letade fram digitala kopior av de resistivitetsmodeller som användes i simuleringarna. M.H. Loke var till stor hjälp genom att förse oss med en version av Res2dmod som kan modellera olika kombinationer av egendefinierade elektrodsekvenser för olika resistivitetsmodeller med hjälp av så kallad batch-körning. Bing Zhou tillhandahöll ett par av de protokollfiler som användes till numerisk modellering av full-range gradient array.

Inledning

Bakgrund

Undermarksbyggande förväntas öka med ökande befolkningar, och bristen på utrymme kommer leda till ökat byggande i områden med sämre tekniska egenskaper. Kostnaden för och egenskaperna hos undermarkskonstruktioner, i såväl bygg- som driftskedet, är intimt kopplade till förståelse för och hantering av geologiska risker, som till exempel grundvatteninflöde, vittrat berg och dålig bergtäckning. Detta medför behov av bättre metodik och metoder för kartläggning av den rumsliga fördelningen av strukturer och egenskaper i jord och berg (Nelson 2019).

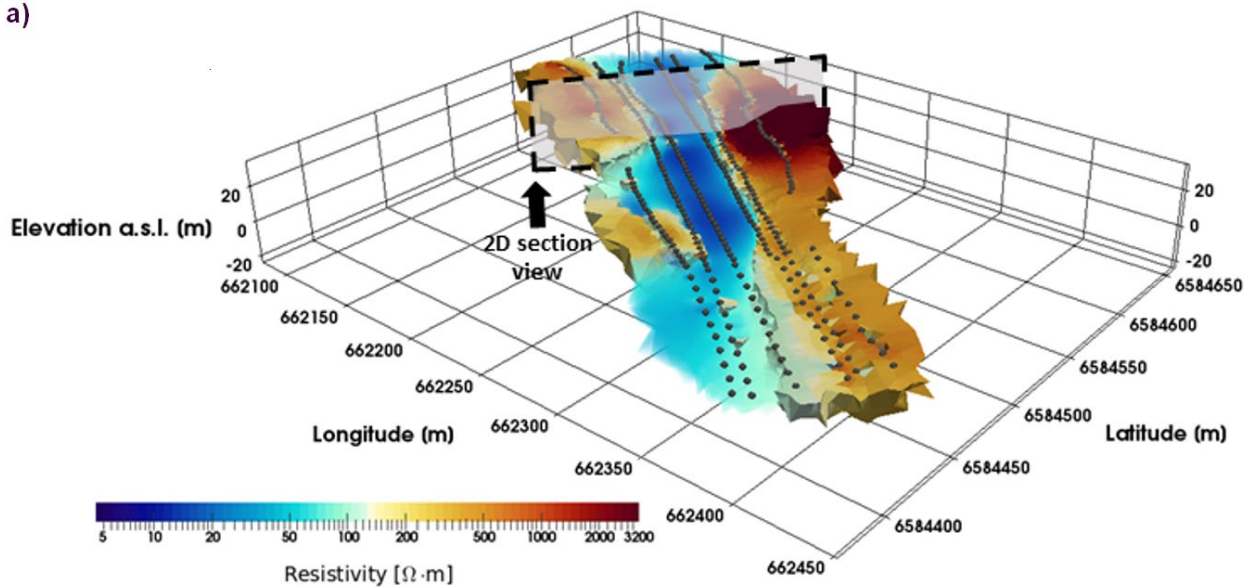
Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) har visat sig ge mycket användbar information om variationer i djup till berg och bergkvalitet i flera projekt, bland annat Hallandsåstunneln där det användes som operativt verktyg i tunnelarbetet (Dahlin et al 1999; Danielsen & Dahlin 2009). På senare år har det visats att markens uppladdningsförmåga, som kan mätas samtidigt med resistivitet som så kallad inducerad polarisation (IP) kan ge värdefull kompletterande information om bergets egenskaper (Johansson et al. 2020; Jonsson et al. 2018). Kombinerad tomografisk undersökning med resistivitet och IP kallas ofta DCIP (Direct Current resistivity and Induced Polarisation) tomografi. Vidare kan mätande och inkluderande av IP i tolkningen av data bidra till att minska osäkerheterna i bestämning av resistiviteten (Olsson et al. 2019; Madsen et al. 2018). Sammantaget ger detta bättre möjligheter att kartlägga variationerna i materialegenskaper och att kunna särskilja volymer med olika materialegenskaper från varandra, vilket i sin tur banar väg för bättre bestämningar av djup till berg och variationer i bergets egenskaper. Detta är viktigt i komplexa geologiska miljöer, där ett begränsat antal borrhinar placerade utan ett kvalificerat underlag som avspeglar variationen i materialegenskaper riskerar att bli icke-representativt och missvisande. Dock är DCIP mättekniskt mera krävande än ERT, vilket medför längre tid för själva mätandet och större känslighet för mätstörningar (Dahlin & Leroux 2012; Olsson et al. 2016).

Tvådimensionell (2D) ERT är idag en standardmetod i ingenjör- och miljötillämpningar. Det utförs genom att man mäter med elektroderna uppställda längs en linje, och tolkningen av resultaten sker med antagande om att resistiviteten kan variera längs linjen och mot djupet, men att den är konstant i riktningen vinkelrätt mot linjen. I komplexa geologiska miljöer, och i urbana miljöer där det finns infrastruktur som påverkar mätresultaten, kan 2D ERT ge missvisande resultat på grund av så kallade 3D-effekter. Det beror på att mätningarna påverkas av variation i resistivitet vid sidan om linjen och inte bara variation mot djupet. För att hantera det måste man använda 3D-modeller för att tolka mätdata, där dessa effekter tas om hand av tolkningsprogrammet, men det kräver i sin tur att mycket större mängder mätdata samlas över en yta istället för längs en linje. Detta ställer dock krav på anpassning av mätutrustning, mätupplägg och mätlogistik. I urbana miljöer kan mätstörningarna vidare vara så kraftiga under dagtid att det är nödvändigt att mäta nattetid för att få tillräckligt bra datakvalitet. Själva mätandet blir också så tidsödande med dagens teknik att det kan bli logistiskt svårbemästrat och onödigt kostsamt.

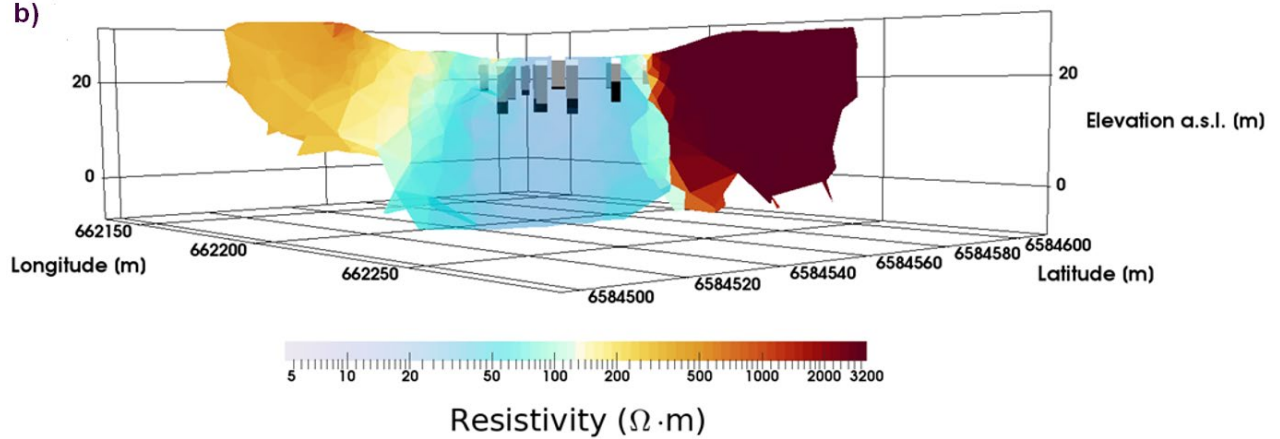
Som exempel kan nämnas en 3D-undersökning som utfördes vid den då planerade Trafikplats Vinsta som är en nerfartstunnel inom Förbifart Stockholm (Rossi et al. 2018). Undersökningen visade på mycket låga resistiviteter och höga IP-effekter till stora djup i de centrala delarna av undersökningsområdet (se Figur 1), vilket tyder på uppsprucket och vittrat berg. Resultatet var initialt

svårt att förstå i ljuset av bergprognosen med bra berg ($Q_{bas} > 10$) som tagits fram inom ramen för förundersökningarna för projekt Förbifarten.

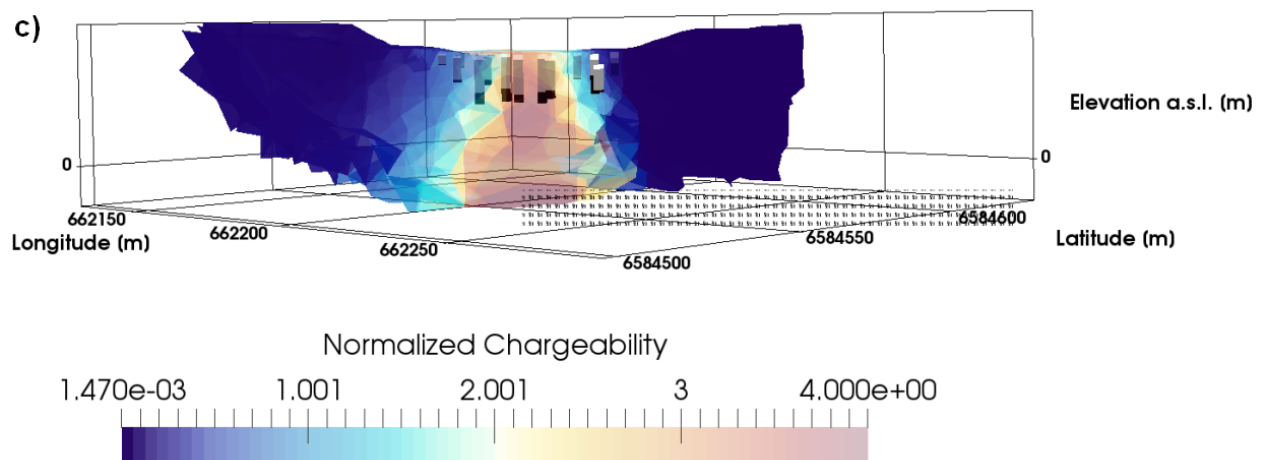
a)



b)



c)



Figur 1. Exempel på utsnitt ur 3D modell från Tpl Vinsta; a) Vy över resistivitetsmodell med placering av tvärsnitt markerat. b) Tvärsnitt av resistivitet. c) Tvärsnitt av normaliserad IP-effekt

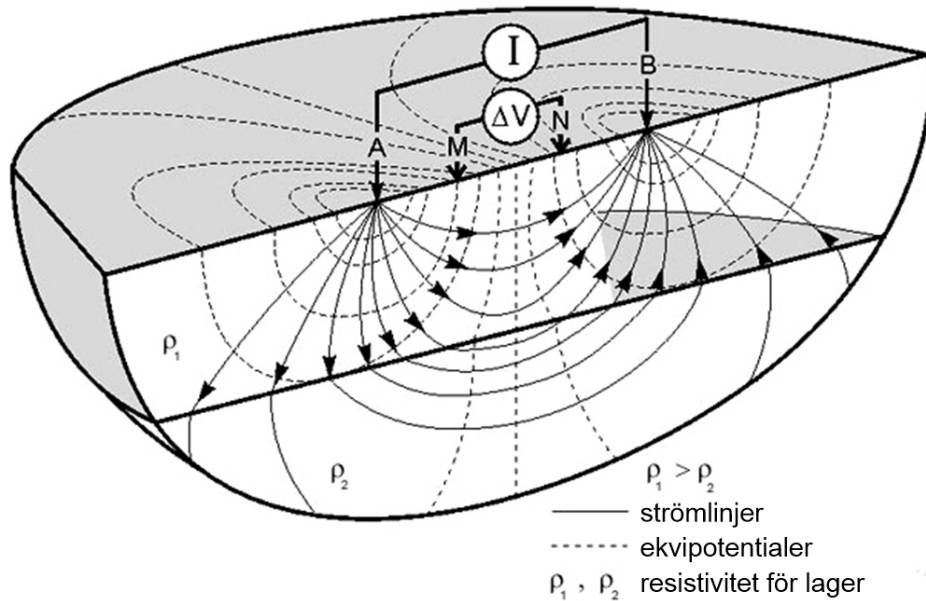
(uppladdnings-förmåga). Resultatet från geotekniska sonderingar är markerade i tvärsnittet (vitt = fyll, grått = jord, svart = berg) (Rossi et al. 2018).

När man i samband med byggandet reviderade bergklassificeringen till mycket dåligt berg ($Q_{bas} = 0,1-1$) och sämre bergtäckning än förväntat (Roslin et al. 2018) föll tolkningen på plats. Om den geofysiska undersökningen hade gjorts i ett tidigt skede av förundersökningarna, och använts som underlag för planeringen av ett kvalificerat borrhäls- och provtagningsprogram, kunde man undvika en missvisande bergprognos och sluppit förseningar och extrakostnader kopplade till det. 3D-undersökningen var dock tidsödande på grund av att själva mätandet tog mycket lång tid, och att det var önskvärt att mäta nattetid för att få tillräckligt bra datakvalitet. Detta ledde till att det inte gick att mäta färdigt under en natt, utan det skulle behövts flera nätter för att hinna mäta under de få timmar när mätstörningarna är mindre. Av praktiska skäl genomfördes undersökningen under två dygn, vilket gav två natters mätande då signalstörningsnivåerna var mindre plus mätning med högre störningsnivåer dagtid. Detta i kombination med att en del mätkombinationer hade ogynnsam elektrodgeometri ledde till att cirka 2/3 av mätdata fick kasseras. Resultaten blev likväl användbara (Figur 1), men mera data, bättre datakvalitet och optimerade mätkonfigurationer hade kunnat ge bättre upplösning och mindre osäkerhet i modellerna. Detta visar ett behov av metodutveckling för att möjliggöra snabbare mätningar och bättre hantering av mätstörningar.

Kort metodbeskrivning

Mätprincip

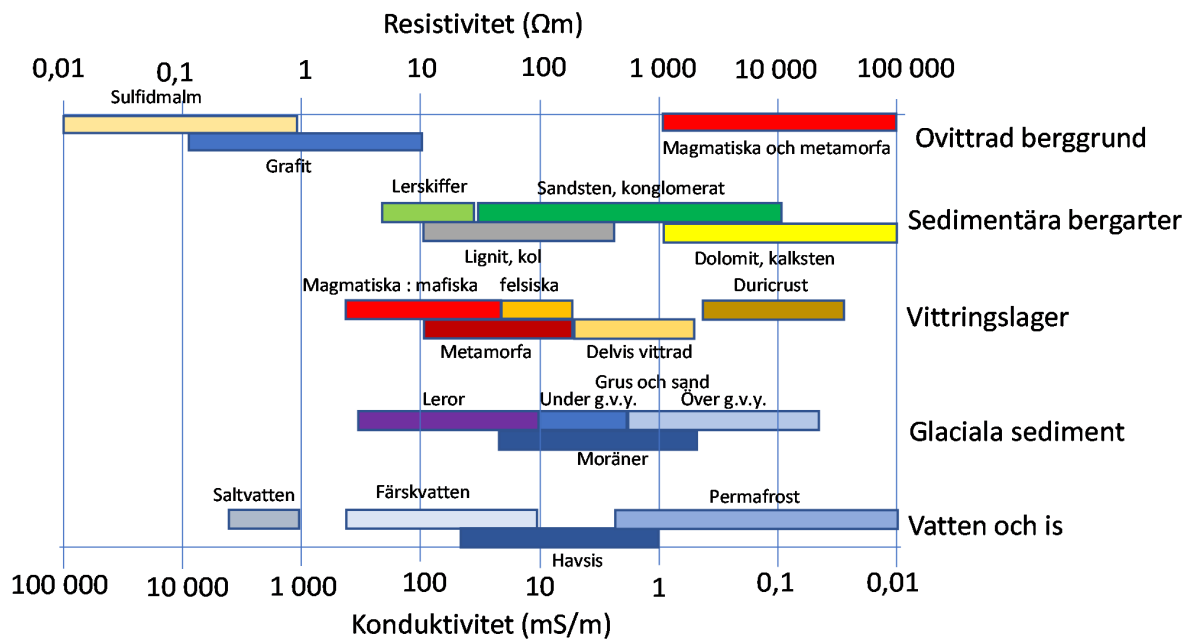
ERT och DCIP bygger på galvanisk mätning av markens resistivitet, eller specifika motstånd, genom att man sänder ut kontrollerade likströmpulser mellan två elektroder, nerstuckna i marken, samtidigt som man mäter de resulterande spänningarna mellan andra elektroder enligt Figur 2. För DCIP mäter man även markens uppladdningsförmåga (IP = inducerad polarisation), som är kopplad till dess frekvensberoende egenskaper. Oftast används elektroder av rostfritt stål för såväl ström- som potentialelektroder. Mätningen ger ett mått på markens skenbara resistivitet (ρ_a), med enheten ohm-m (Ωm), vilken avspeglar den kombinerade effekten av alla ingående enheter inom den aktuella markvolymen. Genom att variera elektrodavstånden varieras djupnedträngningen, och en normal mätsekvens innehåller därför mätningar med många olika elektrodavstånd. Vid tvådimensionell (2D) undersökning förflyttar man elektroduppställningen längs en linje, och får på så vis information som är kopplad till hur de elektriska egenskaperna varierar mot djupet längs linjen. För tredimensionell (3D) undersökning förflyttar man uppställningen över en yta. För att få en bild av resistivitetsfördelning i marken använder man invers numerisk modellering (inversion), som genom en iterativ process skapar modeller av resistivitetsfördelning i ett tvärsnitt (2D) eller en volym (3D). Inversionen kan också inkludera uppladdningsförmågan (IP-egenskaperna).



Figur 2. Princip för elektrisk resistivetsmätning illustrerad på en tvålagerföljd, där A och B är strömelektroder, medan M och N är potentialelektroder (modifierad från Seidel & Lange 2007)

Resistiviteten i olika geomaterial

Resistiviteten beror i huvudsak av vatten- och finmaterialinnehållet i marken, eftersom de vanligt förekommande jord- och bergartsbildande mineralen i praktiken är isolatorer. Mängden vatten, joninnehållet i vattnet samt hur vattnet är fördelat i materialet är viktiga faktorer. Lerinnehåll ger stor påverkan på resistiviteten, och lerhaltiga och organiska jordar har normalt låga resistivitet. Exempel på typiska resistiviteter visas i Figur 3. 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.

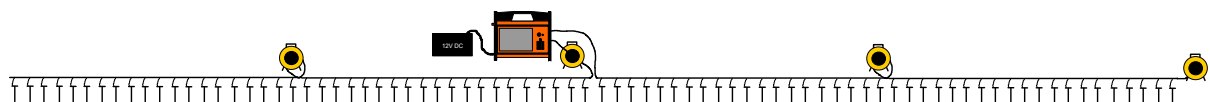


Figur 3. Typiska resistiviteter respektive konduktiviteter för olika material, där konduktivitet är inversen av resistivitet, d.v.s. $\sigma = 1/\rho$ (efter Palacky 1987).

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 bergbyggnadstekniska tillämpningar, men i vissa fall kan man utnyttja det som ett naturligt spårämne.

Praktiskt mätförfarande

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. Samma mätprincip, mätutrustning och fältlogistik kan användas även till DCIP, dock ställs högre krav på kvaliteten i varje steg eftersom det är mättekniskt mera utmanande med bland annat lägre signalnivåer.



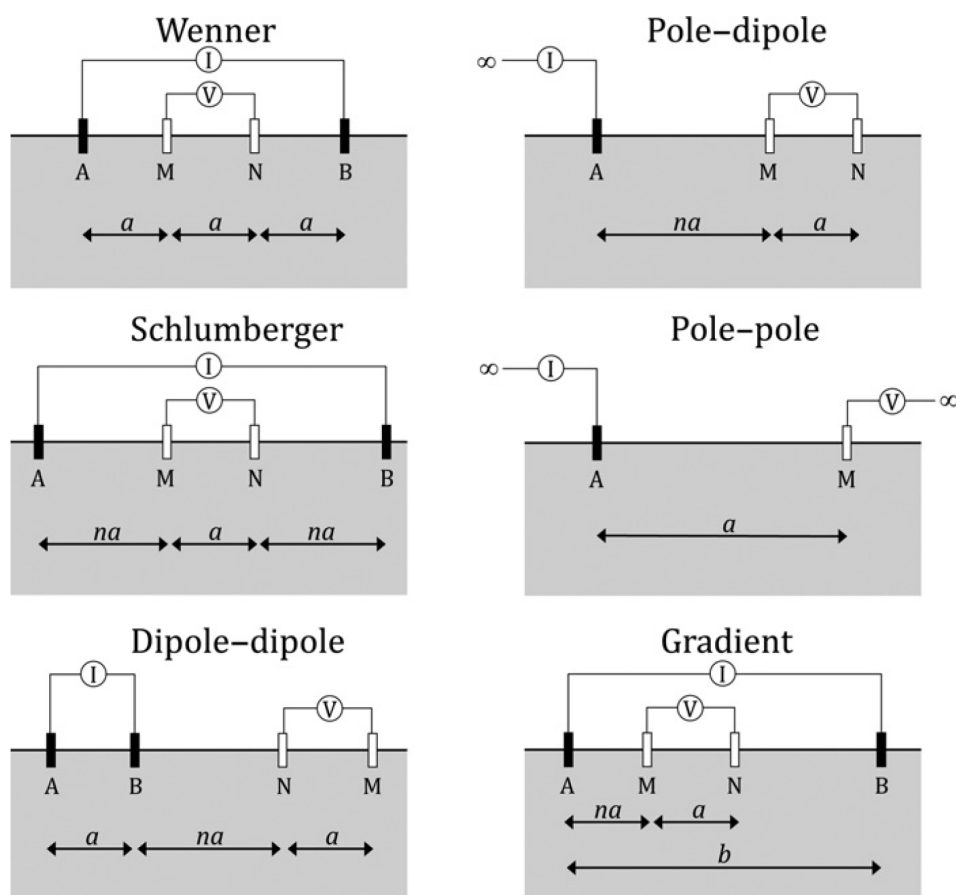
Figur 4. Skiss på typiskt mätutlägg för 2D ERT / DCIP, i detta fall med 81 elektroder. Utläggets längd är typiskt 160, 400 eller 800 meter, vid 2, 5 respektive 10 meters elektrodavstånd.

Strömpulserna som används som signal vid mätningarna varierar typiskt i längd mellan en och flera sekunder, där man oftast nöjer sig med kortare pulser för ERT. DCIP kräver längre strömpulser och mätintervall för spänningsmätningen för att ge önskat spektralt signalinnehåll. Det är nödvändigt att mäta med strömpulser av motsatt polaritet för att kunna hantera elektrokemiskt orsakade galvaniska spänningar som uppkommer i kontakten mellan elektrod och mark, vilket tillsammans med att man mäter upprepade gånger (så kallad stackning av mätsignalerna) samt att instrumentet behöver tid för

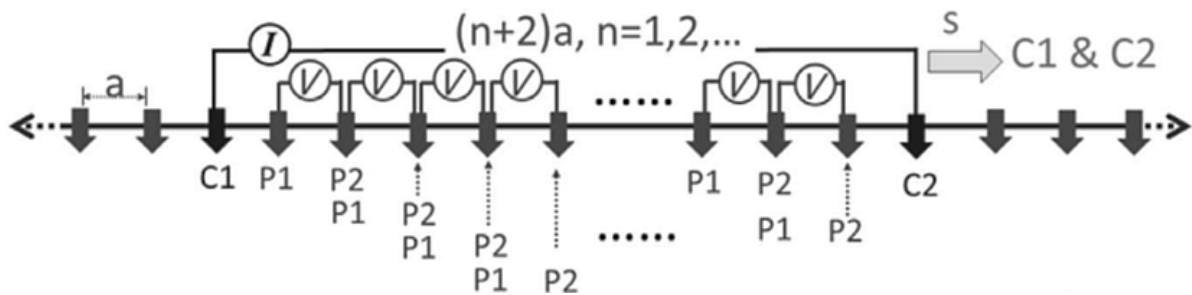
ställa om reläer, ställa in strömsändare och spara undan data medför att själva mätandet kan bli mycket tidsödande.

Elektrodkonfigurationer

Elektrodena kan placeras ut enligt många olika principer, t.ex. med Wennerkonfiguration där man har samma avstånd mellan alla fyra elektroderna som i Figur 2. Det finns dock flera olika varianter beroende på syfte med undersökningen, mätplatsens förutsättningar och mätutrustningens design (Figur 5). Flera mätkanaler kan användas för att snabba upp mätprocessen, vilket dock i sin tur kräver att de elektrodkonfigurationer man använder lämpar sig för det för att kunna utnyttjas. Traditionellt har Wenner- och Schlumbergerkonfiguration använts för resistivitmätning, men det ger ytterst begränsade möjligheter till multikanalmätning. Dipol-dipolkonfiguration är ganska vanligt för mineralprospektering, men ger ofta problem med signal-brusförhållande på grund av små signalnivåer och 3D effekter. Multipel gradientkonfiguration (Figur 6) har kommit att få stor användning på senare år eftersom den lämpar sig väl för multikanalmätning med 7-12 mätkanaler (som dagens mätinstrument typiskt medger) samtidigt som den kombinerar god upplösningförmåga med bra signal-brusförhållande. Man kan härvid minska antalet strömsändningar tack vare att spänningsdipolernas relativa placering i förhållande till strömelektrodena ger olika djupnedträngning (Dahlin & Zhou 2006; Dahlin & Zhou 2004).



Figur 5. Skiss på olika elektrodkonfigurationer för ytbaserad resistivitmätning, där A, B betecknar strömelektroder och M, N är potentialelektroder (från Slater & Binley 2020).



Figur 6. Skiss på mätprincipen för multipel gradientkonfiguration, där flera spänningar mäts samtidigt vid varje strömsändning (modifierad från Zhou m.fl. 2020).

Pol-dipolkonfiguration kan sägas likna multipel gradientkonfiguration, med skillnaden att den ena strömelektroden placeras på ett stort avstånd från mätutlägget. Beräkningsmässigt betraktas den så kallade fjärrelektroden vara placerad oändligt långt borta, medan man i praktiken oftast får nöja sig med 5-10 gånger elektrodutläggets längd. Pol-dipol ger betydligt bättre djupnedträngning i förhållande till elektrodutläggets storlek, bortsett från fjärrelektroden, och bra upplösning. Det är dock ofta praktiskt svårt att hitta en bra placering för fjärrelektroden.



Figur 7. Normal (vänster) och reciprok (höger) Wennerkonfiguration.

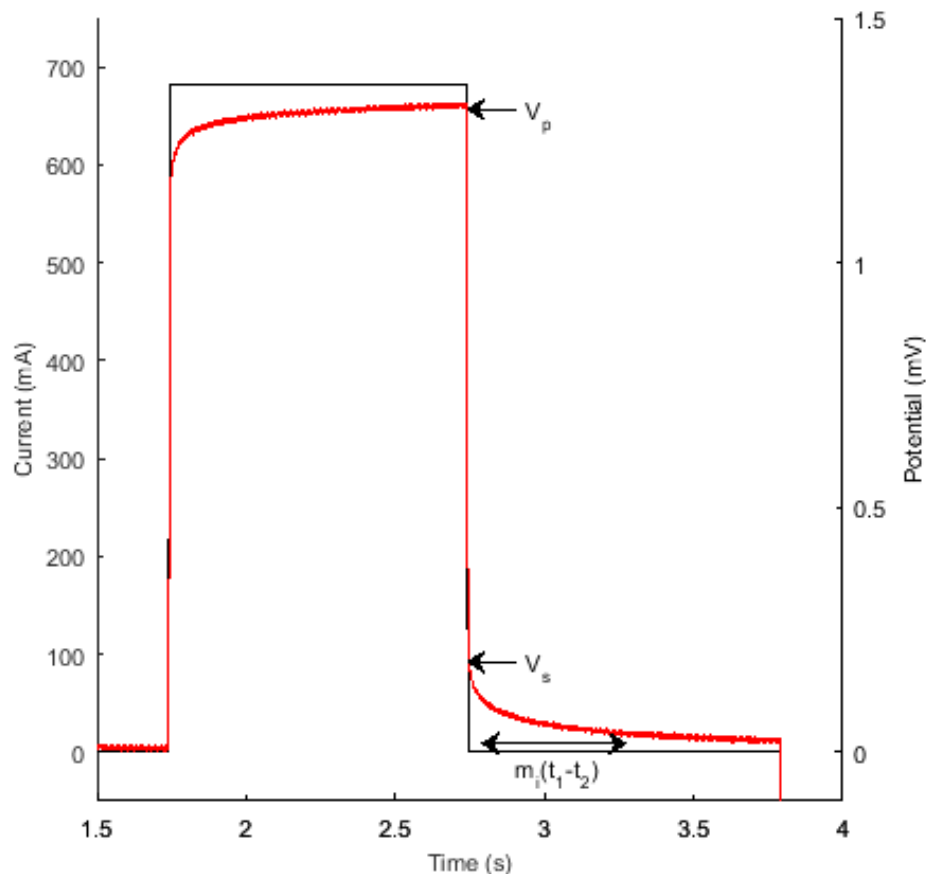
Reciprocitetsprincipen innebär att man teoretiskt sett kan byta plats på ström- och potentialelektrodena (Figur 7) och ändå få samma mätvärde, och om mätresultaten skiljer sig åt beror det på olika typer av mätfel. Det kan man utnyttja för att kvantifiera mätdatakvaliteten genom att beräkna observationsfel:

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

Inducerad polarisation (IP)

Inducerad polarisation (IP) mäts som nämnts liksom resistivitet genom att skicka ner strömpulser i marken. De inducerade spänningarna i marken stiger dock inte till full nivå momentant, utan det kan ta tiotals till hundratals millisekunder, eller flera sekunder, innan spänningen byggs upp beroende på typ av material i marken (Figur 8). Efter strömpulsen tar det motsvarande lång tid för spänningarna i marken att sjunka. Man väntar typiskt några hundra millisekunder innan mätningen av resistivitet för att undvika alltför stor påverkan av IP-effekter på mätvärdet. IP-effekterna mäts traditionellt på avklingningen efter att strömpulsen stängts av, där man kan medelvärdesbilda signalen för hela avklingningsförloppet till ett värde (s.k. integral chargeability) eller mäta det i flera tidsintervall (time windows) som följer efter varandra. Man skickar normalt ut flera strömpulser med omväxlande polaritet i en följd efter varandra, och använder medelvärden från dem för att undertrycka olika

typer av mätstörningar, så kallad stackning. Det finns flera olika enheter som används för IP-effekter, där mV/V (millivolt/volt = promille) och msec (millisekund, d.v.s. ett mått på avklingningstiden) är vanligast. Strömpulsens längd och mätintegrationstiden har stor betydelse för mätvärdenas storlek, och det är av stor vikt att vara konsekvent med dessa om man ska få jämförbara resultat mellan olika undersökningar. Senare tids utveckling, inom ramen för BeFo-projekt 331, har gjort det möjligt att mäta IP-effekterna samtidigt som man skickar strömpulser vilket snabbar upp mätförloppet avsevärt (Olsson et al. 2015).



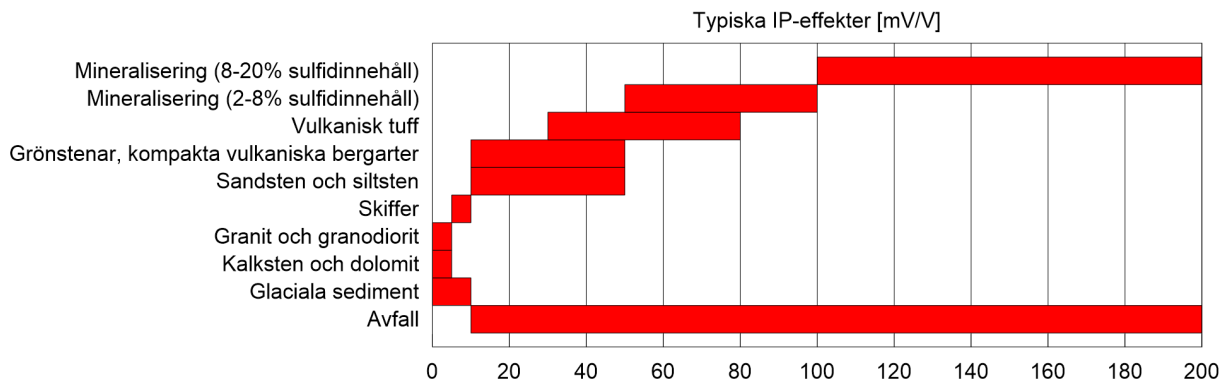
Figur 8. Idealiserad mätpuls med IP-effekt, när strömpulsen slås på och av stiger respektive sjunker spänningen i marken gradvis. (Johansson 2016)

Uppbyggnads- och avklingningsfenomenet beror på att elektriska laddningar förflyttas i marken, och IP-effekten ger ett mått på markens uppladdningsförmåga (engelska: chargeability). IP-effekterna uppstår i gränsytan mellan fast material och vätska, d.v.s. längs por- och sprickor i materialet, och IP-metoden avspeglar därmed ytledningsförmågan i materialet. IP-effekterna beror dock på många faktorer utöver materialets ytegenskaper, inklusive temperatur, vattenmättnadsgrad, samt jonhalt och jonslag i porvattnet. Metoden beskrivs i litteraturen av t.ex. Reynolds (2011) och Binley (2015).

IP-mätning används för mineralprospektering sedan mycket lång tid eftersom sulfidmineraliseringar, som ofta är associerade med brytvärda mineral ger upphov till stora IP-effekter, men inte avviker nämnvärt i resistivitet och därför är svåra eller omöjliga att lokalisera med ERT eller elektromagnetiska metoder. Allteftersom moderna mätinstrument för ERT, som även kan mäta IP-effekter,

blivit tillgängliga har intresset för att använda metoden i ingenjörsgelogiska och geotekniska tillämpningar ökat.

Figur 9 visar exempel på typiska IP-effekter i geologiska och antropogena material. Det skall dock noteras att hur stora IP-effekterna blir även beror på faktorer utöver de geologiska, bland annat mätinställningar (t ex. integrationstiden för IP-avklingningen) och vilken inversionsprogramvara som används.



Figur 9. Typiska IP-effekter (delvis baserat på Loke (2020)).

De vanligaste svenska jord- och bergarterna ger upphov till små eller måttliga IP-effekter, där dock sulfidinnehåll kan ge höga IP-effekter. Även relativt låga halter av sulfid kan ge upphov till tydligt förhöjda IP-effekter (ref Butler m.fl.).

Höga IP-effekter kan också orsakas av antropogena material, och nedgrävt avfall ger generellt upphov till förhöjda IP-effekter, hur stora beror på avfallets sammansättning. Blandat avfall ger kraftigt förhöjda värden, medan t.ex. byggavfall bestående av stenmaterial och trä ger mindre effekter. Metoden är därför ett kraftfullt verktyg för lokalisering och rumslig kartering av gamla deponier som i allmänhet är bristfälligt dokumenterade, vilket ofta ger problem i samband med byggprojekt eller åtgärder för att förebygga förorenings spridning (Gazoty et al. 2012; Dahlin et al. 2010).

Den typ av IP-mätning som den beskrivits ovan sker i tidsdomän. Det är också möjligt att mäta IP i frekvensdomän genom att mäta med växelström med olika frekvenser. Om man stegar sig igenom ett tillräckligt brett frekvensintervall kallas det spektral IP (SIP), vilket kan ge ytterligare mera nyanserad information om materialens inre struktur vilket i sin tur kan kopplas till dess makroskopiska egenskaper. Mätning av SIP i frekvensdomän blir emellertid tidsödande, vilket gör det svårt att använda i praktisk tillämpning. Vi har dock i BeFo-projekt 331 visat att man kan erhålla SIP från mätningar i tidsdomän vilket öppnar för praktisk tillämpning.

Modelltolkning via inversion

För att tolka data från ERT och DCIP 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, och om så är tillämpligt uppladdningsförmåga / IP-effekt, 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. Beroende på hur data samlats in kan man skapa 2D eller 3D modeller (Oldenburg & Li 2005). 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.

Det finns olika faktorer som ger osäkerhetsintervall i de skapade modellerna. Bland annat leder ekvivalensprincipen till att det finns många olika modeller av fördelningen av egenskaper i marken som kan förklara mätdata, givet en viss osäkerhet i data och antaganden bakom modellen. Med bättre datakvalitet minskar osäkerheterna, och vice versa. Större mängd data, alltså högre datatäthet, minskar också osäkerheterna, vilket ger bättre upplösning och undersökningsdjup. Ofta behöver man redigera bort ett mindre eller större antal data som har uppenbart störd karaktär (s.k. "outliers") eftersom de annars kan leda till falska anomalier (artefakter) i modellerna. Det är en fördel att ha hög datatäthet, så att det finns redundans och det inte får så stor betydelse om en del data behöver redigeras bort. En del programvaror kan ge ett osäkerhetsintervall för de tolkade modellerna, medan andra presenterar en enda modell. Vidare ger vissa tolkningsprogram möjlighet att använda information från borrhålsdokumentation som så kallade a priori-data för att styra upp inversionen.

IP-data tolkas till en fysisk modell med inversion med samma programvara som för resistivitetsdata, och alltid tillsammans med resistivitetsdata eftersom det är nödvändigt för att data ska gå att tolka till en fysisk modell. En IP-undersökning ger därför alltid resistivitetsresultat. IP-effekternas storlek kopplar till resistiviteten, så att man i vanliga jord- och bergarter generellt får högre IP-effekter med högre resistivitet. Det kan därför vara användbart att presentera IP-modellerna som normaliserad IP (NIP), vilket beräknas genom att dividera uppladdningsförmågan med resistiviteten (Slater & Lesmes 2002). I vanliga jord- och bergmaterial ska NIP i huvudsak korrelera mot ytledningsförmågan i det geologiska materialet, till skillnad mot resistiviteten eller konduktiviteten som avspeglar bulkledningsförmågan som ofta domineras av jonledning i porutrymmena.

Behov av metod och instrumentutveckling

För att få upp mätastigheten med bibehållen eller bättre spektral upplösning (som styr informationsinnehållet i IP-data), är det nödvändigt att mäta över väsentligt fler elektroddar samtidigt, vilket innebär att det behövs betydligt fler mätkanaler än vad som finns i dagens mätinstrument, till exempel 32 mätkanaler. För 3D-undersökningar med stora elektroddutlägg skulle man kunna snabba upp mätningarna ytterligare genom att mäta simultant med flera mätinstrument som synkroniserar sig med varandra, så att antalet mätkanaler expanderas i takt med antalet elektroder. Om man dessutom använder strömsändaren i flera instrument för att sända ut synkroniserade strömpulser kan man öka styrkan på den utsända signalen, och därmed signalbrusförhållandet, utan att behöva ta till så kraftiga sändare att det blir ett personsäkerhetsproblem. Med ett tillräckligt snabbt mångkanaligt mätinstrument hade man kunnat slutföra mätningarna vid Trafikplats Vinsta på några timmar, istället för några dygn som krävts för mätning med nattens lägre signalstörningsnivåer. På köpet hade man fått bättre datakvalitet, tack vare ett bättre dataunderlag för kvalificerad signalbehandling som möjliggörs av fler parallella mätkanaler. Mera mätdata, bättre datakvalitet och kvantifiering av kvaliteten på data hade gett resultat med bättre upplösning och mindre osäkerheter.

För att kunna utnyttja fler mätkanaler krävs anpassning av mätmetodik och elektrodkonfigurationer. Hårdvarans utformning i ett mätinstrument styr dock vilka mätkonfigurationer man kan använda, så den behöver utformas med hänsyn till önskvärda mätkonfigurationer. Mätkonfigurationerna ska väljas så att mätdata får bästa möjliga känslighet för de geologiska strukturerna i marken samtidigt som signal-brusförhållandet optimeras, där det senare är särskilt viktigt för IP-delen av data. Instrumenthårdvaran kan emellertid inte utformas med full flexibilitet med avseende på hur många mätkanaler kan kopplas till ett stort antal mätelektroder, vilket hade varit önskvärt för en forskningsprototyp, eftersom det skulle medföra att den blir orimligt komplicerad, stor och dyr. Det innebär att hårdvaran bör designas så att den blir så flexibel som möjligt med ett rimligt antal komponenter.

Syfte, mål, avgränsningar, etc.

Syfte och mål

Det övergripande syftet är att bidra till att skapa bättre ingenjörsgelogiska förväntningsmodeller med avseende på bergkvalitet och djup till berg genom att utveckla bättre förundersökningsteknik. Därigenom kan man undvika missbedömningar om de geologiska förutsättningarna som kan leda till stora förseningar och extrakostnader vid undermarksbyggande.

Målet är att öka tids-och kostnadseffektiviteten för DCIP tomografi genom forskning kring och utveckling av undersökningstekniken, för att möjliggöra skapandet av bergmodeller med bättre upplösning i 3D och mindre osäkerheter i bestämningen av materialegenskaperna. Projektets specifika mål är anpassa och utveckla mätmetodik och mätteknik så att man kan genomföra DCIP tomografi i 3D snabbare, med förbättrad datakvalitet och kvantifiering av denna. I målet ingår att utveckla en hårdvaruprototyp med tillhörande programvara för att kunna testa och utvärdera utvecklad teknik i full skala.

Omfattning och avgränsningar

Projektet ska genomföras i tre steg som i sin tur är uppdelade i ett antal arbetspaket. Steg 1 som denna rapport omfattar avser utveckling och anpassning av DCIP-metodik för bergbyggnadstillämpningar, samt implementering av utökad funktionalitet i ett prototypinstrument som utvecklas för en annan tillämpning där kravbilden är annorlunda. Tack vare att ett grundläggande utvecklingsarbete redan hade genomförts, och att delar av kostnaden täckts från annat håll, har det räckt med en relativt begränsad insats i tid och budget för detta projekt. Arbetet har omfattat mätteknik, datahantering, signalbehandling och elektronikdesign med mycket högt ställda krav.

Koppling till forskningsprogram etc.

Koppling till BeFos FUI-program

Projektet kopplar främst till forskningsområde 3 "Undersökning och karakterisering under planering, genomförande och drift", bland annat följande specifika behov:

- 1: "... skapa bättre bas för bedömningar ..."
- 2: "... bättre modeller och teknik för datainsamling ..."
- 3: "... åskådliggör tillförlitlighet hos data och ge mer fullödig information ..."

Koppling till Trafikverkets FOI-plan 2019 – 2024

Projektförslaget kopplar framför allt till avsnitt 2.4 i Trafikverkets FOI-plan 2019-2024: "Utformning av vägar och järnvägar med fokus på tid, kostnad och innehåll – Bygga" som bland annat sätter fokus på förbättringar avseende projektering och tekniska produkter gällande planläggning, projektering, byggande (med mera). Specifikt kopplar förslaget till målområde "Ökad produktivitet" som sätter fokus på att det krävs teknikutveckling och att forskning kring "ny teknik, digitalisering och metoder för utformning, dimensionering och metodval är väsentlig". Även målområde "Ökat fokus på

livscykelkostnader” är ytterst relevant för projektet då det förväntas bidra med data som möjliggör bättre upphandling, planering och projektering och därigenom även kortare byggtider och minskad (negativ) påverkan på människor och miljö.

Hållbarhetsaspekter

Projektet förväntas bidra till bättre och kvalitetssäkrad undermarksinformation, vilket kan ligga till grund för bättre geomodeller som underlättar planerings-, design- och beslutsprocessen. Detta kommer i sin tur minska risken för oförutsedda geologiska förhållanden, som till exempel sämre bergtäckning och bergkvalitet än förväntat, som kan leda till stora fördröjningar och extrakostnader (som skett för exempelvis Hallandsåstunneln och Förbifart Stockholm).

Koppling till andra projekt

Projektet baseras till stor del på erfarenheter, problem och idéer från TRUST-Geoinfra, BeFo-projekt 331 ”Geoelectrical Imaging for Site Investigation for Urban Underground Infrastructure”.

Metodutvecklingen inom ramen för det projektet ledde fram till viktiga förbättringar i mätteknik och signalbehandling som har implementerats i kommersiella produkter, och genom det är tillgängliga för praktisk användning i branschen (modifierade ingångsfiler och vågform på strömpulser för ABEM Terrameter LS2, samt signalbehandling i Aarhus Workbench). 3D-undersökningen vid Trafikplats Vinsta, Förbifart Stockholm, som nämns i ”Beskrivning av problemställningen” gjordes inom det projektet och visade tydligt på de behov som detta projekt avser hantera.

Det kopplar vidare till BeFo-projekt 382 ”Geofysisk och geologisk undersökning av bergkvalitet i Dalby stenbrott för detaljämförelse i 3D ” där DCIP testades för 3D-undersökning av en bergvolym i anslutning till en bergtäkt, och där berget dokumenterades noggrant efterhand som det bröts ut (BeFo-rapport 185; Jonsson et al. 2018). Resultaten visar att variationer i lerinnehåll, porositet och vatteninnehåll kan detekteras, vilket kopplar till sprickfrekvens, sprick-krosszoner och vittring. Detta är av stor betydelse eftersom kopplingen till byggbarhet och bergkvalitet är stor.

Projektet kopplar även till BeFo-projekt 417 ”Hantering av mätstörningar från spårbunden trafik för DCIP undersökningar”. Resultaten av det projektet skulle kunna tillämpas på signalbehandling av data som samlas in i detta projekt, vidare skulle det prototypinstrument som ska utvecklas i detta projekt vara en värdefull tillgång i Steg 2 av det projektet.

Slutligen kopplar projektet till BeFo-projekt 380 ”Seismoelektrik (etapp 4)”, och föregående delprojekt, eftersom det prototypinstrument som ska utvecklas här skulle kunna anpassas och konfigureras för sådana mätningar också.

Anpassning av metodik och kravspecifisering

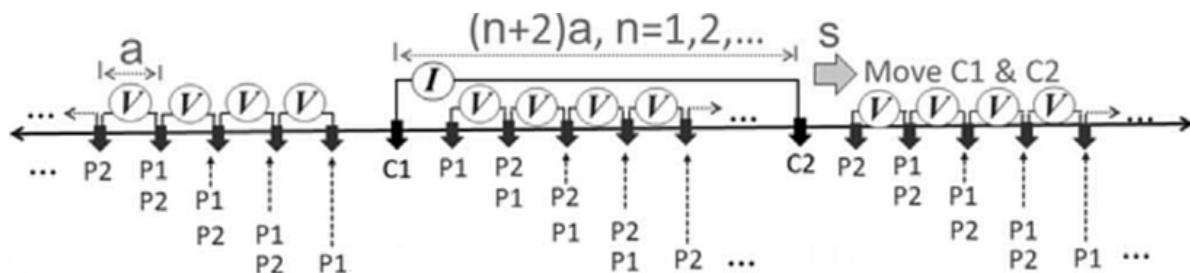
För att kunna optimera hårdvaran i instrumentprototypen har olika mätfall definierats och möjliga mätkonfigurationer simulerats numeriskt och analyseras. Detta har föregåtts av en sammanställning av kunskapsläget baserat på en genomgång av publicerad vetenskaplig litteratur.

Mätmetodik och mätkonfigurationer

Litteraturgenomgång

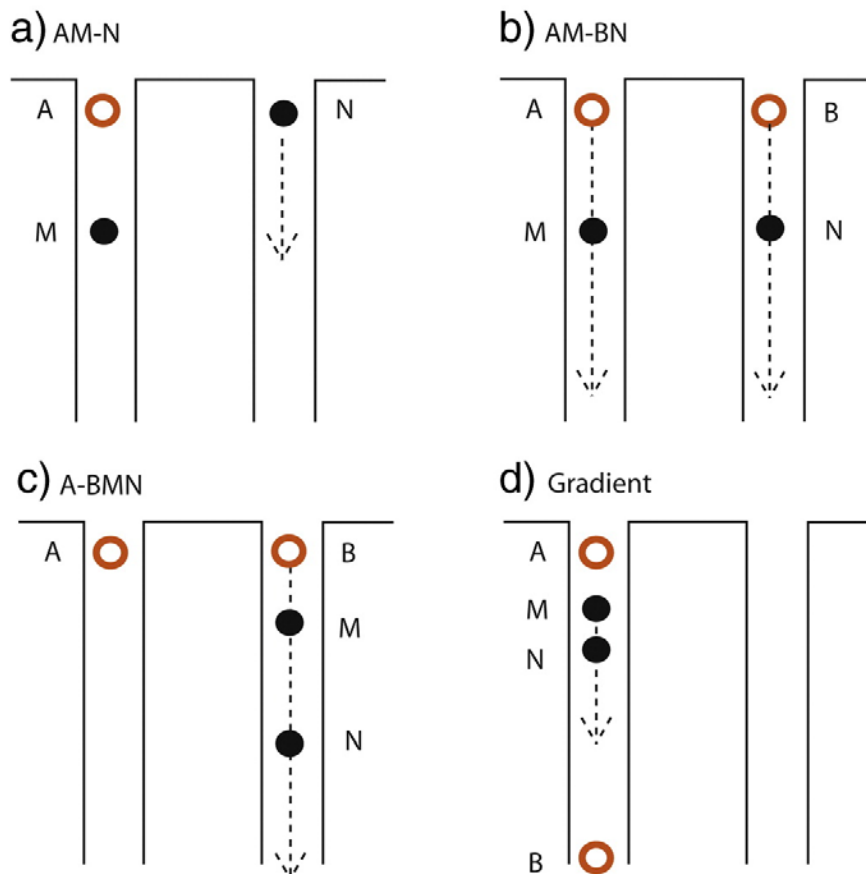
Teoretiskt finns det så många möjliga 4-elektrodkombinationer på ett utlägg på några 10-tal elektroder att det skulle ta orimligt lång tid att mäta alla i praktiken. Dock varierar informationsinnehållet liksom signal-brusförhållandet mellan de olika möjliga kombinationerna, och det finns ett betydande antal studier som syftar till att finna så kallade optimerade mätsekvenser publicerade för 2D ERT (t.ex. Fathi m.fl. 2018; Loke m.fl. 2010). Gemensamt för dessa är dock att de med få undantag avser små elektrodutlägg, inte i tillräcklig grad beaktar datakvalitetsaspekter samt inte tar hänsyn till möjligheten att utnyttja många parallella mätkanaler i moderna multikanalinstrument, vilket gör att resultaten i praktiken inte är användbara för detta projekts syften. Loke m.fl. (2015a) har dock tillämpat metoden på utlägg med 60 elektroder eller fler, vilket är det som är aktuellt här. Vidare har Wilkinson m.fl. (2012) presenterat en metod för att optimera mätsekvenser med flera parallella mätkanaler, dock utan att ta hänsyn till möjliga begränsningar i hårdvarans utformning. Rejkjær m.fl. (2018) har presenterat en metod för att ta fram optimerade mätsekvenser för att utnyttja de 12 mätkanaler som finns i en fullbestyckad Terrameter LS från ABEM, vilket dock inte är direkt tillämpbart för det koncept med 32 mätkanaler som vi siktar på. Blome m.fl. (2011) har presenterat arbete med att optimera mätsekvenser med pol-dipolkonfiguration med ett stort antal mätkanaler, där de mäter många kanaler mot referenselektroder och syntetiskt räknar fram olika kombinationer av data som kan utnyttja, något som dock kan ge signaltekniska problem i krävande mätmiljöer.

Ett koncept som är väl lämpat för att utnyttja ett stort antal parallella mätkanaler är full range (extended) gradient configuration, se Figur 10, som liknar multipel gradientkonfiguration men som även inkluderar mätning utanför strömelektrodparet (Zhou m.fl. 2020). Ur mätteknisk synvinkel behöver man ha en reläväxel som fördelar ut mätkanalerna över elektrodutlägget, vilket kan bestå av t.ex. 64 elektroder. Man är vill därvid kunna mäta på delar av utlägget åt gången med mätkanalerna ansluta mellan närliggande elektroder, men även fördela ut mätkanalerna över hela utlägget och ha längre mellan elektroderna, vilket ger en del av krävbilden för en reläväxel.



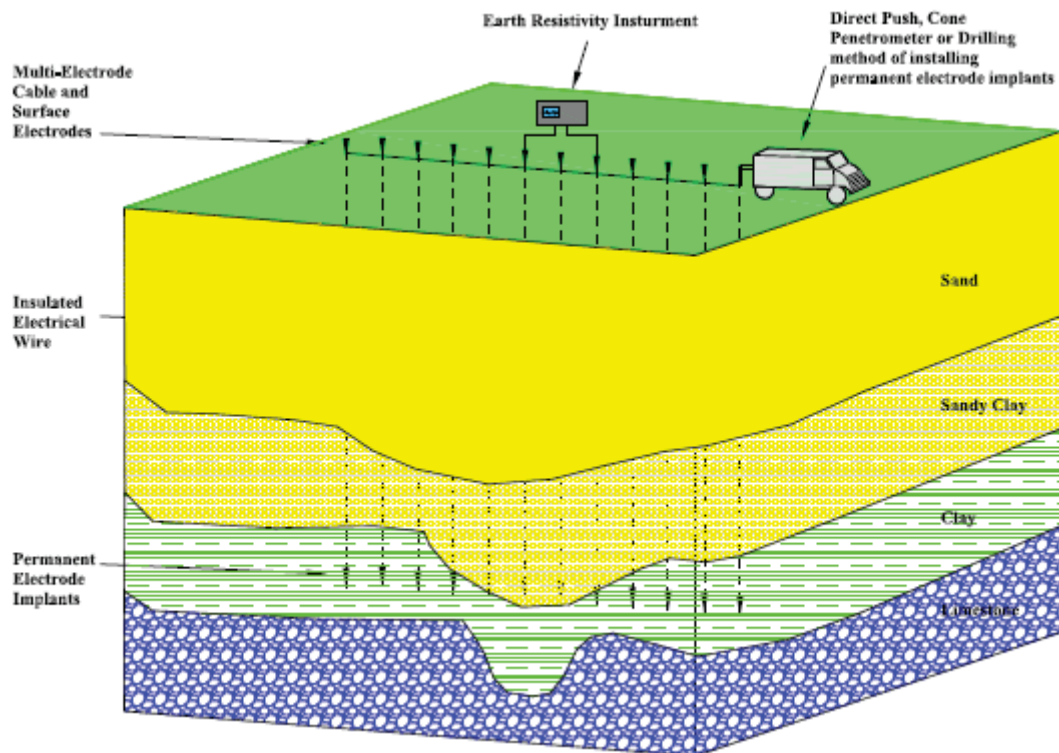
Figur 10. Skiss på mätprincipen för full range (extended) gradient configuration, där flera spänningar mäts utanför strömelektrodparet förutom de mellan dem (modifierad från Zhou m.fl. 2020).

Förutom mätning med elektroder enbart på markytan kan det vara användbart att mäta med elektroder i borrhål (Figur 11), vilket ger möjlighet att få bibehållen upplösning oberoende av djup. Det är då möjligt att mäta med alla elektroder i samma borrhål eller med elektroder fördelade mellan borrhålen. Det förra är mättekniskt likvärdigt med att mäta längs ett kabelutlägg på markytan, medan strömsändning och mätning mellan borrhålen ställer andra krav på reläxelfunktionen.

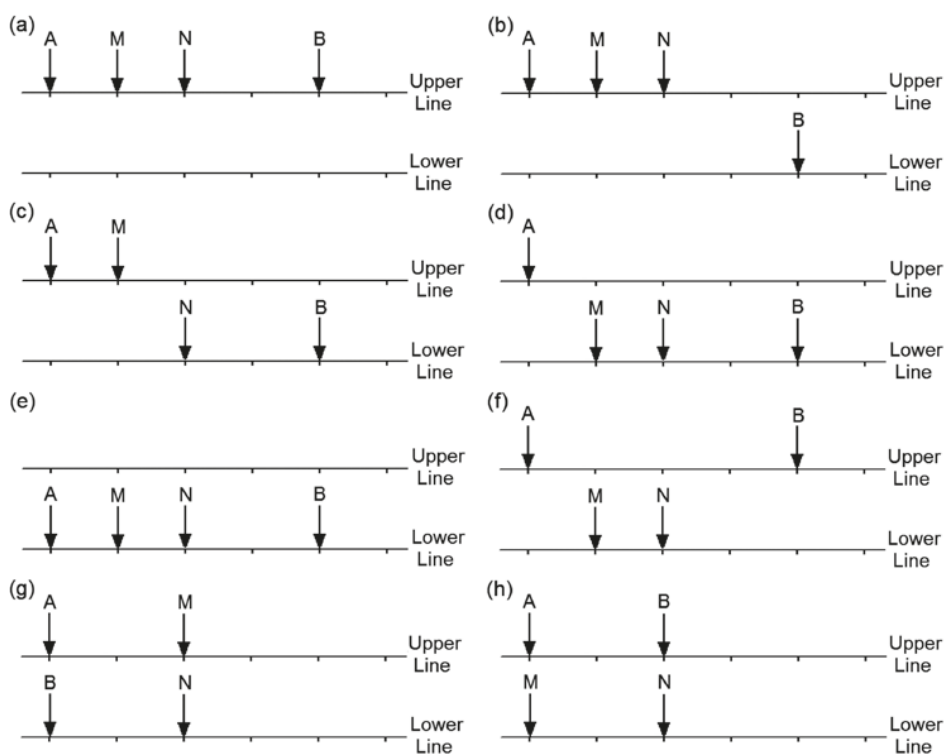


Figur 11. Exempel på möjliga elektrodkombinationer vid mätning i och mellan två borrhål (från Danielsen & Dahlin 2010)

Ett alternativ för att uppnå bättre upplösning mot djupet längs en sträcka än vad som är möjligt enbart med ytelektroder, är att installera en linje med elektroder på ett viss djup under markytan för att möjliggöra mätning mellan markyta och borrhål såsom skisseras i Figur 12 och Figur 13, så kallad Multi-Electrode Resistivity Implant Technique (MERIT). I förundersökning för bergbyggnad skulle man genom att installera elektroder nära bergets överyta kunna förbättra upplösningen av strukturer i berget. Installation kan ske med hjälp av en geoteknisk rigg som med CPT-teknik (direkt push) trycker mer en metallspets med en kabel ansluten som fungerar som elektrod, vilken lämnas kvar i marken efter avslutad mätning (Loke m.fl. 2015b). Detta förfarande är begränsat till lösa jordar, men till exempel vid större lermäktigheter på berg borde det kunna vara ett intressant. Det borde också vara möjligt att utveckla metodik för att installera metallektroder med kabel ansluten med hjälp av hammarborrning. Ett alternativ skulle kunna vara installation av en elektrodskabel med flera elektroder med hjälp av mer eller mindre horisontell styrd borrning. Ur mätteknisk synvinkel är denna typ av mätning jämförbar med mätning mellan vertikala borrhål, och kraven på reläxelfunktionen samma.

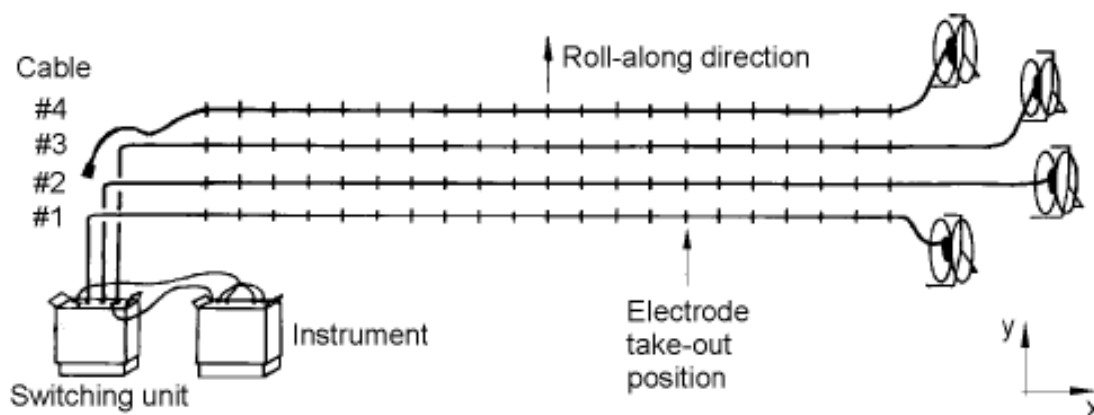


Figur 12. Principskiss för MERIT, d.v.s. installation av elektroder med CPT-teknik, samt exempel på möjliga elektrodkombinationer (från Harro & Kiflu 2018)

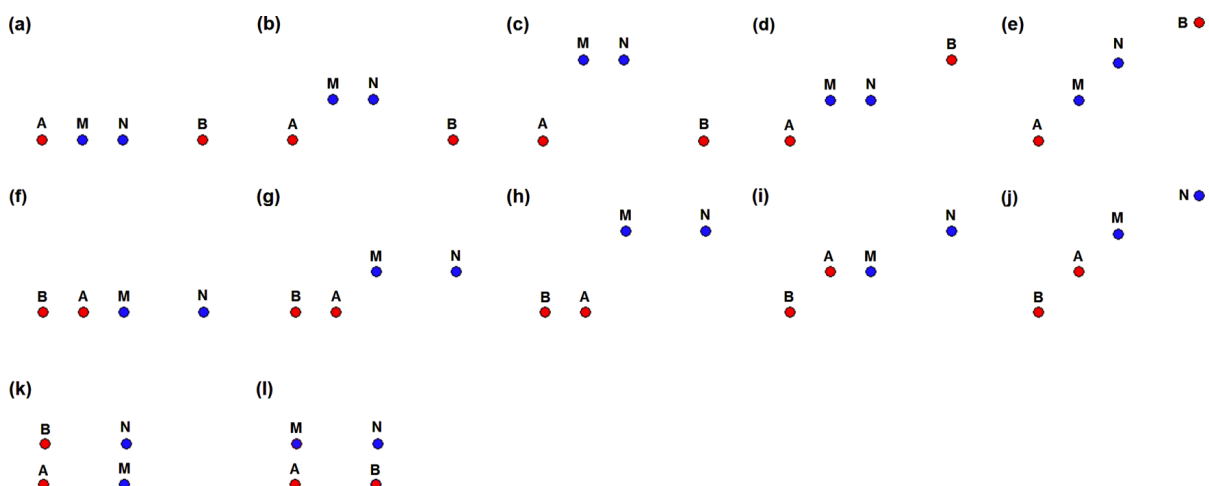


Figur 13. Exempel på möjliga elektrodkombinationer som kan göras på en kombination av djupinstallerade elektroder och ytelektrodotlägg enligt Figur 12 (från Loke m.fl. 2015b)

För 3D undersökningar kan man, förutsatt att det finns plats, lägga ut flera mer eller mindre parallella elektrodlägg över en yta såsom skisseras i Figur 14. Man kan anpassa utlägget efter de praktiska förutsättningarna såsom gjordes i fallet med 3D undersökningen i Vinsta (Figur 1). De mätningar som kan bidra till att uppnå god upplösning liknar de för mätning borrhål till borrhål och borrhål till markyta enligt beskrivning ovan, men med skillnaden att man kan göra mätkombinationer som spänner över flera delutlägg och avstånd mellan elektrodlinjerna (Figur 15). Detta leder till ett mycket stort antal möjliga mätkombinationer, och därmed potentiellt mycket tidsödande mätförfarande om man inte kan snabba upp det med parallell mätning över flera kablar samtidigt. Å andra sida finns det mycket goda förutsättningar för verkligt mångkanalig mätning för denna typ av undersökning under förutsättning att mätsystemet möjliggör det. Ur mätteknisk synvinkel är denna typ av mätning i viss mån jämförbar med mätning mellan borrhål, men det ställer ytterligare krav för att det ska vara möjligt att utföra mätningar i steg mellan flera elektrodlinjer.



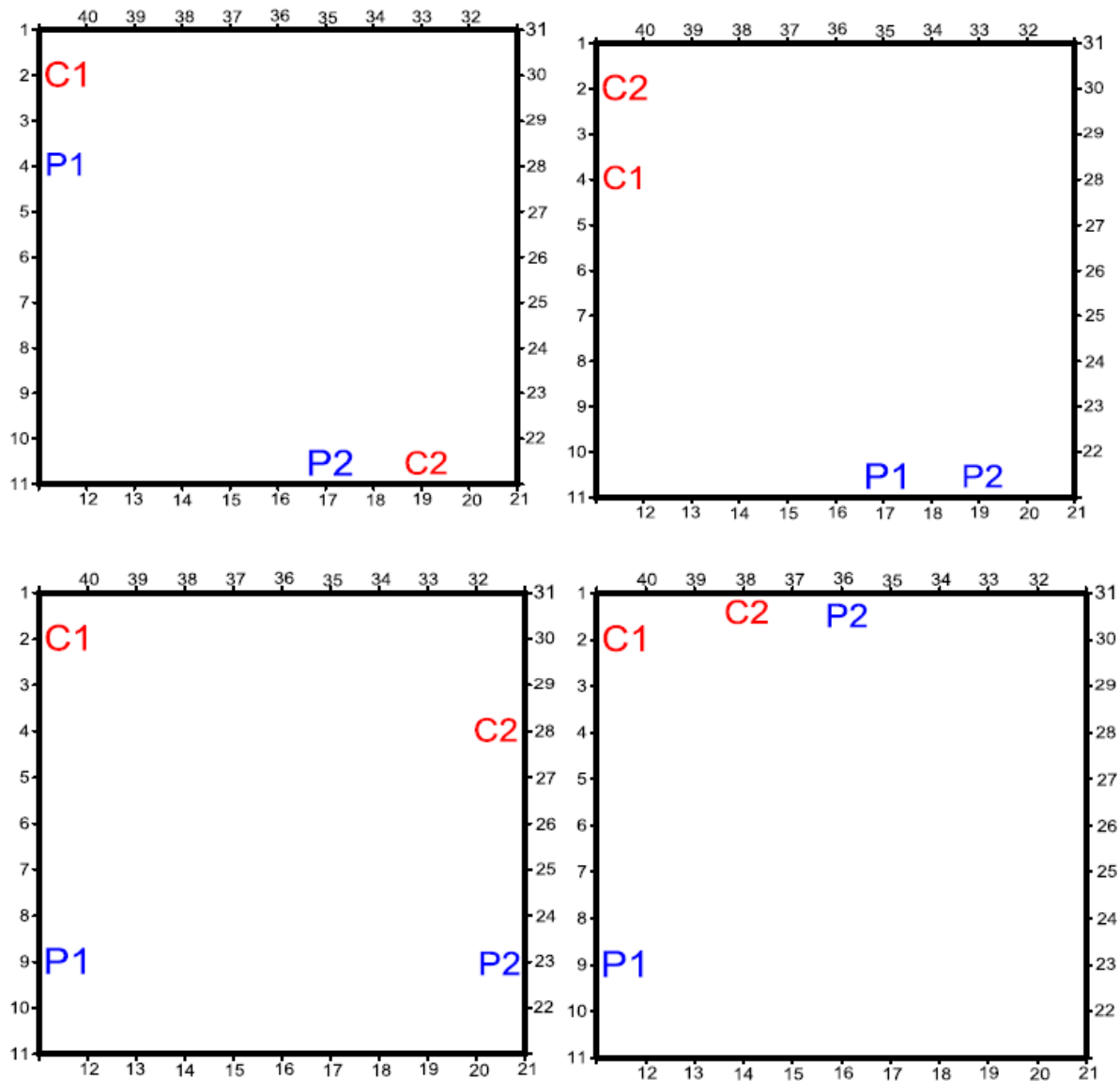
Figur 14. Skiss på elektrodlägg för 3D undersökning med parallella kabelutlägg med roll-along över en yta (modifierad från Dahlin m.fl. 2002).



Figur 15. Exempel på möjliga elektrodkombinationer som kan göras på parallella elektrodlägg enligt Figur 14. Positioner för strömelektroder markeras med röda punkter och potentialelektroder med blå punkter (från Loke m.fl. 2014a).

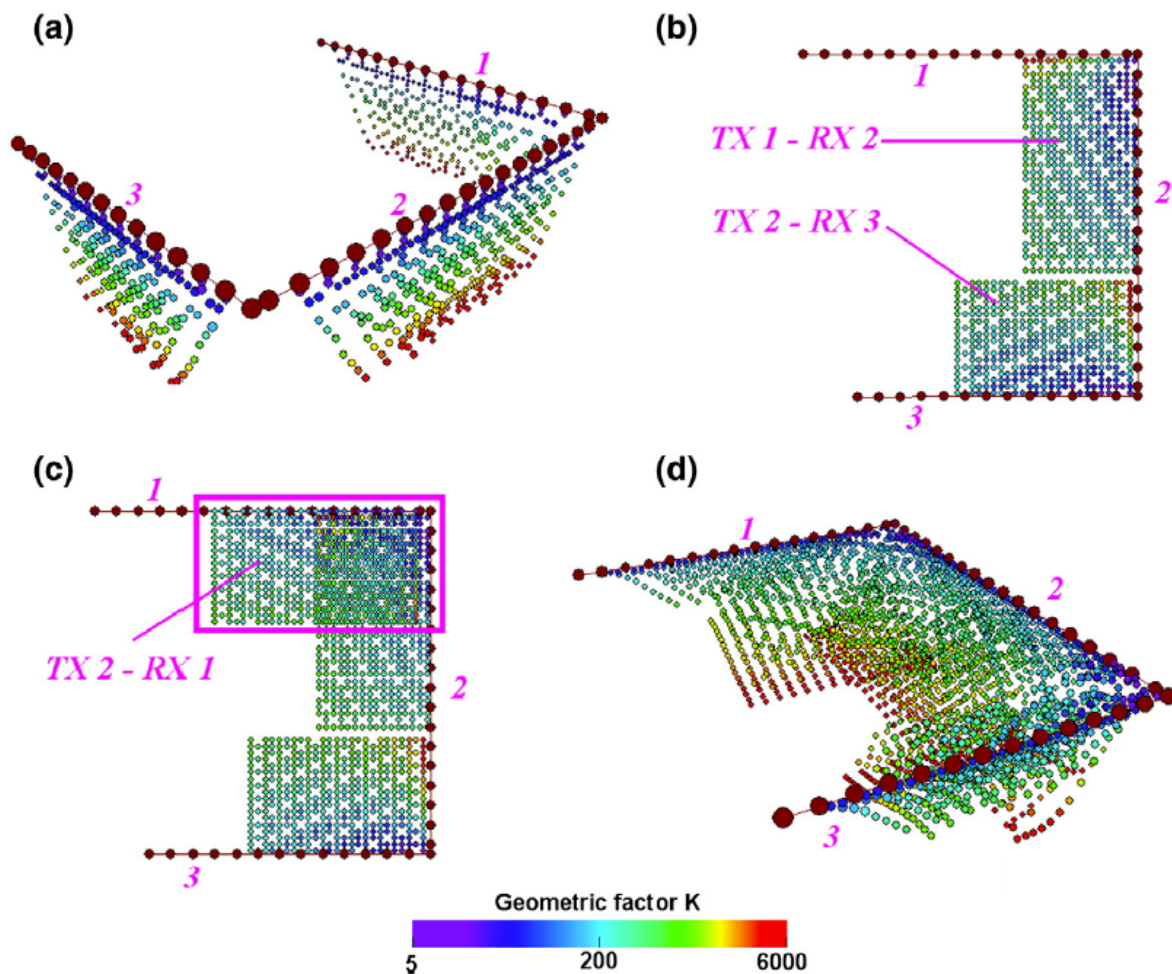
Speciellt i urbana miljöer kan möjligheterna att placera ut elektroder vara starkt begränsade, samtidigt som man kan ha behov av information av strukturer under ytor som är bebyggda eller på

annat sätt är oåtkomliga. Det finns exempel på framgångsrika undersökningar där man har placerat elektrodutlägg runt byggnader för att erhålla information om marken under dessa, där man kan kombinera mätning längs linjeutlägg med mätning runt hörn med så kallade L- och CORNER-arrays (Tejero-Andrade m.fl. 2015; Santarato m.fl. 2011).



Figur 16. Exempel på möjliga elektrodutlägg runt byggnad eller annan konstruktion (från Fathi m.fl. 2019)

Det har gjorts arbete med optimering av mätkonfigurationer och elektrodplaceringar, till exempel enligt skiss i Figur 16, som skulle kunna tillämpas på denna typ av undersökning (Fathi m.fl. 2019; Uhlemann m.fl. 2018). Ur mätteknisk synvinkel är denna typ av mätning jämförbar med mätning mellan vertikala borrhål, och kraven på reläväxelfunktionen likartade. Ett försök att visualisera mätpunkternas relativa fördelning i rummet i form av tyngdpunkten för känslighetsfördelningen, och K-faktorn som är omvänt proportionell mot signal-brusförhållandet, visas i Figur 17.



Figur 17. Exempel på kvalitativ visualisering av mätpunkter från elektrodlägg runt byggnad eller annan konstruktion, som dock inte direkt reflekterar mätvolymen. Geometrisk faktor K beror på elektrodavstånd och relativ inbördes placering av elektroderna, där stort K innebär små mätsignaler och risk för dåligt signal-brusförhållande (från Santarato m.fl. 2011).

Numerisk simulering

Numerisk simulering av mätmetodik och mätkonfigurationers känslighet för geologiska strukturer i marken har genomförts, där även signal-brusförhållandet i mätdata beaktats. Modelleringarna har av tids- och resursskäl fokuserats på ERT / DCIP längs ett rakt elektrodlägg, d.v.s. 2D undersökning.

Modellresponsen för ett stort antal modeller kombinerat med olika mätsekvenser för olika elektrodkonfigurationer har beräknats med hjälp av programvaran Res2dmod, och därefter inverterats med Res2dinv. Modelleringen har fokuserats på full range (extended) gradient configuration (Figur 10), eftersom det bedöms ge bäst förutsättningar för att utnyttja så många mätkanaler samtidigt som det enligt publicerade resultat ger bra upplösning av den undersökta volymen. Modelleringarna har också gjorts för multipel gradientkonfiguration (Figur 6), som referens eftersom den är väl etablerad och vanligt förekommande i praktiska tillämpningar.

En serie om 47 olika modeller som skapats av NGU (Norges Geologiske Undersøkelse) för att efterlikna typiska tektoniska zoner i berg har återanvänts för modelleringarna (Rønning et al. 2014). Dessa skapades för enbart resistivitet av NGU, men har kompletterats med IP-egenskaper (inducerad

polarisation / uppladdningsförmåga). Uppladdningsförmågan har därvid ansatts på ett schablonmässigt sätt baserat på erfarenheter från undersökningar gjorda i sammanhang som är relevanta för bergbyggnadstillämpning. Figur 18 visar ett exempel där ett utlägg på 800 m med 10 meters elektrodavstånd simuleras, vilket motsvarar den typ av utlägg som användes i samband med kompletterande förundersökningar för Hallandsåstunneln (Danielsen & Dahlin 2009).

Sammanlagt 4 olika varianter av datasekvenser med full-range gradient array har simulerats, med olika antal mätadata i intervallet 2024 - 4065, tillsammans med en typisk mätsekvens för multiple gradient array med 1176 mätningar. Antalet strömsändningar är avgörande för hur tidskrävande fälmmätningarna blir, och det varierar i intervallet 45-91 för de full-range gradient som simulerats medan det för multiple gradient ligger i intervallet 168-294 beroende på utförande på mätinstrumentet. Den rena mättiden kan således ökas med upp till en faktor 3,7 till 6,5 för 2D undersökning beroende på om man jämför med ett instrument som är försett med 4 eller 8-12 mätkanaler (för de senare kan man i praktiken sällan utnyttja mer än 7 mätkanaler). Annorlunda uttryckt kan man reducera mättiden med 73 – 85 % med de mätsekvenser som testats här. Om man vill optimera för bra upplösning genom att använda en 2-3 större mätsekvens kan man ändå reducera mättiden till cirka hälften jämfört med dagens state-of-the-art. Potentialen för att snabba upp mätförloppet är betydligt större för 3D undersökning.

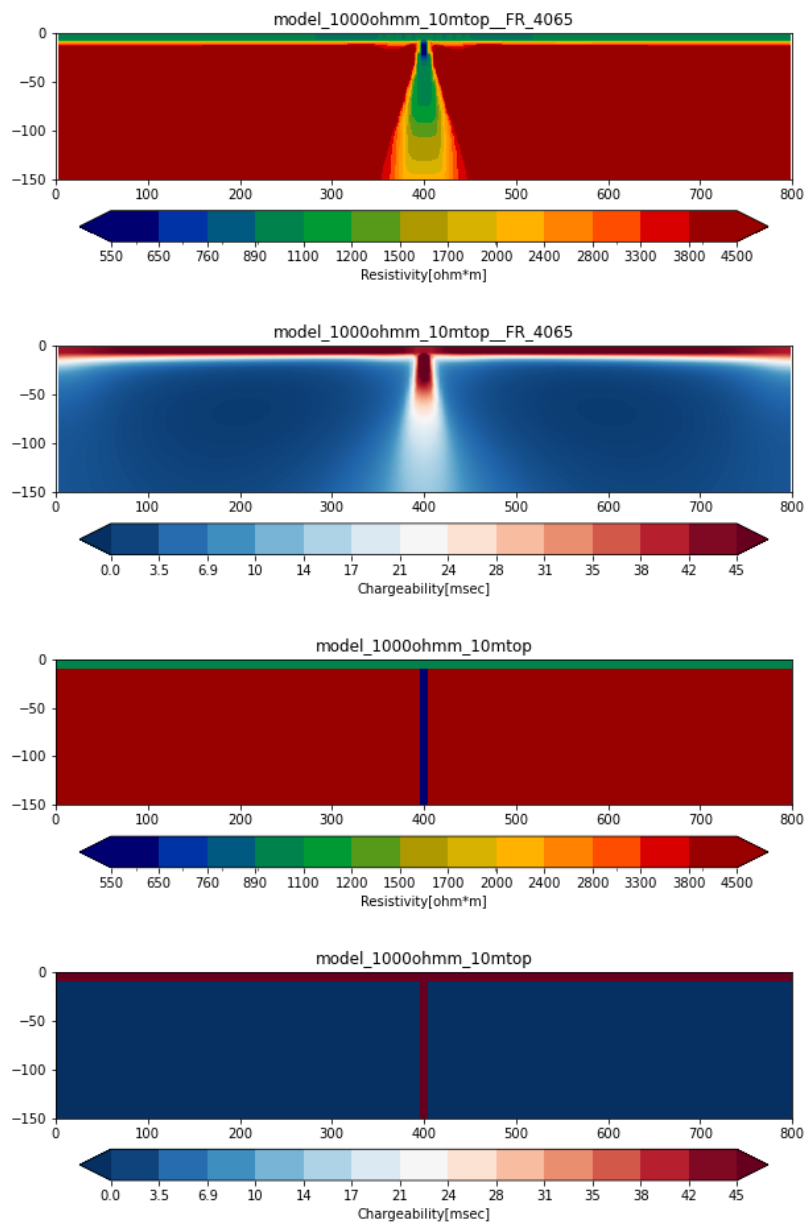
Tabell 1. Översikt över simulerade mätsekvenser (mätprotokoll), där No of RX = antalet mätvärden, No of TX = antalet strömsändningar och Max K = den största tillåtna geometriska faktorn (för utlägg med elektrodavstånd 1 m).

Protocol	Array type	No of TX	No of RX	Max K
GD_1176	Multiple gradient	168-294 ¹	1176	
FR_2024	Full-range gradient	45	2024	1000
FR_3496	Full-range gradient	91	3496	1000
FR_3934	Full-range gradient	87	3934	2000
FR_4065	Full-range gradient	91	4065	2000

¹ Beroende på antal mätkanaler i instrumentet.

Det är av praktiska skäl inte möjligt att visa resultatet av alla simuleringarna i denna rapport, men ett urval av exempel finns med i Bilaga 1. Resultat visar att de även den minsta simulerade full-range gradient sekvensen är ger minst lika bra upplösning av de modellerade bergmodellerna som multiple gradient array, medan de större ger tydligt bättre upplösning av vissa strukturer.

En viktig faktor vid verklig mätning är hur stor den maximala geometriska faktorn (K) är, eftersom det styr storleken på mätsignalen och därmed signal-brusförhållandet. K-faktorn beror av avståndet mellan elektroderna och på deras relativa inbördes placering, och ju större den är desto mindre blir mätsignalen. Större elektrodavstånd ger större K-faktor, och dipol-dipolkonfiguration (Figur 5) ger mycket större K-faktor än t.ex. multipel gradient. Det vore önskvärt att designa några alternativa mätsekvenser med full-range gradient som optimerats mot upplösning, signal-brusförhållande och mät hastighet, där simulerade signalstörningar som är proportionella mot signal-brusförhållandet ingår, med det ligger utanför ramarna för detta steg i projektet.



Figur 18. Exempel på resultat av numerisk simulering av full-range gradient array; a) inverterad resistivitetsmodell, b) inverterad IP-modell, c) modellerad resistivitetsfördelning, d) modellerade IP-egenskaper.

Kravspecifikation för systemdesign

För att hålla öppet för modifieringar av hårdvarans utformning för olika möjliga mätkonfigurationer kommer den designas på ett modulärt sätt. Avsikten är att utforma till exempel reläväxlingen så att det relativt enkelt går att bygga modifierade versioner med begränsade insatser utan att göra om hela konstruktionsarbetet. Utformningen av ingångsstegen, mätkanalerna, är kritisk för att man ska kunna uppnå det informationsinnehåll i IP-data som är avsikten. Detta styr val av bland annat AD-omvandlare, ingångsfilter och algoritmer för mätdatahantering i instrumentet. Detta utgör en del av en förstudie rörande metodik samt krav på instrument-hårdvara och -programvara som underlag för design av instrumentprototyp. Det omfattar modellering med olika programvaror med avseende på såväl ingångsegenskaper som mätkonfigurationer, som underlag för en kravspecifikation som täcker alla delar i mätsystemet.

Systemdesign

En kravspecifikation för anpassad systemdesign för instrumenthårdvara, inklusive utformning av ingångssteg (mätkanaler), strömsändare och reläväxel samt kapsling, samt instrumentprogramvara.

Ingångs- och kontrolldel

Kravspecifikationen för ingångs- och kontrolldelen inkluderar bland annat:

- Kapacitet för upp till 32 parallella ingångskanaler som samplas synkront
- Olika mätområden inom intervallet ± 2.5 V till ± 1000 V
- Ingångsimpedans ≥ 10 M Ω
- 1 mätkanal för mätning av utsänd ström från sändaren med synkron sampling
- 1 mätkanal för mätning av utspänning från sändaren med synkron sampling
- Individuell galvanisk isolation av mätkanaler (minst 3 kV för digitaliserade data)
- Möjlighet att klara av minst 125 kHz sampling
- Inbyggd GNSS typ RTK med PPS signal för synkning av samplingsklocka
- Interface mot externa synk-källor
- Kommunikation och styrning via trådbundet eller trådlöst nätverk
- Strömförsörjning 10-16 V DC

Strömsändare

Kravspecifikationen för strömsändaren inkluderar bland annat:

- Konstantström sändare
- Max uteffekt 300 W
- Max utspänning ± 600 V (1200 V peak to peak)
- Max utsänd ström 2500 mA
- Last inom området 0 Ω – 2 M Ω (kortslutningsskydd)
- Momentan polaritetsväxling
- Självdiagnostik med övervakning av temperatur och effektförlust
- Nödstopp som omgående bryter strömsändning
- Galvanisk isolation av styrsignaler och mot strömförsörjning

- Strömförsörjning 10-16 V DC
- Minst 85 % verkningsgrad vid 50 % av max utspänning

Reläväxel

Kravspecifikationen för reläväxel inkluderar bland annat:

- Växling av ingångskanaler till 64 elektroder fördelade på 2 eller fler elektrodkablar
- Bistabila reläer (minimal strömförbrukning)
- Självdiagnostik med övervakning av reläväxling
- Möjlighet att mäta gradienter med t.ex. 1, 2, 4 gånger steg (typisk 2D längs markytan)
- Möjlighet att mäta mot en gemensam referens (pol-dipol eller 3D)
- Möjlighet att mäta mellan elektrod 1-32 respektive 33-64 (borrhål-borrhål eller 3D)

Kapsling

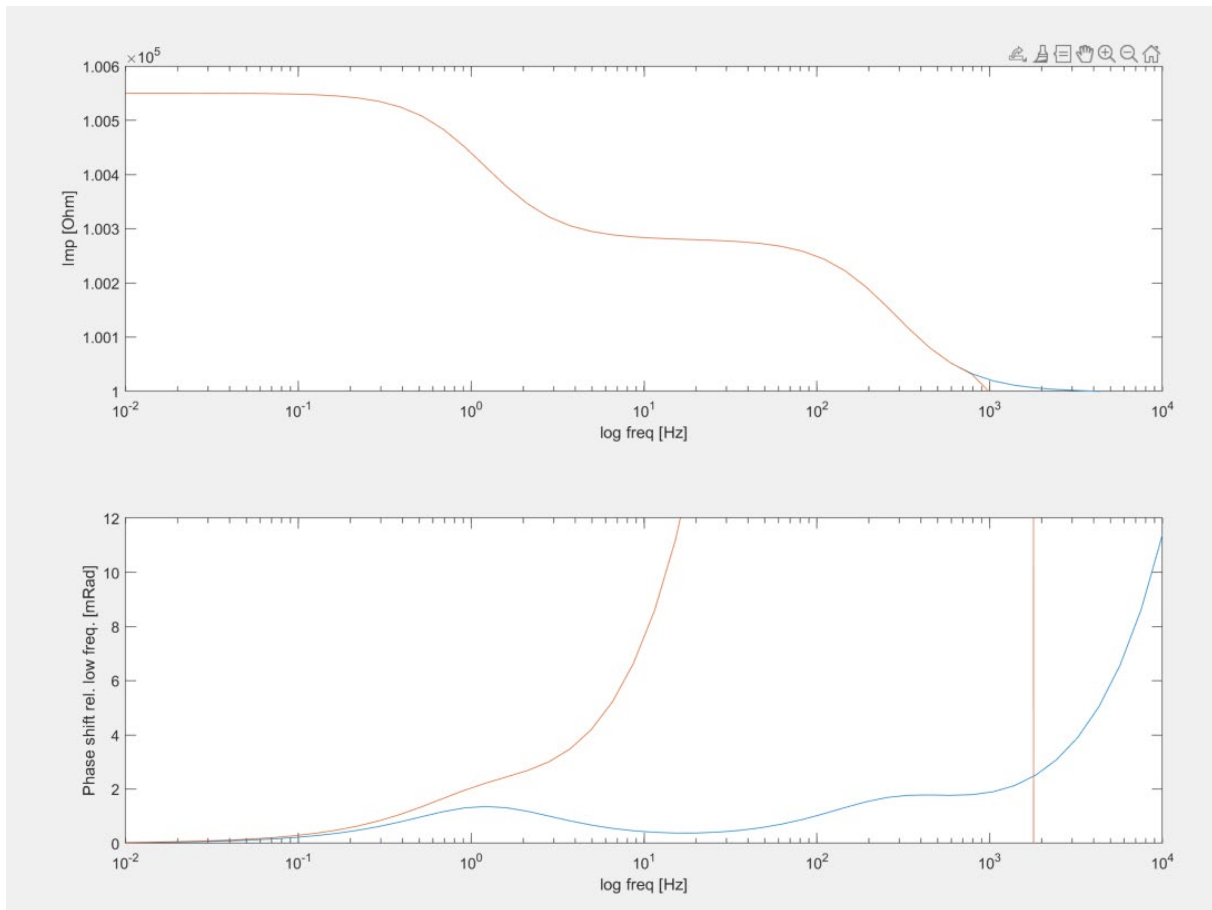
Kravspecifikationen för kapslingen inkluderar bland annat:

- 32-poliga KPT-don av standardtyp för ERT /DCIP
- Minst IP65 (spolsäkert)
- Mekaniskt tålig
- Så kompakt och lätt som möjligt

Ingångsegenskaper

Modellering har gjorts av ingångsegenskaper med avseende på spektrala egenskaper och mätupplösning, vilket legat till grund för kravspecifikation och design av ingångsdelen. Figur 19 visar resultat av simulerad mätning med Terrameter LS2 på en av DGG¹s referensketsar. Resultatet visar att uppmätt impedans endast avviker signifikant från teoretisk respons över cirka 800 Hz, medan fasförskjutningen är starkt frekvensberoende. Eftersom fasförskjutningen är en viktig parameter i spektral IP är det önskvärt att designa ingångsdelen så att den får bättre egenskaper med avseende på detta. För att uppnå det måste den designas för att kunna sampla signalen med tillräckligt hög hastighet för att de analoga ingångsfiltren ska kunna ha en så hög brytpunkt att de inte påverkar mätdata signifikant upp till önskad högsta önskad frekvens. Önskade goda frekvenssegenskaper upp till 1 kHz leder till att ingångsdelen bör sampla med 125 kHz.

¹ DGG = Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (Tyska geofysiska föreningen)

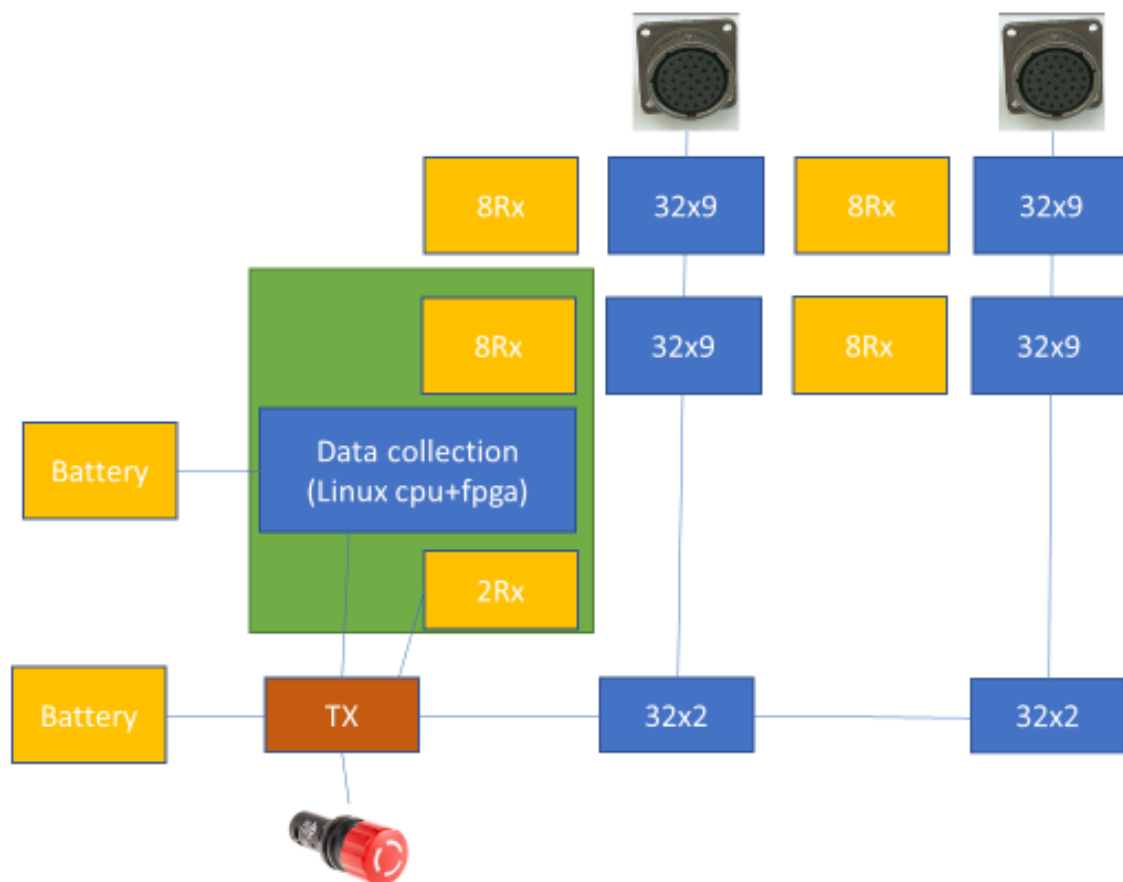


Figur 19. Teoretisk mätrespons på DGGs referenskrets för IP-mätning TNW11 för Terrameter LS2, där den övre visar impedansens frekvensberoende och den under fasförskjutnings (Blå: teoretisk för TNW11 kretsen. Orange: efter påverkan av ingångsfilter).

Utveckling och byggande av instrumentprototyp

Principdesign

En principdesign av en flexibel instrument-plattform som vi tagit fram för ett mångkanaligt ERT-instrument, så att den anpassas för DCIP i bergtillämpningar. Instrumentprototypen består av en ingångsdel, strömsändare och reläväxel (Figur 20), som kommer integreras i en fältmässig och bärbar låda för att det ska vara möjligt att testa den och metodiken under realistiska fältförhållanden. Flexibilitet och möjlighet till framtida vidareutveckling och anpassning för olika behov har varit en ledstjärna för designen. Den har utformats för att passa ihop med den typ av elektrodkablar och andra tillbehör som används som standard av dagens mätsystem. Instrumentprogramvaran har utformats så att den kan styras via nätverksuppkoppling från en fältmässig dator eller pekplatta.



Figur 20. Principiell uppbyggnad för instrumentprototyp (8Rx = modul med 8 ingångskanaler, 2Rx = mätkanaler för sändarövervakning, Tx = strömsändare, 32x2, 32x9 = reläväxling).

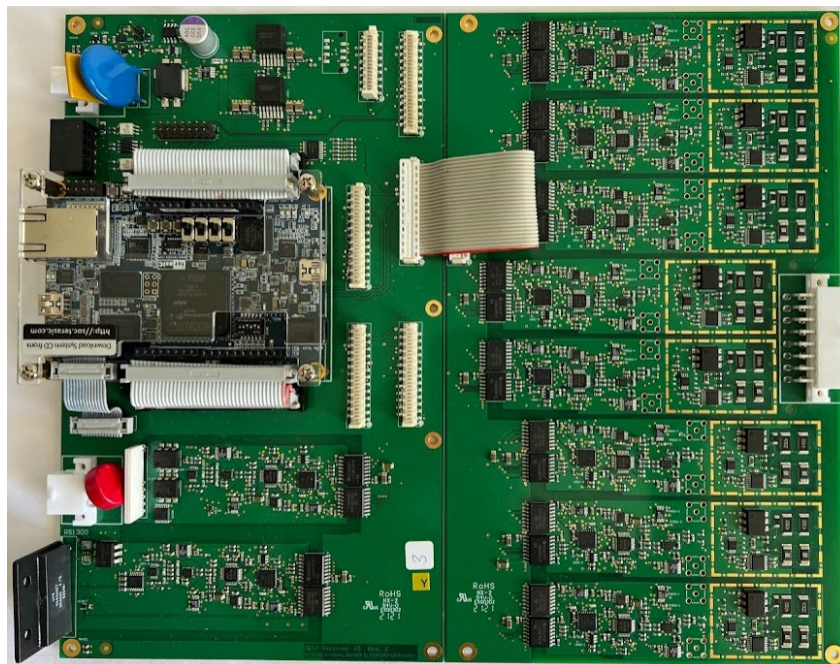
Problem med elektronikleveranser, bland annat som följd av komponentbristen, lett till förseningar extrakostnader i samband med tillverkning av prototypinstrumentet. Det har också lett till mycket extra arbete för att göra det möjligt att genomföra projektet. I dagsläget är mottagar- och kontrolldelen av instrumentet färdig hårdvarumässigt för användning fullt ut, men det har krävt en extra omgång av tids- och kostnadskrävande omkonstruktion på grund av att vissa elektronikkomponenter inte har varit tillgängliga. Detsamma gäller en liten sändare som är lämplig för laborietester, men som också är en värdefull tillgång för test av övriga delar av instrumentet

samt för utveckling och test av ny funktionalitet. Övriga delar i prototypinstrumentet har inte kunnat färdigställas på grund av problem med komponentleveranser, trots omkonstruktion.

Ingångsdel

Ingångssteget (mät delen) är modulärt uppbyggd med 8 stycken 24 bitars AD-omvandlare per modul, plus 2 stycken AD-omvandlare för att mäta utsänd ström och spänning (Figur 21). Konstruktionen är designad för att klara upp till 512 ksamples/sekund. De olika delarna i ingångssteget styrs av en datormodul med en FPGA (Field-Programmable Gate Array) och en ARM-processor. Designen är gjord så att det är möjligt att expandera antalet mätkanaler i steg om 8 upp till maximalt 32, utöver de två mätkanaler som är dedicerade för strömsändningen.

Samtliga mätkanaler är galvaniskt skilda från varandra och från övriga delar av konstruktionen. Detta är viktigt för att undvika så kallade common-modeproblematik som kan uppstå om mätsignalen för varje mätkanal ligger inom ramen för sitt mätområde, men den sammanlagda skillnaden i mätspänning mellan olika mätkanaler blir för stor. Problem med common-mode kan leda till stora mätfel som är svåra att upptäcka, och det är välkänt att vissa instrument som är kommersiellt tillgängliga på marknaden lider av det.



Figur 21. Foto på ingångsprototypkort med 8 ingångskanaler, plus två mätkanaler för mätning av ström och spänning för sändaren, samt datormodul med FPGA och ARM-processor.

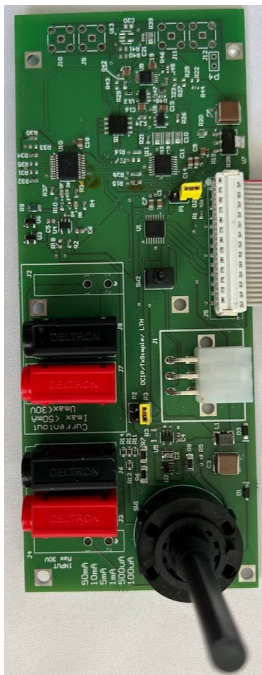
Strömsändare

Baserat på en förstudie med avseende på möjlig utformning av strömsändare med lämpliga egenskaper har vi gjort en design som består av en DCDC-omvandlare, strömregulator och polväxlare. Den drivs av 12 V DC nominellt, vilket har fördelen att den kan drivas med konventionella

blybatterier för bilar som normalt finns att tillgå oavsett var i världen man befinner sig, även om moderna litiumjonbatterier är att föredra. Konstruktionen är galvaniskt isolerad vad gäller styr signaler samt från sin strömförsörjning, vilket är en stor fördel mättekniskt sett och ett viktigt krav ur personsäkerhetssynpunkt. Den är designad med kortslutningsskydd och för att strömmen ska kunna brytas omedelbart med hjälp av nödstopp.

Nyckelegenskaper för sändaren är att den är dimensionerad för maximal 600 V utspänning och 3 A utsänd ström, dock med en effektbegränsning på 300 W. Det olika delarna av konstruktionen har testats var för sig, där funktionen strömregulator och polväxlare har testats och verifierats tillsammans med en DCDC-omvandlare med lågeffekt (Figur 22a), vilket tillsammans utgör en liten strömsändare. Den lilla strömsändaren är väl lämpad för laboratoriemätningar samt en värdefull tillgång i samband med test av övriga delar av instrumentet och för vidareutveckling av funktionalitet.

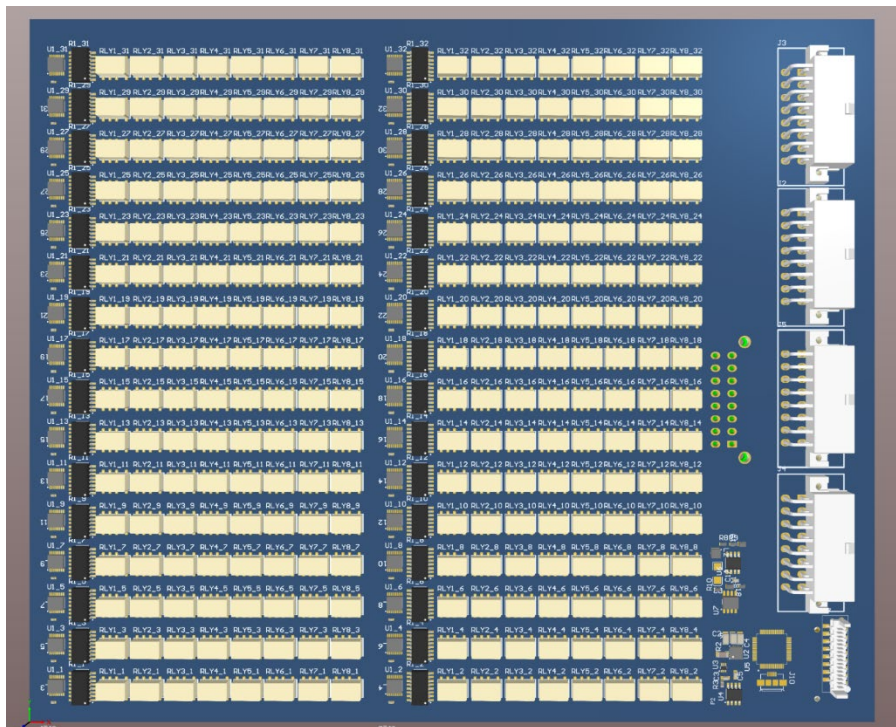
DCDC-omvandlaren (Figur 22b) har testats separat, men konstruktionen har inte kunnat testas som en helhet ännu på grund av att en nyckelkomponent i konstruktionen inte funnits tillgänglig.



Figur 22. Foto på; a) labb-sändaren, och b) DCDC-omvandlaren till den stora sändaren.

Reläväxel

Reläväxelprototypen (Figur 23) har designats för att vara flexibel så att den kan konfigureras på olika sätt för olika behov.



Figur 23. Datorgenererad bild av reläkort

Systemintegrering

Systemintegrering av delarna, inklusive positionering, nätverk och montering i en fältmässig och bärbar kapsling (IP65 eller bättre).



Figur 24. Foto på väska med ingångsprototyp.

Instrumentprogramvara

För att kunna testa ingångssteget har det varit nödvändigt att skriva programvara som styr hårdvaran och läser ut data ur den, vilket utgör prototypen till en instrumentprogramvara.

Instrumentprogramvaran är utvecklad i programspråket Go, som är inspirerat av C och framtaget av Google. Det kännetecknas bland annat av stark typning vilket ger mindre risk för svårupptäckta fel i programkoden. Hela koden kompileras till en statiskt länkad exekverbar fil, vilket eliminerar beroende av installerade programbibliotek. Detta är en stor fördel vid uppgradering av

programvaruversion i instrumentet då det tar bort risken att man råkar ut för att ha program och biblioteksrutiner som inte passar ihop och därigenom ger svårdiagnosticerade fel. En annan styrka med det är bra stöd för parallella processer.

Instrumentprogramvaran är anpassad för att kunna styras av en app från en dator, pekplatta eller smarttelefon, vilket också medför att den enkelt kan fjärrstyras.

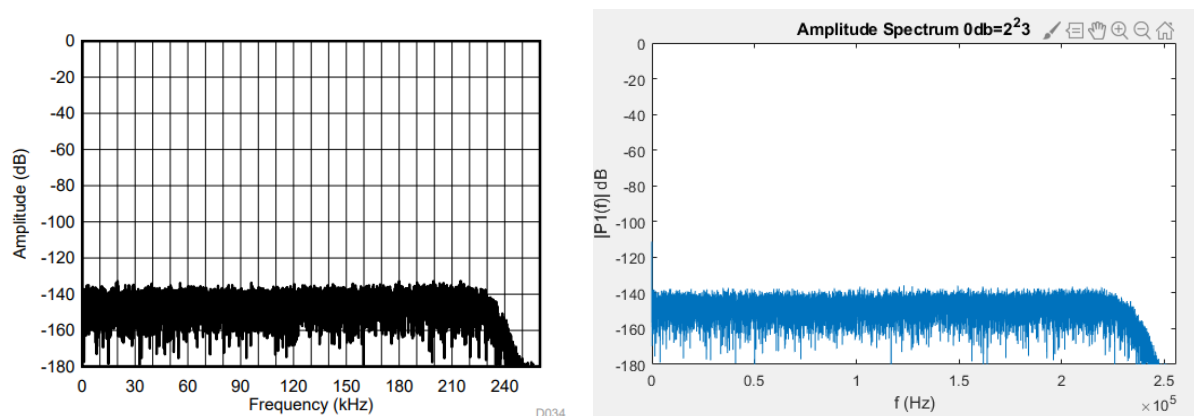
Databearbetning sker huvudsakligen i Python, som har bred användning i forskarvärlden. Det finns en rik tillgång till programbibliotek med öppen källkod utan kostnad, bra för möjlighet till anpassning för olika behov samt att fler kan bidra till utveckling av ny funktionalitet.

För databearbetning används delvis algoritmer som utvecklats inom ramen för BeFo-projekt 331, vilka har vidareutvecklats och delar av dem anpassats.

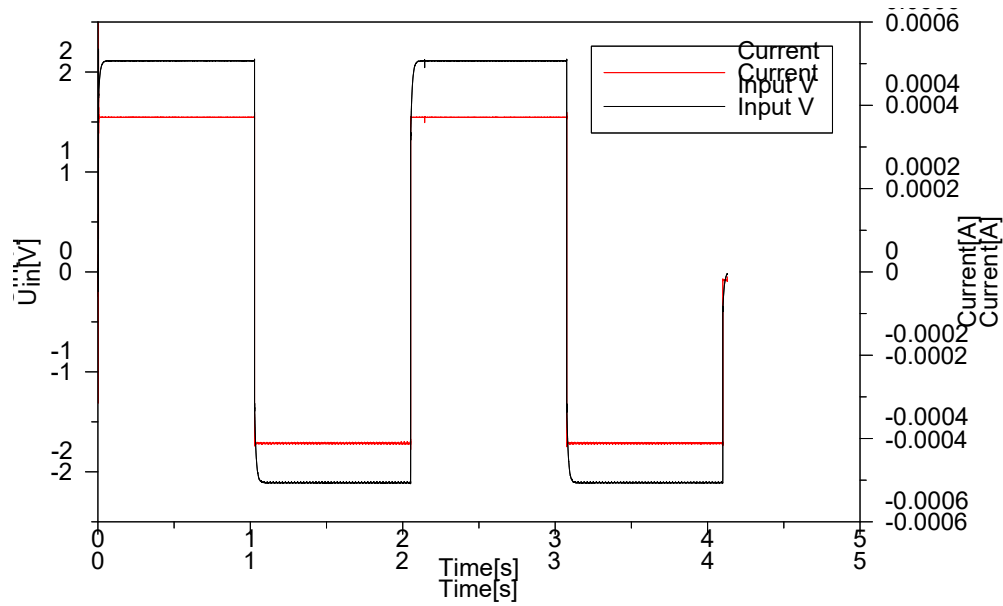
Mättester

Laborrietester

Instrumentprototypen har testats mot spänningsreferenser, referensmotstånd, signalgeneratorer, etc., i laboriet, för att säkerställa grundläggande funktion och verifiera att mätenskaperna uppfyller kraven. En grundläggande sådan mätning är att mäta med ingångskanalerna med kortsluten ingång för att kvantifiera hur bra störningsundertryckningen är. Resultatet av en sådan mätning visas i Figur 25, där det vänstra diagrammet visar den nominella störningsundertryckningen enligt databladet och det högra visar uppmätt prestanda för prototypinstrumentet, vilket bekräftar att elektronikkonstruktionen är väl designad.

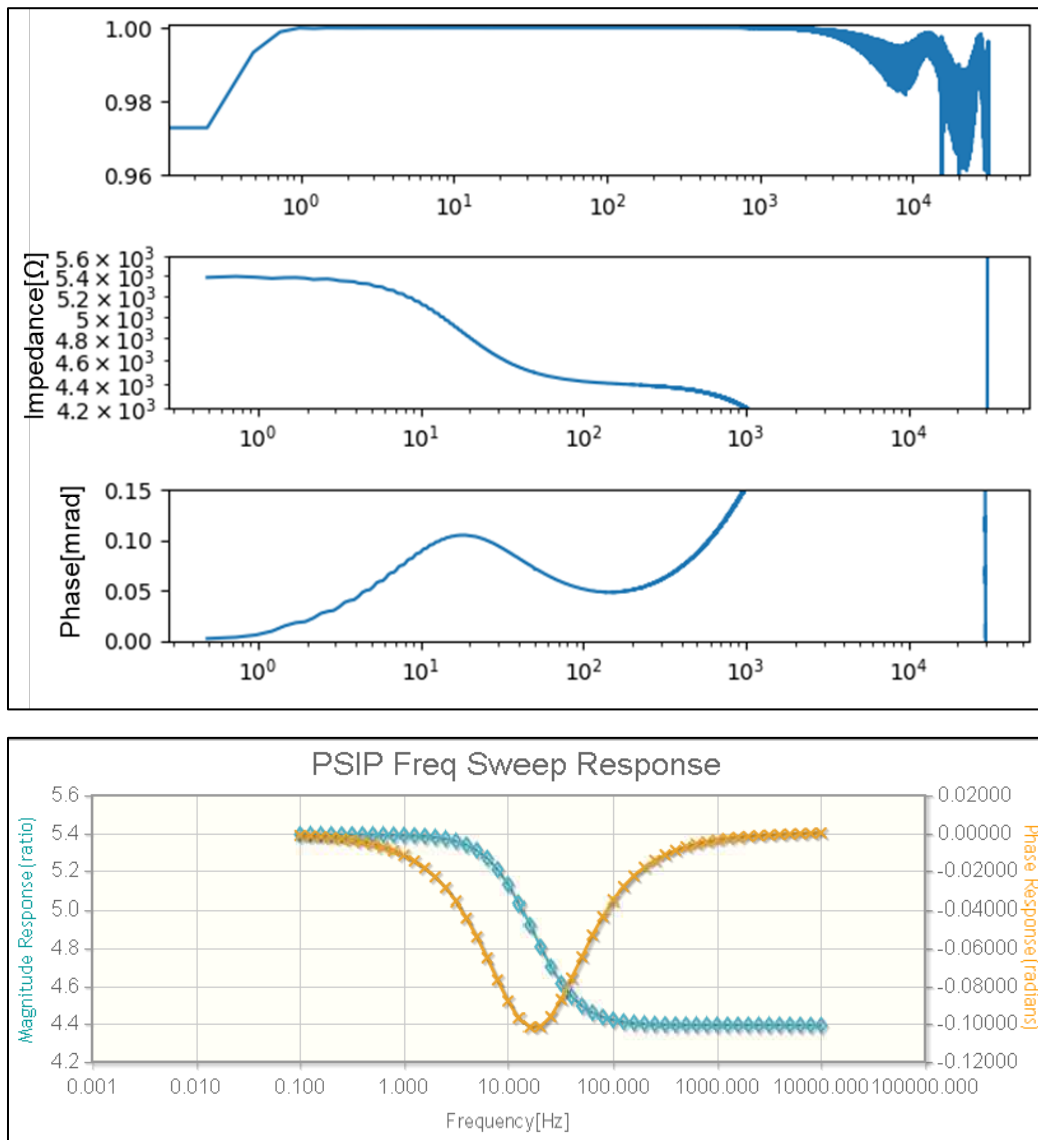


Figur 25. Störningsundertryckning för ingångsprototypen i med högsta samplingsfrekvensen (512 kHz); a) nominell enligt databladet, b) uppmätt för prototyp.

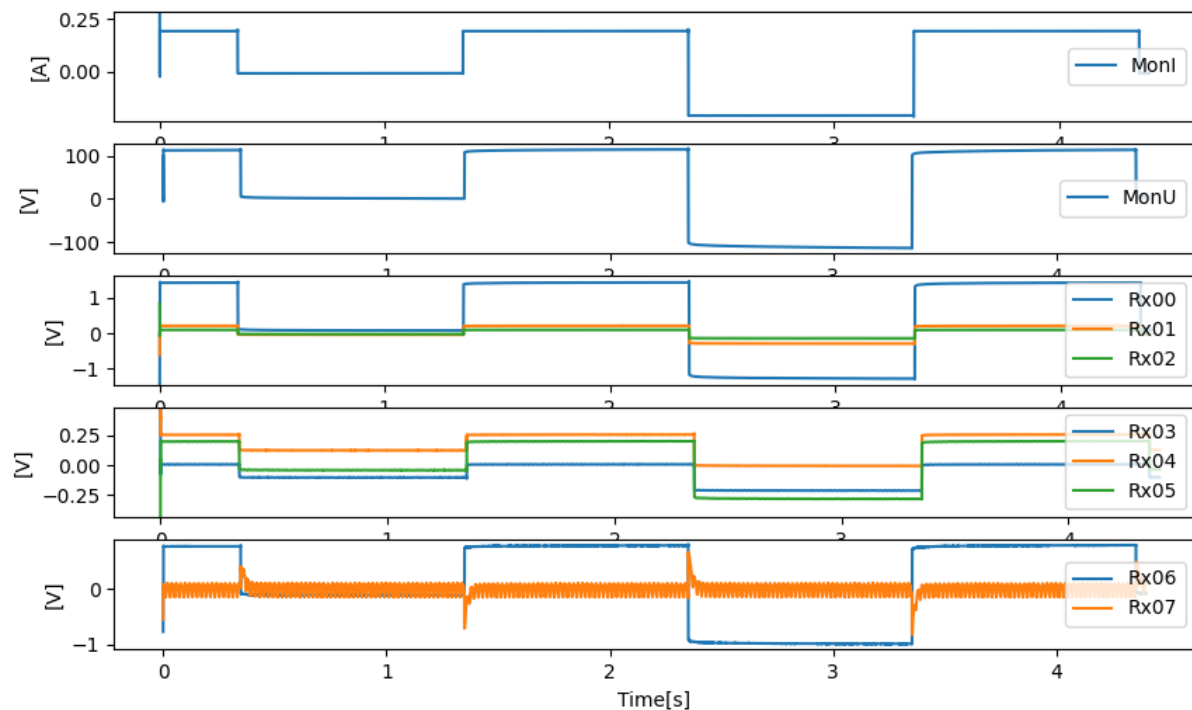


Figur 26. Data uppmätta över en RC-krets (motstånd och kondensator) med utsänd signal från den lilla sändaren och mottagen signal från ingångsprototypen.

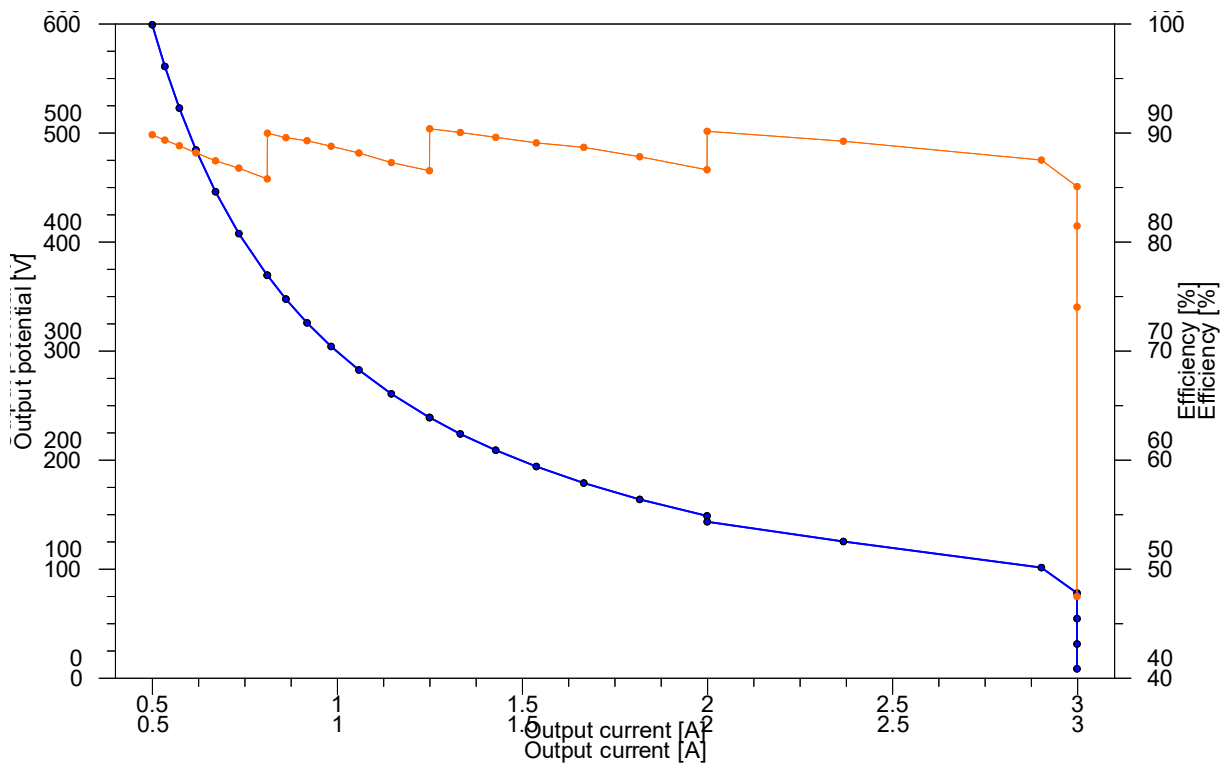
Jämförande mätningar har gjorts med laboratorieinstrument Ontash & Ermac PSIP för spektral IP. Mätning med prototypinstrumentet i tidsdomän har gjorts på en RC-krets med 1 k Ω i serie med 10 μ F, parallellt med 4,4 k Ω (Figur 26) med strömpulser på 0,4 mA. En första ansats till analys av frekvensinnehållet har gjorts med hjälp av överföringsfunktion (Figur 27a), där det översta diagrammet visar korskorrelationen mellan utsänd ström och uppmätt spänning, det mittersta impedansen och den nedersta fasförskjutningen, samtliga som funktion av frekvensen. Det ska noteras att detta är en första ansats som behöver förbättras m.a.p. på högre frekvenser. Figur 27b visar resultatet av mätning i frekvensdomän med Ontash & Ermac PSIP.



Figur 27. Frekvensinnehåll i data mätta över en RC-krets ($4,4 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega/10 \mu\text{F}$) med 1 s strömpulser; a) prototyp (första ansats till analys), b) Ontash & Ermac PSIP.



Figur 28. Exempel på uppmätta signaler vid testmätning bakom V-huset på LTHs campus (MonI är den utsända strömmen i [A], MonU är den utsända spänningen [V], Rx00-Rx07 är mottagen spänning i [V] på kanal 0-7. Kanal Rx07 är inte ansluten vid mättilfället).



Figur 29. Uppmätta egenskaper för DCDC-omvandlaren för den större (300 W) strömsändaren: arbetskurva med avseende på utspänning som funktion av utsänd ström (blå) samt verkningsgrad (orange).

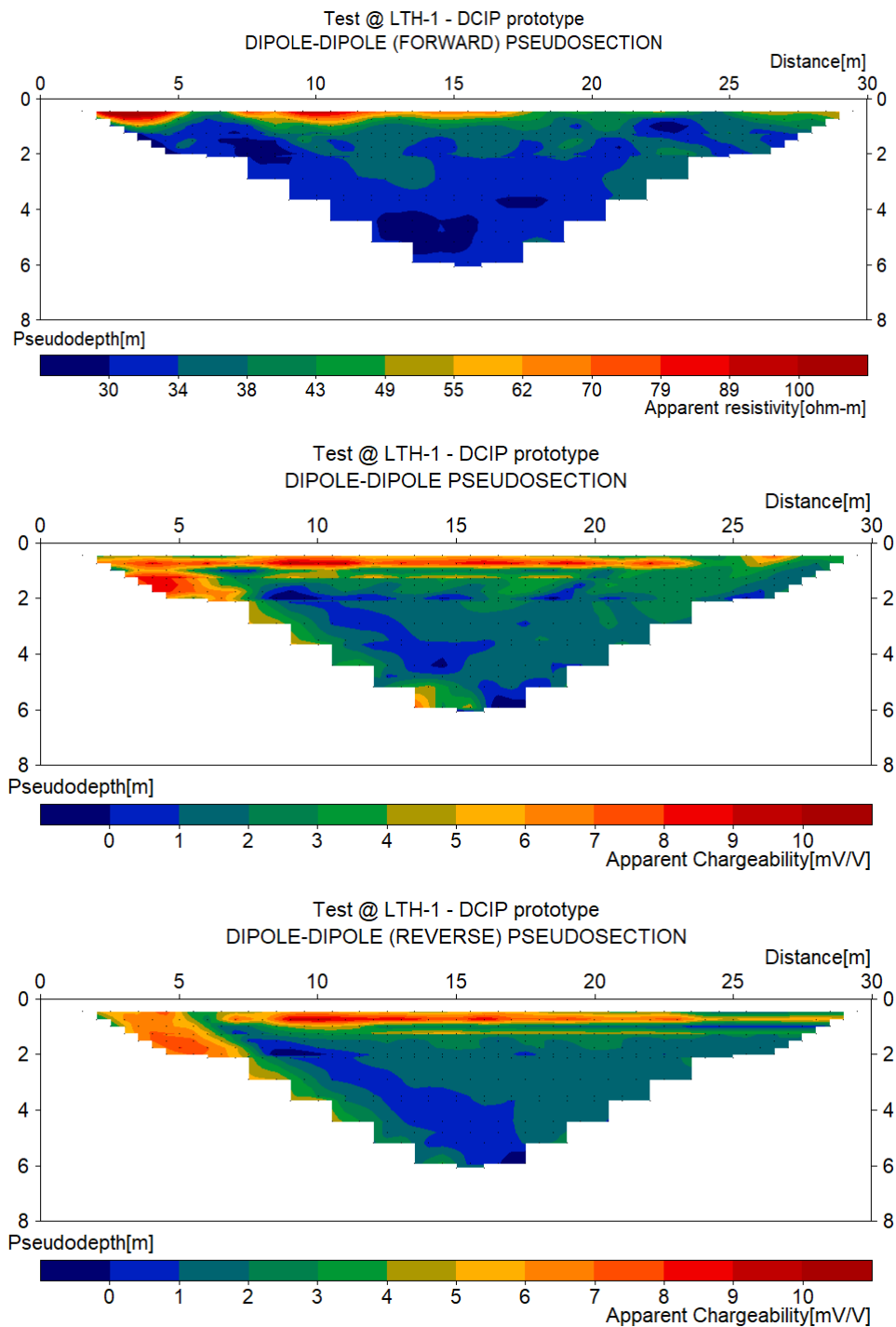
Fältförsök i begränsad skala

Mätegenskaper och mätmetodiken har testats och utvärderats vidare genom fältförsök i begränsad skala på LTHs campus, närmare bestämt på gräsmattan i anslutning till borrhålet LTH-1 bakom V-huset. Det första testet genomfördes genom att bland annat göra reciproka mätningar för ge möjlighet att kvantifiera mätdatakvaliteten för såväl resistivitets- som IP-data. Mätförsöken har utförts med 2D-teknik och inkluderar jämförande mätning med ABEM Terrameter LS2, som är mätteknisk state-of-the-art för närvarande. Utsänd ström var 200 mA och strömpulsens längd 1 s.

Reciproka mätningar för kvantifiering av mätfel.

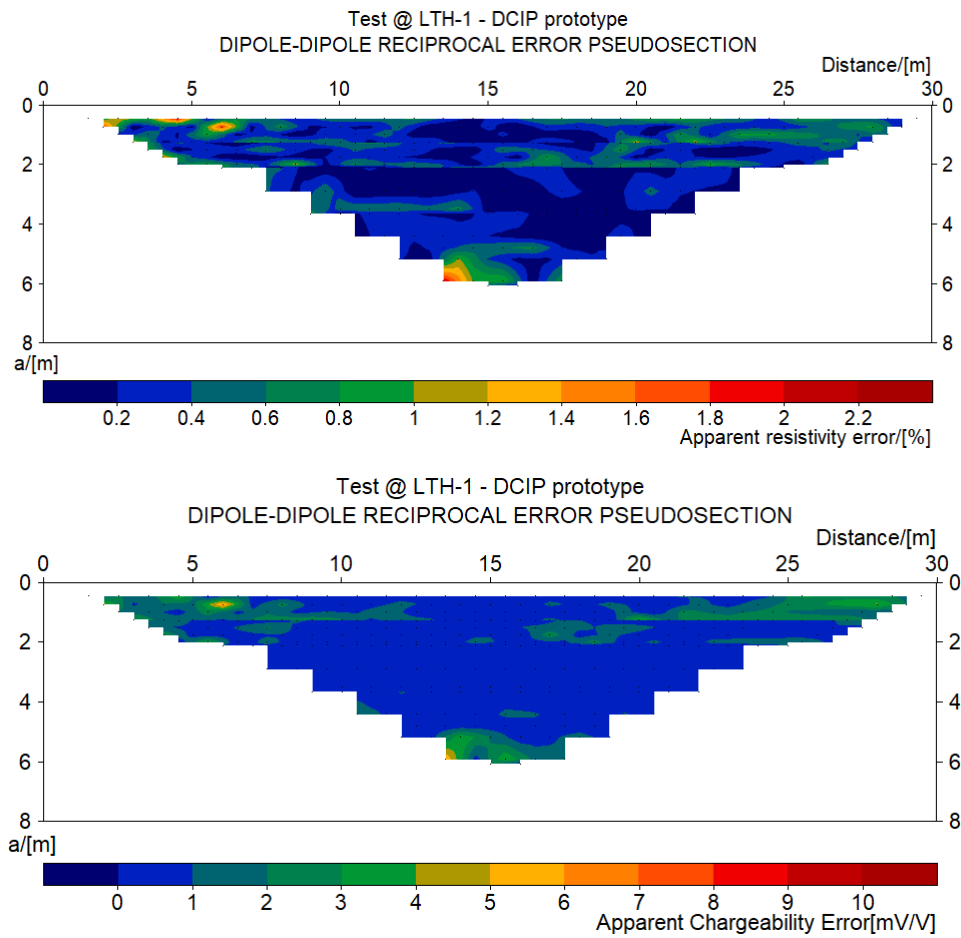
Testmätning utfördes med ett 8-kanals mätkort på 32 elektroder som är fast installerade i gräsmattan, där elektroderna utgörs av 10 cm x 10 cm plåtar av rostfritt stål som är nedgrävda på ett par dm djup. Denna typ av elektrodinstallationen ger generellt bra elektrodkontakt, och elektrodkontaktmotståndet som mättes upp låg i genomsnitt på drygt 100 Ω vilket är mycket bra. Mätningarna gjordes med mätsekvenser för dipol-dipol som är designade för Terrameter LS med upp till n-faktor 7, det vill säga som mest 7 mätningar per strömsändning (i många fall blir det i praktiken färre eftersom en eller flera elektroder skulle hamnat utanför änden på elektrodutlägget). Mätningarna gjordes med 200 mA utsänd ström och 1 s lång strömpuls, varav 700 ms "acquisition delay" och 300 ms "acquisition time". IP-effekten (uppladdningseffekten = "chargeability") integrerades i intervallet 10 – 730 ms. Data från prototypinstrumentet har extraherats med samma tidsintervaller för att resultaten ska bli jämförbara. Det har gjorts en medelvärdesbildning genom nedsampling av data samt kompensation för varierande bakgrundsnivåer, men ingen avancerad filtrering av det slag som presenteras av Olsson et al. (2016).

Pseudosektionerna för resistivitet för "forward" och "reverse" dipol-dipol är så snarlika att de för ögat ser det närmaste identiska ut, därför visas endast "forward" här (Figur 30). För IP skiljer de sig åt i en del detaljer även om de övergripande är snarlika.



Figur 30. Pseudosektioner från DCIP prototyp; a) resistivitet, b) IP-effekt (forward dipole-dipole), c) IP-effekt (reverse dipole-dipole).

Måtfelen för uppmätt resistivitet som beräknats från de reciproka dataparen, som visas i form av en pseudosektion i Figur 31, ligger väl under 1 % i medeltal med en måttlig standardavvikelse. Medelvärde för måtfelen för IP ligger under 1 mV/V, även det med måttlig standardavvikelse.

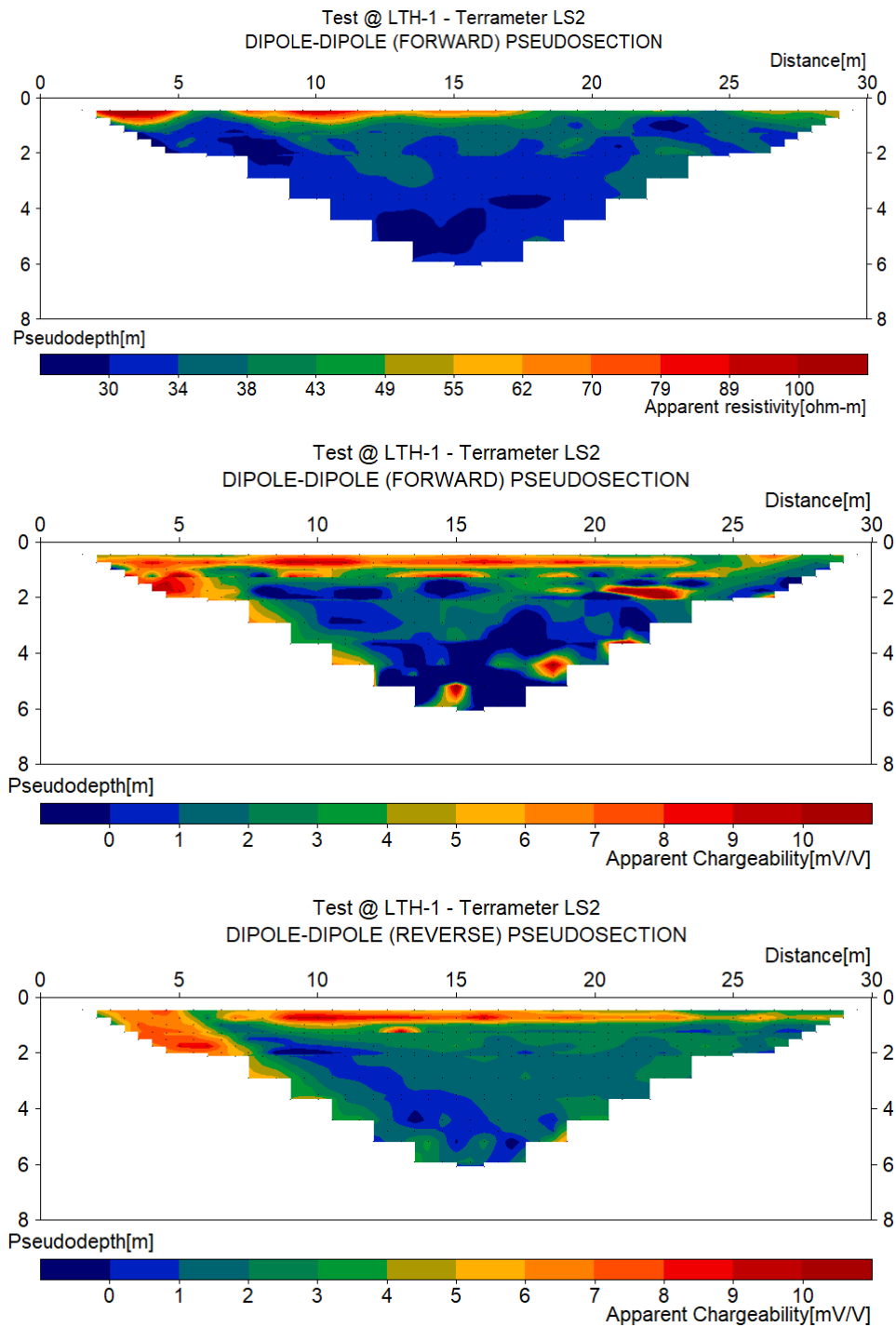


Figur 31. Observation error pseudosektion för DCIP prototyp;
 a) resistivitet (mean 0.37 %, median 0.33 %, standarddeviation 0.33 %)
 b) IP-effekt (mean 0.86 mV/V, median 0.56 mV/V, standarddeviation 0.94 mV/V).

Jämförande fältmätning med Terrameter LS2 som referensinstrument

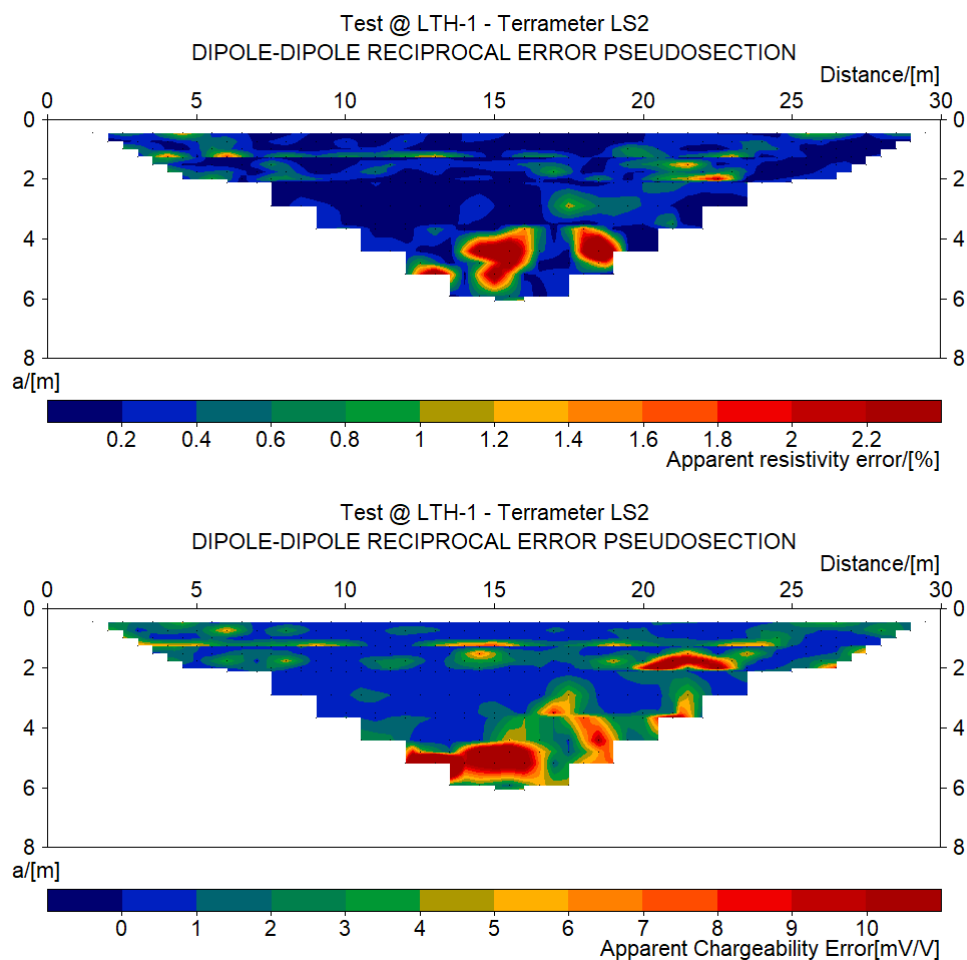
Jämförande mätning utfördes med en Terrameter LS2 (serienummer LS217020399) genom att båda instrumenten var inkopplade till samma elektrodlägg, och mätte samtidigt på samma utsända strömpulser. Data som presenteras har exporterats med hjälp av Terrameter LS Toolbox.

Pseudosektionerna för resistivitet är så lika de som mättes med prototypinstrumentet att det är svårt att se någon skillnad (Figur 32), medan de för IP skiljer sig åt främst för "forward"-mätningen.



Figur 32. Pseudosektioner från Terrameter LS2; a) resistivitet, b) IP-effekt (forward dipole-dipole), c) IP-effekt (reverse dipole-dipole).

Mätfelen för uppmätt resistivitet som beräknats från de reciproka dataparen visas i form av en pseudosektion i Figur 33, och de skiljer sig mycket från det för instrumentprototypen men där den större standardavvikelsen hänger samman med ett antal fel på några procent. Mätfelen för IP ligger signifikant högre för LS2-data jämfört med prototypinstrumentet (Tabell 2).

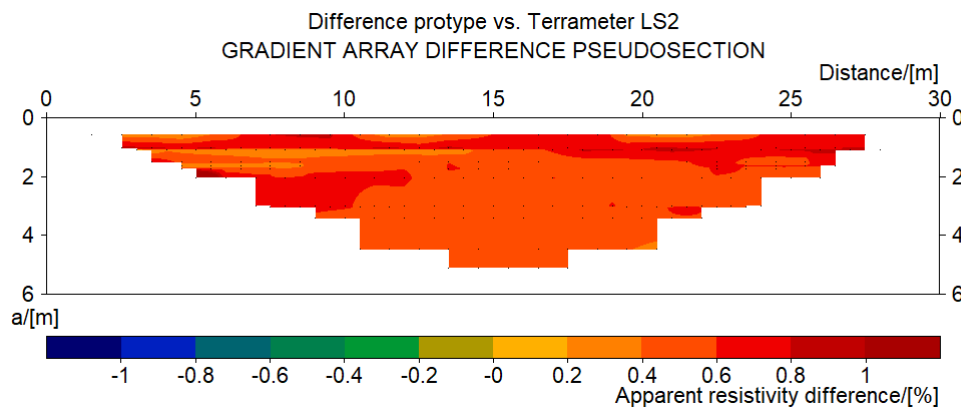


Figur 33. Pseudosektion som visar mätfel baserat på reciproka mätningar med Terrameter LS2;
a) resistivitet (mean 0.36 %, median 0.19 %, standarddeviation 0.54 %),
b) IP-effekt (mean 2.1 mV/V, median 0.92 mV/V, standarddeviation 3.7 mV/V).

Tabell 2. Sammanställning av observationsfel från DCIP prototypen och Terrameter LS2.

		DCIP prototype	Terrameter LS2
Apparent resistivity error [%]	Mean	0.37	0.36
	Median	0.30	0.19
	Std.Dev.	0.33	0.54
Apparent chargeability error [mV/V]	Mean	0.86	2.11
	Median	0.56	0.92
	Std.Dev.	0.94	3.67

Överensstämmelsen mellan prototypinstrumentet och Terrameter LS2 är god, som framgår ovan samt differenssektionen baserad på mätning med multipel gradientkonfiguration (Figur 34) där skillnaden genomgående ligger under 1 % trots att det inte gjorts någon kalibrering av ingångsstegen mot någon yttre gemensam referens.



Figur 34. Differens mellan mätresultat från prototypinstrument och Terrameter LS2 (medel 0.57 %, median 0.56 %, standaravvikelse 0.38 %).

Mätning med 32 parallella mätkanaler

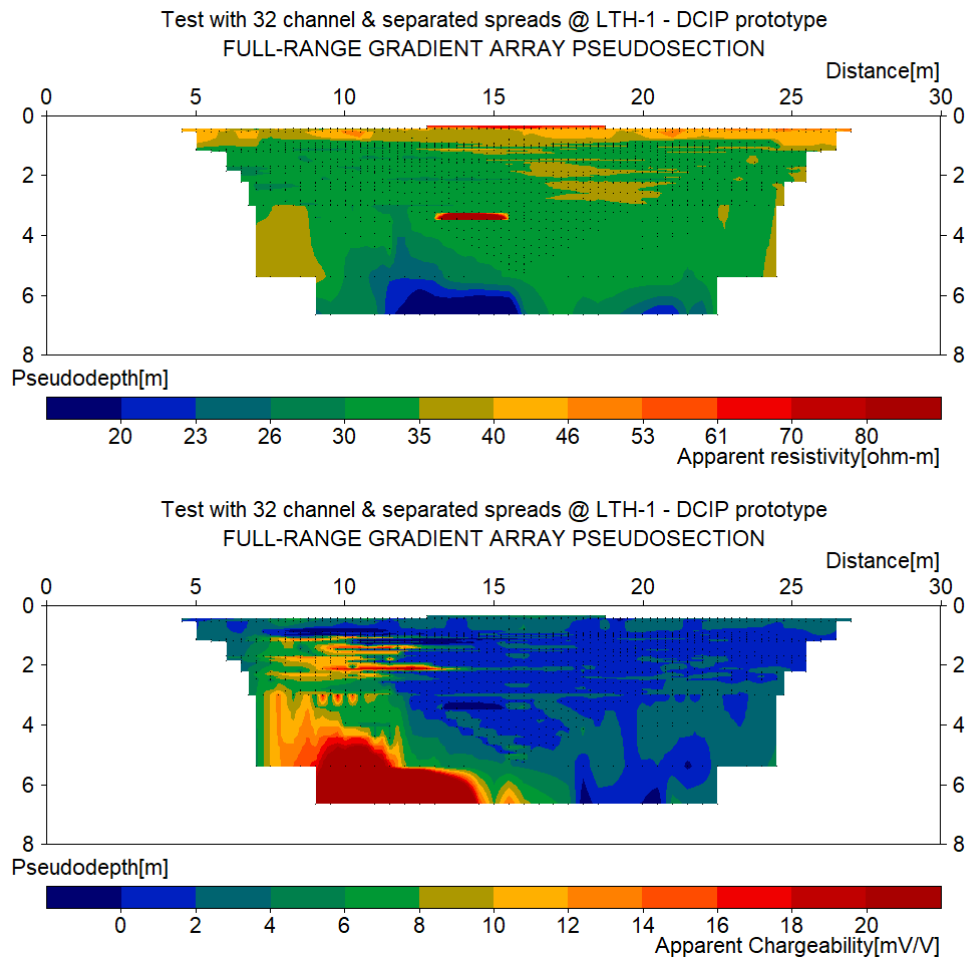
Mätförsök med 32 parallella kanaler utfördes på ett utlägg bestående av 64 elektroder på en linje, med inbördes avstånd 0,5 m, där varannan elektrod anslöts till på respektive elektrod kabel som var separerat med cirka en meter. Det ena kabelutlägget användes för strömsändning och det andra för potentialmätning, och ytterligare en spegelvänd men i övrigt identisk mätsekvens gjordes efter att de bytt roll, enligt metodik föreslagen av Dahlin & Leroux (2012). Utsänd ström var i detta fall 20 mA och strömpulserna 1 s långa. Vid extrahering av data har samma tidsintervall som för 8-kanalstestet använts.

Varje mätsekvens innehöll 42 olika strömelektrodkombinationer, vilket skulle ge 1302 mätdata vardera, d.v.s. sammanlagt 2604 mätningar. En mätsekvens tog knappt 5 minuter att genomföra, vilket ger att den rena mättiden för ett komplett dataset skulle kunna vara knappt 10 minuter om man bortser från extra tid som följd av att det var en del manuell hantering och första gången.

I samband med genomförandet av mätförsöket och efterföljande analys av mätdata upptäcktes att mätkanalerna av misstag inte kopplats till elektroderna på det sätt som det var tänkt, samt att data från en av mätkanalerna inte blev sparade. Vidare visade det sig att data från 5 strömelektrodkombinationer inte sparades på grund av ett mjukvaruproblem. Detta ledde till att mätsekvensen blev annorlunda än avsett och att en mindre del av mätningarna inte sparades. Avsikten var att mätsekvensen skulle bestå huvudsakligen av mätningar av typ alfa, där båda mätelektroderna mellan strömelektroderna, och beta, där båda mätelektroderna är placerade utanför strömelektroderna (Figur 5), samt ett begränsat antal av typ gamma där mätelektroderna gränsar en strömelektrod. Mätningar av typ gamma kan vara besvärliga att hantera på grund av att mätdata lätt kan hamna mycket nära noll, men på grund av felkopplingen blev fördelningen istället 24 % alfa, 32 % beta och 44 % gamma. Detta resulterade i ett litet antal mätdata med negativa skenbara resistiviteter, vilka sorterades bort innan inversion av data (5 av 2160).

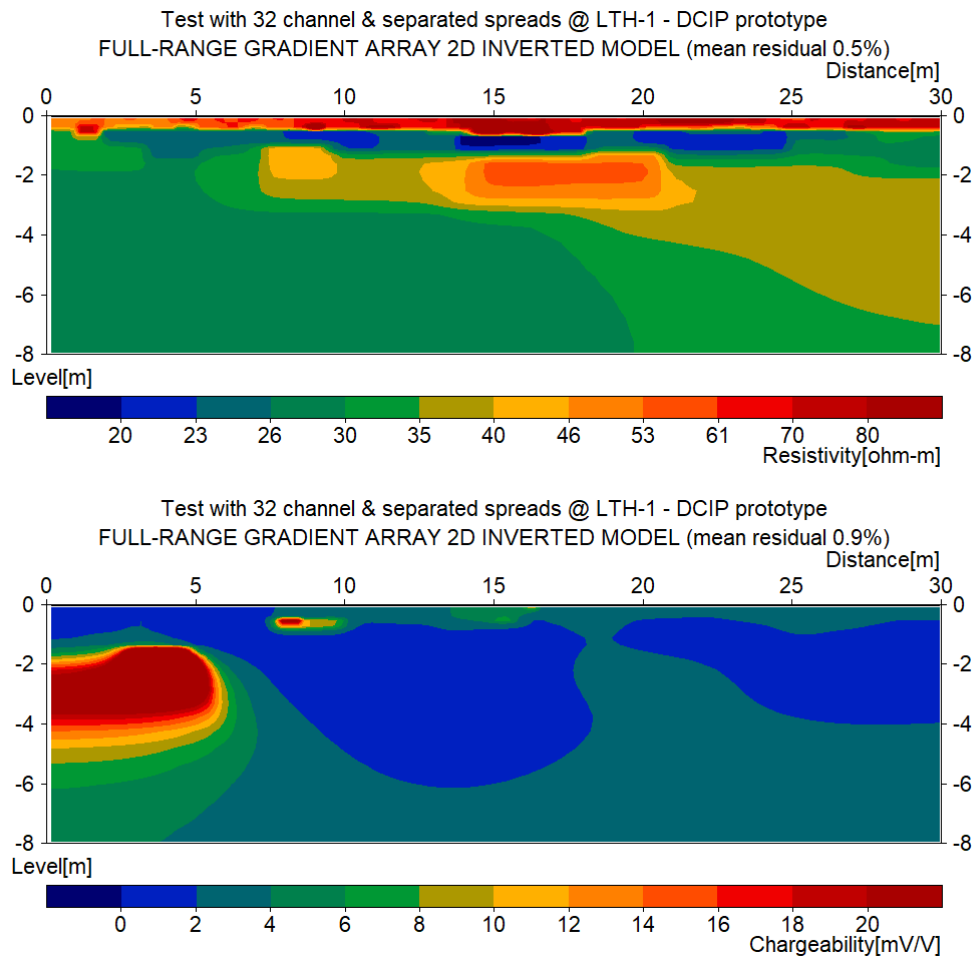
Det påverkar även möjligheten att kvalitetsgranska mätdata genom att rita upp dem som t.ex. pseudosektioner, då det kan bli svårt att avgöra om datakvaliteten är bra eller ej, vilket även är ett generellt problem för blandade mätkonfigurationer. Oaktat detta har data ritats upp som pseudosektion (Figur 35), som med undantag för en till synes avvikande grupp med hög skenbar resistivitet i mitten av diagrammet indikerar konsistenta data av god kvalitet för resistiviteten. Även

pseudosektionen för IP-data, som visar integrerad IP-effekt för tidsintervallet 10-730 ms, tyder på bra datakvalitet.



Figur 35. Pseudosektion från 32-kanalstest med DCIP-prototyp; a) resistivitet, b) IP-effekt.

Inversion av mätdata med hjälp av Res2dinvX64 fungerade utmärkt och resulterade i mycket låga residualer (0,5 % medel för resistivitet och 0.9 % för IP-effekt), vilket visar att datakvaliteten är hög. Modellen (Figur 36) stämmer väl överens med förväntningarna som baseras på tidigare mätförsök på platsen.



Figur 36. Inverterade sektion från 32-kanalstest med DCIP-prototyp; a) resistivitet, b) IP-effekt.

Diskussion och slutsatser

Litteraturgenomgången visar olika mätstrategier och mätkonfigurationer som kan vara användbara för ERT / DCIP i 2D och 3D från markytan, med elektroder längs linjer, i rutnät eller runt byggnader eller andra konstruktioner. Vidare med elektroder nere i marken mellan borrhål samt mellan borrhål eller liknande och markytan. Val av mätstrategi och placering av elektrodutlägg styrs av flera faktorer där undersökningens syfte och budget, samt tillgängligt ytrymme som kan vara begränsat inte minst i urbana miljöer. För att optimera vilka mätkonfigurationer som används är simulering med hjälp av numerisk modellering ett oumbärligt verktyg. I detta steg av projektet har arbete fokuserats på 2D undersökning med elektroder längs en linje på markytan.

Baserat på litteraturgenomgången och egna analyser har full-range gradient array identifierats som mest intressant för 2D undersökning med elektroder längs markytan. Numerisk simulering visar att det fungerar väl och att det kan snabba upp mätförloppet flera gånger med bibehållen upplösning, eller förbättra upplösningen via större mängd data trots högre mät hastighet. En större mängd data gör undersökningen mera robust genom större redundans i data, vilket gör att mera data kan kasseras på grund av mätstörningar om så visar sig nödvändigt utan att det blir problematiskt. Detta är särskilt viktigt vid DCIP mätning med bra spektral upplösning och 3D, men kan även för 2D ERT bidra till förbättrad upplösning. Det vore värdefullt att arbete vidare med optimering av mätsekvenserna med full-range gradient array med hänsyn till signalnivåer i förhållande, signalstörningar och upplösning. En komplettering av mätsekvenserna med ett lämpligt antal mätningar som ger möjlighet till kvantifiering av mätfelet med reciprokanalys skulle också övervägas.

Problem med elektronikleveranser, bland annat som följd av komponentbristen, lett till förseningar extrakostnader i samband med tillverkning av prototypinstrumentet. Det har också lett till mycket extra arbete för att göra det möjligt att genomföra projektet. I dagsläget är mottagar- och kontrolldelen av instrumentet färdig hårdvarumässigt för användning fullt ut, men det har krävt en extra omgång av tids- och kostnadskrävande omkonstruktion på grund av att vissa elektronikkomponenter inte har varit tillgängliga. Detsamma gäller laboratoriesändaren medan andra delar i prototypinstrumentet inte kunnat färdigställas på grund av problem med komponentleveranser, trots omkonstruktioner.

Testmätning i laboratoriet visar att prototypinstrumentet visar att konstruktionen når upp till teoretiskt möjligt signal-brusförhållande, och den spektrala upplösningen uppfyller förväntningarna.

Praktiska mätförsök på LTHs campus har gett bättre datakvaliteten med prototypinstrumentet än med Terrameter LS2, men det krävs mera omfattande mätjämförelser under mera varierande förhållanden för att möjliggöra en ordentlig utvärdering. Mätförsöket med full-range gradient array visar att konceptet fungerar i praktiken, och att inversion av data resulterade i resistivitets- och IP-modeller med låga residualer som stämmer väl överens med tidigare undersökningar på platsen.

Datakvalitetsgranskning är utmanande för blandade data set (alfa, beta och gamma), kan delvis hanteras genom att dela upp data från ett dataset i delar som hanteras vara för sig i kvalitetsgranskningen och därefter läggs ihop inför inversionen. För 3D dataset och borrhålstomografi blir det ytterligare utmaningar, som gör att det kan bli nödvändigt med automatiserade rutiner, t.ex. enligt Barfod et al. (2020).

Planerat fortsatt arbete

I det föreslagna fortsatta arbetet ingår vidareutveckling av DCIP-metodik genom anpassning och vidareutveckling av metodik för fältmätning och datahantering. I detta ingår anpassning av elektrodkonfigurationer, och justeringar av datahantering, för 3D-undersökning med flera parallella elektrodutlägg, rutnät av elektroder, oregelbundna utlägg, samt borrhålsutlägg. Numerisk modellering med olika programvaror ska göras för test och verifiering av detta. Olika mätscenarier i form av mätkonfigurationer, mätsekvenser, signalstörningar och ingenjörsgelogiska frågeställningar simuleras genom numerisk modellering. Därigenom skapade syntetiska mätdata inverteras, på samma sätt som verkliga mätdata, och upplösningen av de simulerade modellerna utvärderas.

I den planerade fortsatta anpassningen och vidareutveckling av instrumentprototypen ingår implementering av stöd för synkroniserad mätning med och strömsändning från flera instrument samtidigt, där synkroniseringen är tänkt att ske via trådlöst nätverk eller radio-kommunikation och med nyttjande av GPS-tidspulser. Det huvudsakliga arbetet kommer bestå av utveckling av instrumentprogramvaran, med eventuella mindre revideringar av hårdvaran. Utveckling av användargränssnitt för styrprogramvara ska ske i form av en applikation som kan exekveras på en dator, pekplatta eller smarttelefon.

Flera prototypexemplar behöver byggas för att göra det möjligt att testa och verifiera synkroniseringen mellan dem. Initiiellt görs test och verifiering av funktionaliteten för prototyperna och deras inbördes synkronisering i laboratoriemiljö, så långt det går utan GPS-täckning. Därefter görs småskaliga fältförsök i omgångar tills funktionaliteten är verifierad, varefter systematiska försök där metodiken för mätning på flera utlägg simultant testas med olika upplägg kan göras. Mätning mellan borrhål, och mellan borrhål och markyta, ingår i detta.

Testresultaten bör utvärderas i omgångar, för att möjliggöra stegvis justering av algoritmer och instrumentprogramvara när brister identifieras så att dessa kan åtgärdas.

Slutligen görs fullskaliga fälttester i ett senare steg.

Referenser

- Barfod A.S., Lévy L. and Juul Larsen J. (2020) Automatic processing of time domain induced polarization data using supervised artificial neural networks, *Geophysical Journal International*, 224.
- Binley A. & Slater L. (2020) *Resistivity and Induced Polarization: Theory and Applications to the Near-Surface Earth*. Cambridge University Press. ISBN 9781108685955, 405p.
- Binley A. (2015) Tools and Techniques: Electrical Methods, in *Treatise on Geophysics, 2nd edition*, vol. 11, pp. 233-259.
- Blome M., Maurer H. & Greenhalgh S. (2011) Geoelectric experimental design — Efficient acquisition and exploitation of complete pole-bipole data sets, *Geophysics*, **76**(1), F15–F26.
- Dahlin T. & Leroux V. (2012) Improvement in time-domain induced polarisation data quality with multi-electrode systems by separating current and potential cables, *Near Surface Geophysics*, **10**, 545-565.
- Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V. (2010) Resistivity-IP for landfill applications, *First Break*, 28(8), 101-105.
- Dahlin T. & Zhou B. (2006) Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging, *Near Surface Geophysics*, **4**, 113-123.
- Dahlin T & Zhou B. (2004) A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays, *Geophysical Prospecting*, **52**, 379-398.
- Dahlin, T., Bernstone, C & Loke M. H. (2002). A 3D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken in Sweden, *Geophysics*, 67(6), 1692-1700.
- Dahlin T., Bjelm L. & Svensson C. (1999) Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **32**(2), 163-173.
- Dahlin T. (1993) *On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications*, Dr.Thesis, ISRN LUTVDG/TVDG--1007--SE, ISBN 91-628-1032-4, Lund University, 187p.
- Danielsen B.E. & Dahlin T. (2009) Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation. *Engineering Geology*, **107**, 118–129.
- Fathi M. A., Loke M.H., Nawawi M. & Abdullah K. (2019) Improving the Resolution of 3-D Resistivity Surveys Along the Perimeter of a Confined Area Using Optimized Arrays, *Pure and Applied Geophysics*, 176, 1701-1715.
- Fathi M. A., Loke M.H., Nawawi M. & Abdullah K. (2018) Assessing the reliability and performance of optimized and conventional resistivity arrays for shallow subsurface investigations, *Journal of Applied Geophysics*, 155, 237-245.
- Gazoty A., Fiandaca G., Pedersen J., Auken E., Christiansen A. V. & Pedersen J. K. (2012) Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site, *Hydrology and Earth Systems Science*, 16, 1793–1804.
- Harro D.B. & Kiflu H. (2018) Imaging of Deep Sinkholes Using the Multi-electrode Resistivity Implant Technique (MERIT) Case Studies in Florida, in *Procs. National Cave and Karst Research Institute*

Symposium 7, Ed: I.D. Sasowsky, M.J. Byle & L. Land, April 2-6 2018, Shepherdstown, West Virginia, pp 341-345.

Johansson S., Lindskog A., Fiandaca G. & Dahlin T. (2020) Spectral Induced Polarization of limestones: time domain field data, frequency domain laboratory data and physicochemical rock properties. *Geophysical Journal International*, **220**, 928–950.

Johansson S. (2016) *From microstructure to subsurface characterization - Spectral information from field scale time domain induced polarization*, Licentiatavhandling, Teknisk geologi, Lunds universitet, ISBN 978-91-7623-673-4, 97s.

Jonsson P., Johansson L., Johansson S., Olsson P.-I. & Dahlin T. (2018) *Tredimensionell bergundersökning med geoelektriska och geologiska metoder*, BeFo-rapport nr 185.

Loke M.H., Wilkinson P.B., Chambers J.E., Uhlemann S.S. & Sorensen J.P.R. (2015a) Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with a large number of electrodes, *Journal of Applied Geophysics*, **112**, 136–146.

Loke M.H., Kiflu H., Wilkinson P.B., Harro D. & Kruse S. (2015b) Optimized arrays for 2D resistivity surveys with combined surface and buried arrays, *Near Surface Geophysics*, 2015, **13**, 505-517.

Loke M.H., Wilkinson P.B., Uhlemann S.S., Chambers J.E. & Oxby L. (2014a) Computation of optimized arrays for 3-D electrical imaging surveys, *Geophysical Journal International*, **199**, 1751-1764.

Loke M.H., Wilkinson P.B., Chambers J.E. & Strutt M. (2014b) Optimized arrays for 2D cross-borehole electrical tomography surveys, *Geophysical Prospecting*, 2014, **62**, 172–189.

Loke M.H., Wilkinson P.B. & Chambers J.E. (2010) Fast computation of optimized electrode arrays for 2D resistivity surveys, *Computers & Geosciences*, 36, 1414-1426.

Madsen L.M., Fiandaca G., Christiansen A.V. & Auken E. (2018): Resolution of well-known resistivity equivalences by inclusion of time-domain induced polarization data. *Geophysics*, **83**, E47-E54.

Nelson P.P. (2019) Underground construction, geology and geotechnical risk, in *Procs. Bergdagarna 2019*, Stockholm 19-20 mars 2019, 14p.

Olsson P.-I., Fiandaca G., Kumar Maurya P., Dahlin T. & Auken E. (2019) Effect of current pulse duration and recovering unbiased, quantitative induced polarization models from time-domain full-response and integral chargeability data, *Geophysical Journal International*, **218**, 1739–1747.

Olsson P.-I., Fiandaca G., Juul Larsen J., Dahlin T. & Auken E. (2016) Doubling the spectrum of time-domain induced polarization by harmonic de-noising, drift correction, spike removal, tapered gating and data uncertainty estimation, *Geophysical Journal International*, 207(2): 774-784.

Olsson P.-I., Dahlin T., Fiandaca G. and Auken E. (2015) Measuring time domain spectral induced polarization in the on-time – decreasing the acquisition time and increasing the signal levels, *Journal of Applied Geophysics*, 123, 316-321.

Rejkjær S., Belfrage D., Dahlin T. & Tsourlos P. (2018) A Simplified Approach to Array Optimization for the DC Resistivity and Induced Polarization Method. in *Procs. 24th European Meeting on Environmental and Engineering Geophysics*, 9-13 September 2017, Porto, Portugal, 5p.

Reynolds J.M. (2011) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd Edition, Wiley, ISBN: 978-0-471-48535-3, 710p.

Roslin M., Vesely J. & Salmonson P. (2018) Passage under Lövvästvägen at Bypass Stockholm – from design to realization. in *Procs. Bergdagarna 2018*, Stockholm 20-21 mars 2018, s. 59-68.

Rossi M., Dahlin T, Olsson P.I. & Günther T. (2018) Data acquisition, processing and filtering for reliable 3D resistivity and time-domain induced polarization tomography in an urban area: field example of Vinsta, Stockholm, Special issue on urban geophysics, *Near Surface Geophysics*, **16**, 220-229.

Rønning J.S., Ganerød G.V., Dalsegg E. and Reiser F. (2014) Resistivity mapping as a tool or identification and characterisation of weakness zones in bedrock - definition and testing of an interpretational model. *Bull. Eng. Geol. Environment*, **73**, 1225-1244.

Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Morelli G., Fischanger F. & Gualerzi D. (2011) Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils, *Engineering Geology*, **119**, 18–30.

Seidel K. & Lange, G. (2007) Direct Current Resistivity Methods, in Eds. Knödel, K., Lange, G. & Voigt, H.J., *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, 205 – 238.

Tejero-Andrade A., Cifuentes G., Chavez R.E., Lopez-Gonzalez A.E. & Delgado-Solorzano C. (2015) L- and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones, *Near Surface Geophysics*, **2015**, **13**, 355-367.

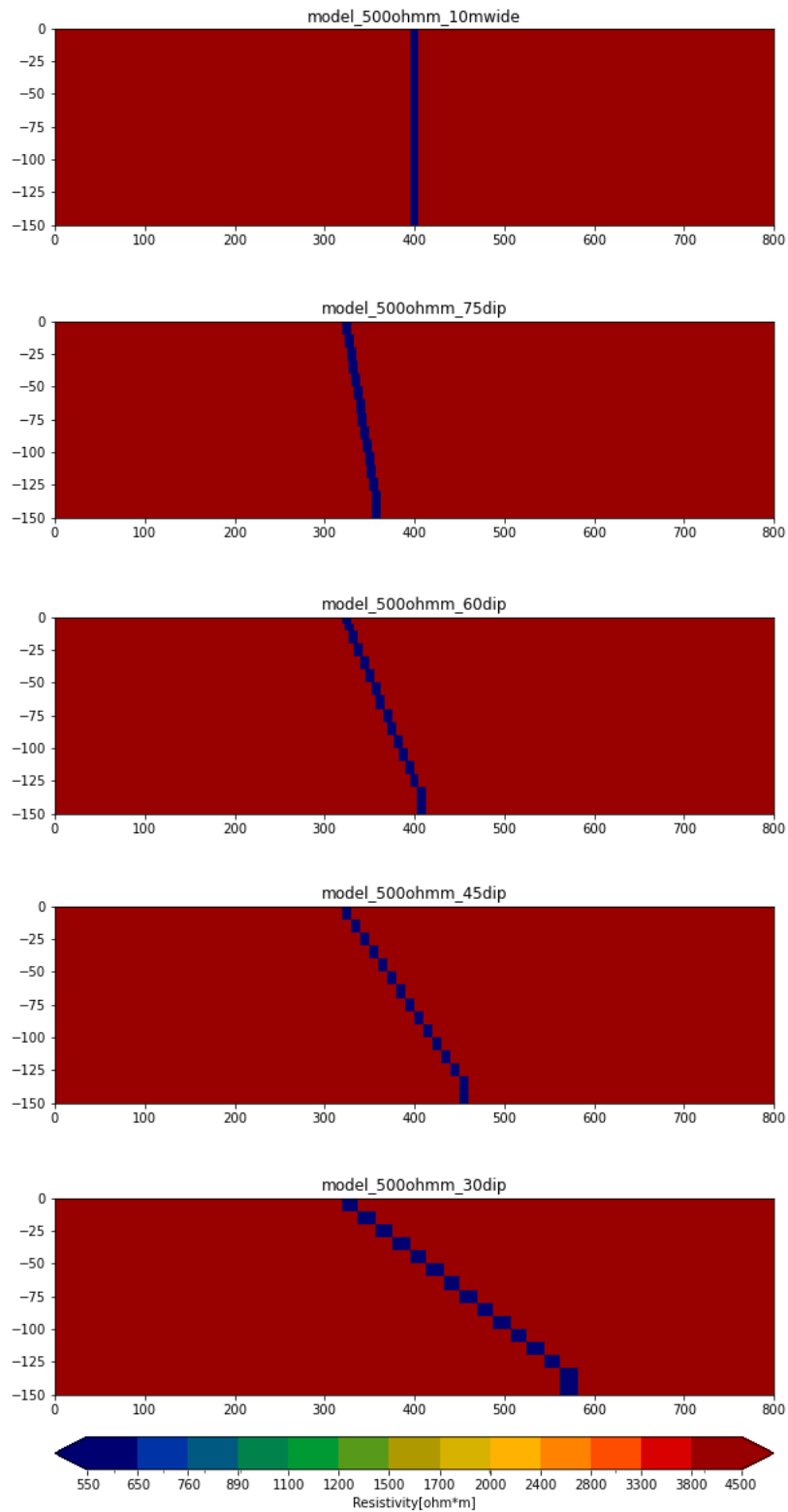
Zhou B., Bouzidi Y., Ullah S. & Asim M. (2020) A full-range gradient survey for 2D electrical resistivity tomography, *Near Surface Geophysics*, **18**, 609–626.

Uhlemann S., Wilkinson P.B., Maurer H., Wagner F.M., Johnson T.C. & Chambers J.E. (2018) Optimized survey design for electrical resistivity tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement, *Geophysical Journal International*, **214**, 108-121.

Wilkinson P.B., Loke M.H., Meldrum P.I., Chambers J.E., Kuras O., Gunn D.A & Ogilvy R.D. (2012) Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography, *Geophysical Journal International*, **189**, 428–440.

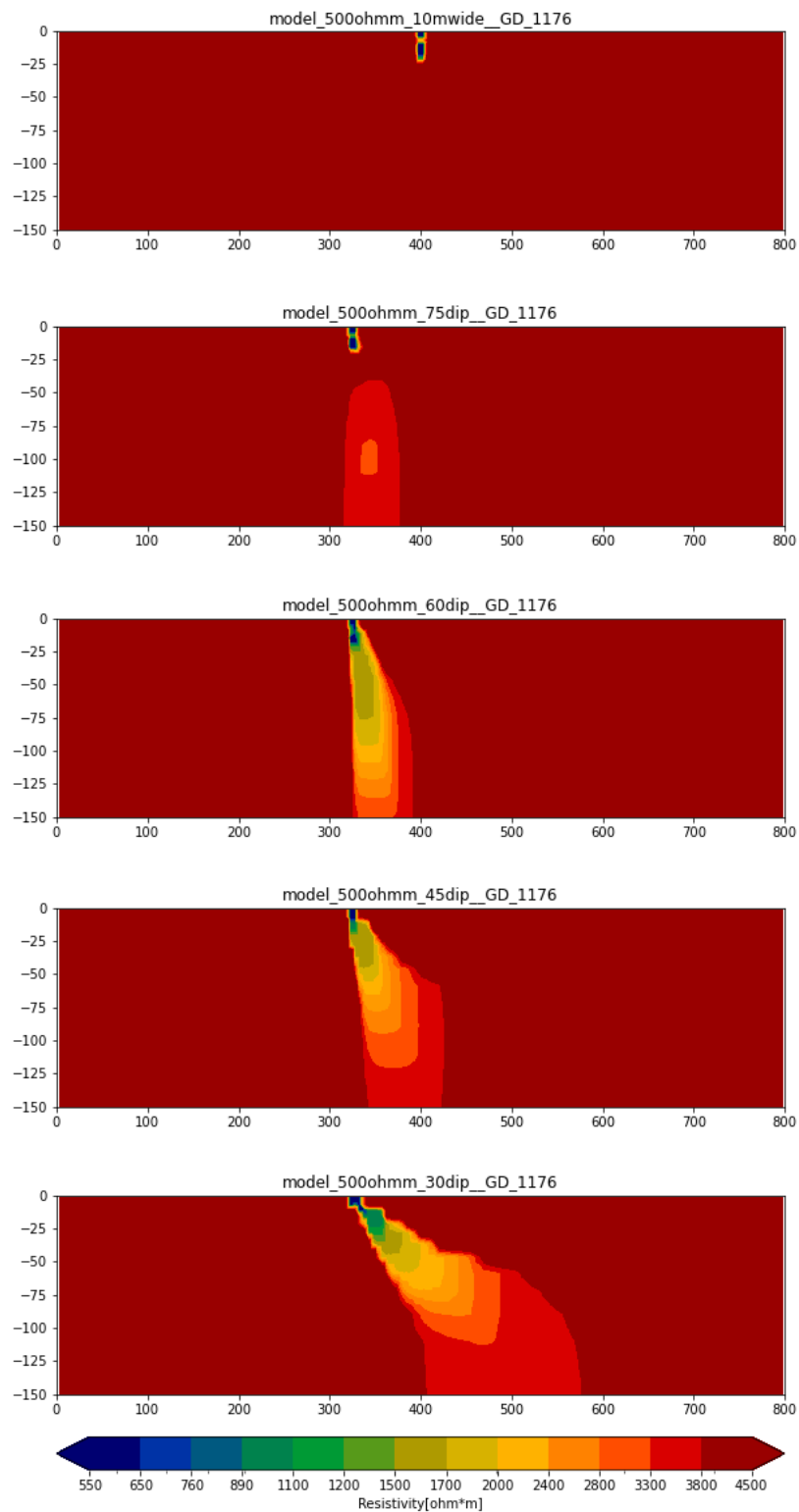
Bilaga 1. Exempel på resultat från numeriska simuleringar av olika elektrodkonfigurationer över geologiska strukturer

Simulerade modeller

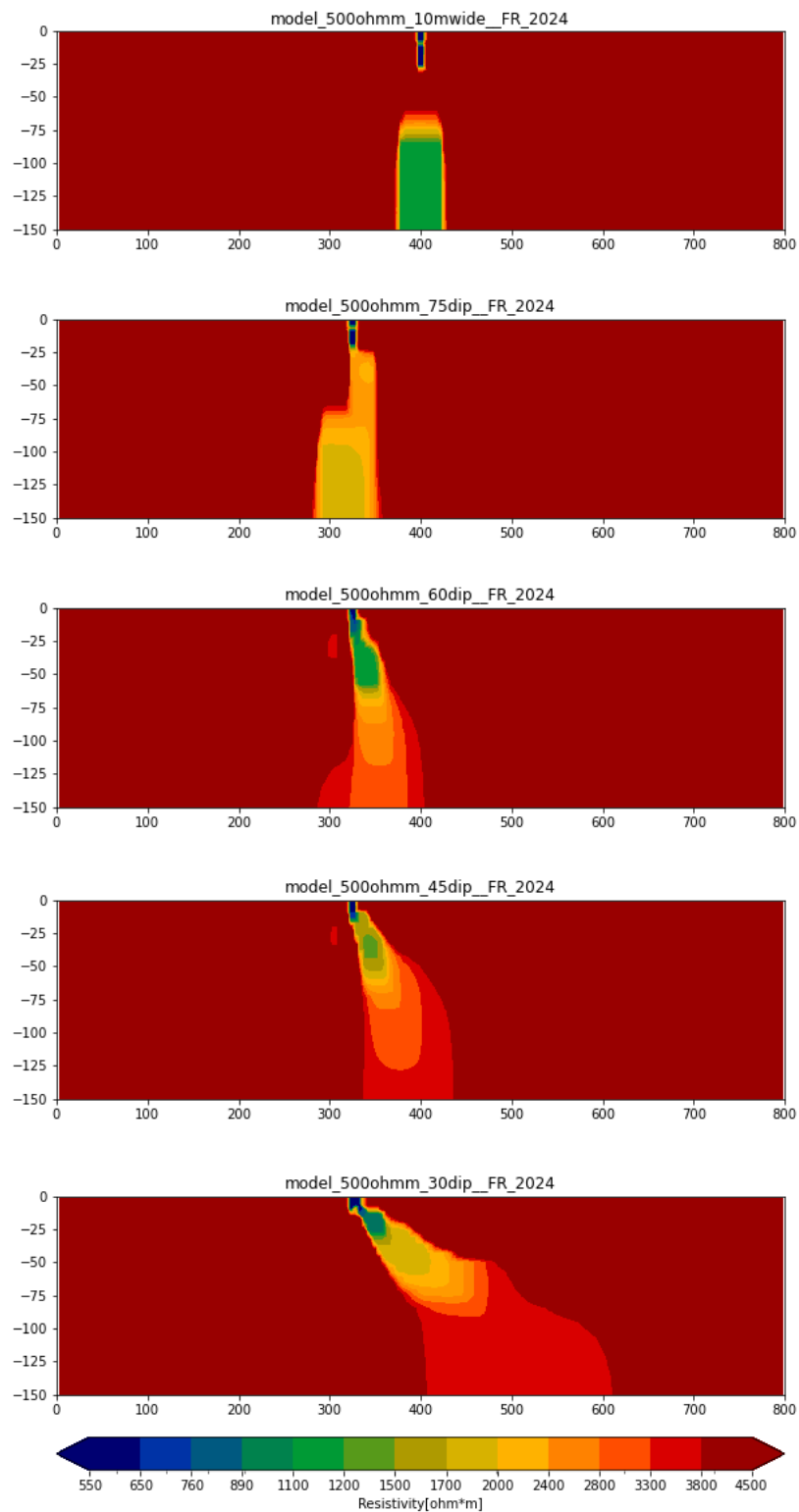


333

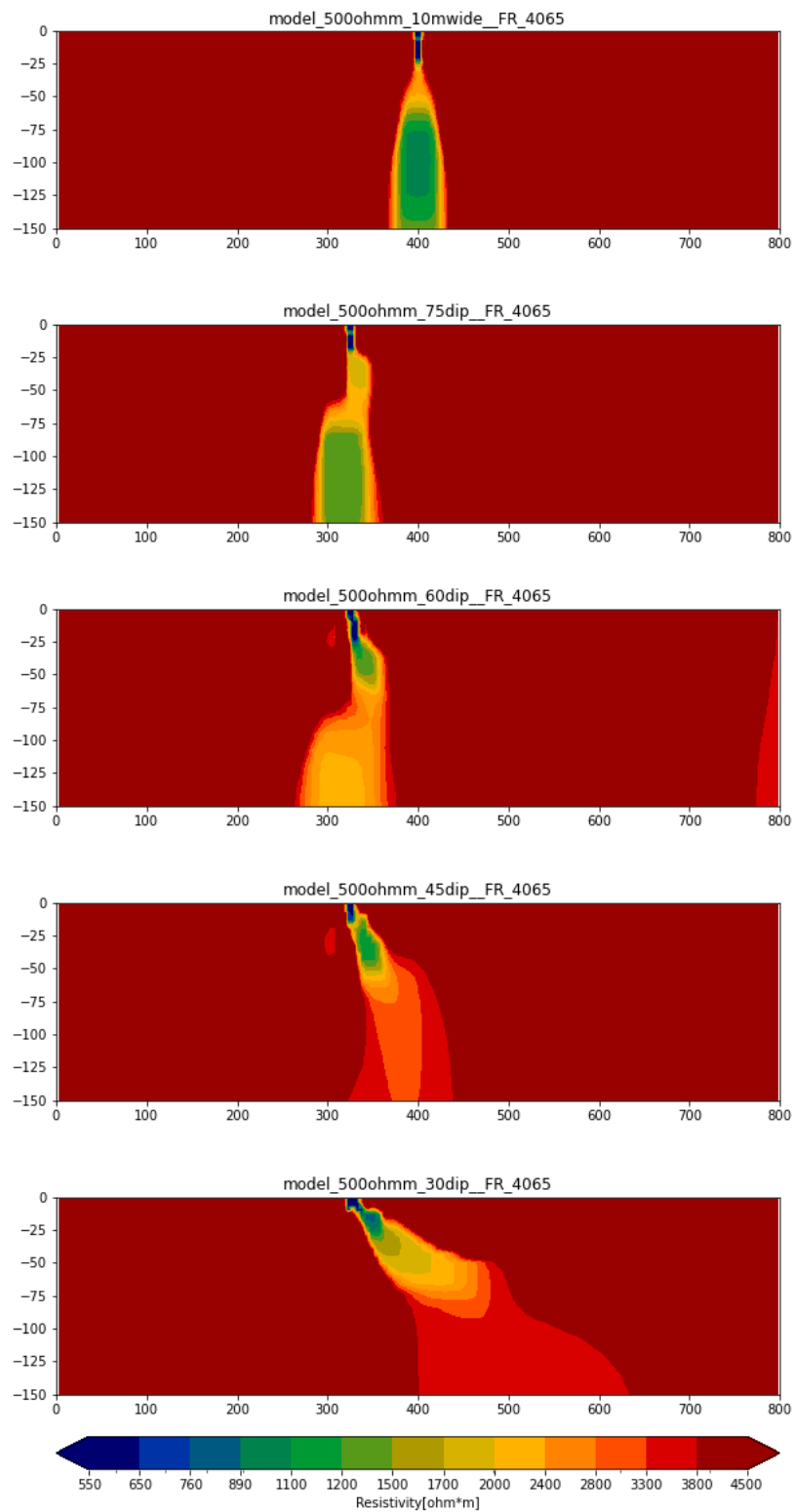
Resistivitet - Multiple gradient array 1176 data



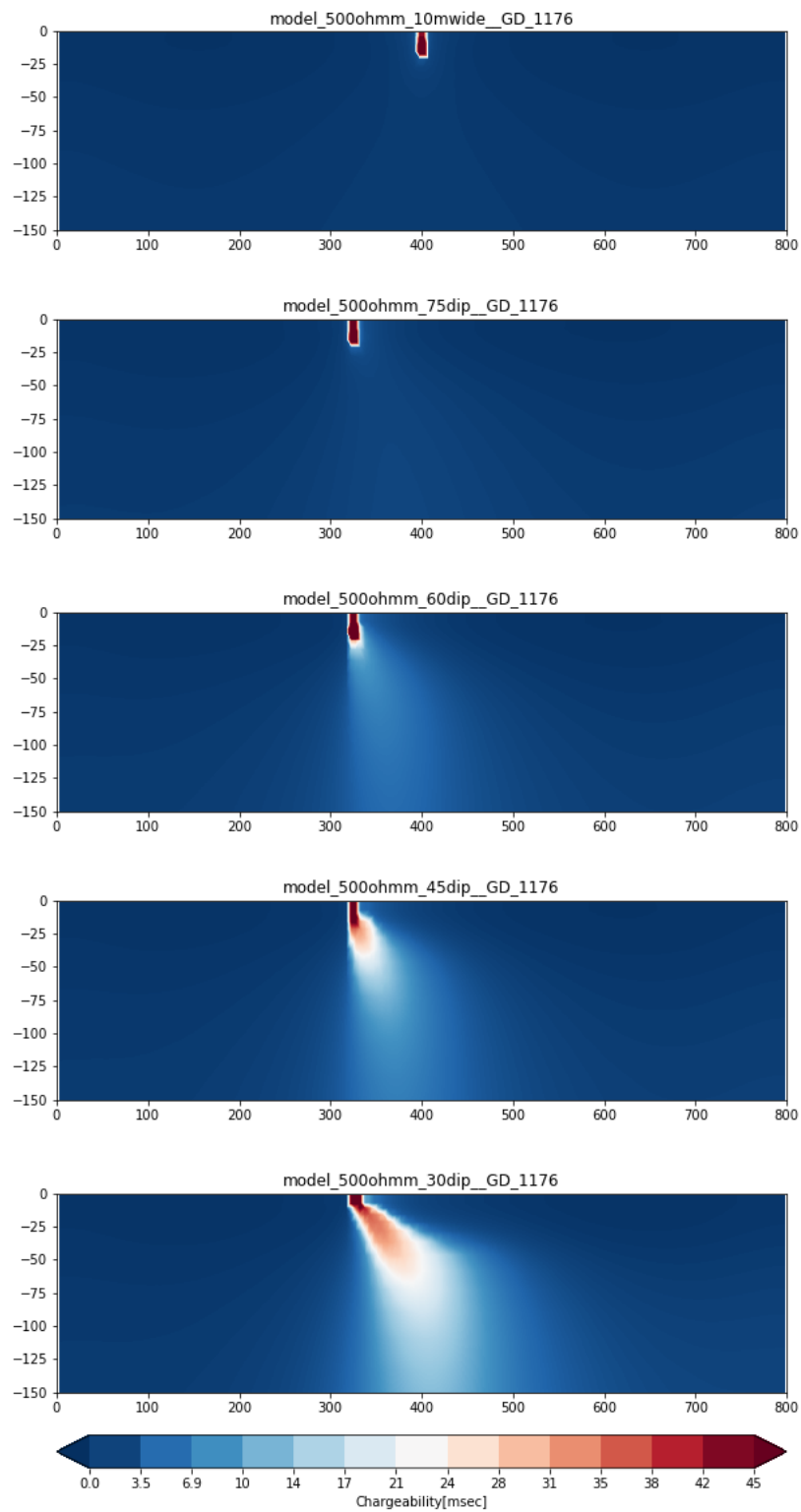
Resistivitet - Full-range gradient array 2023 data



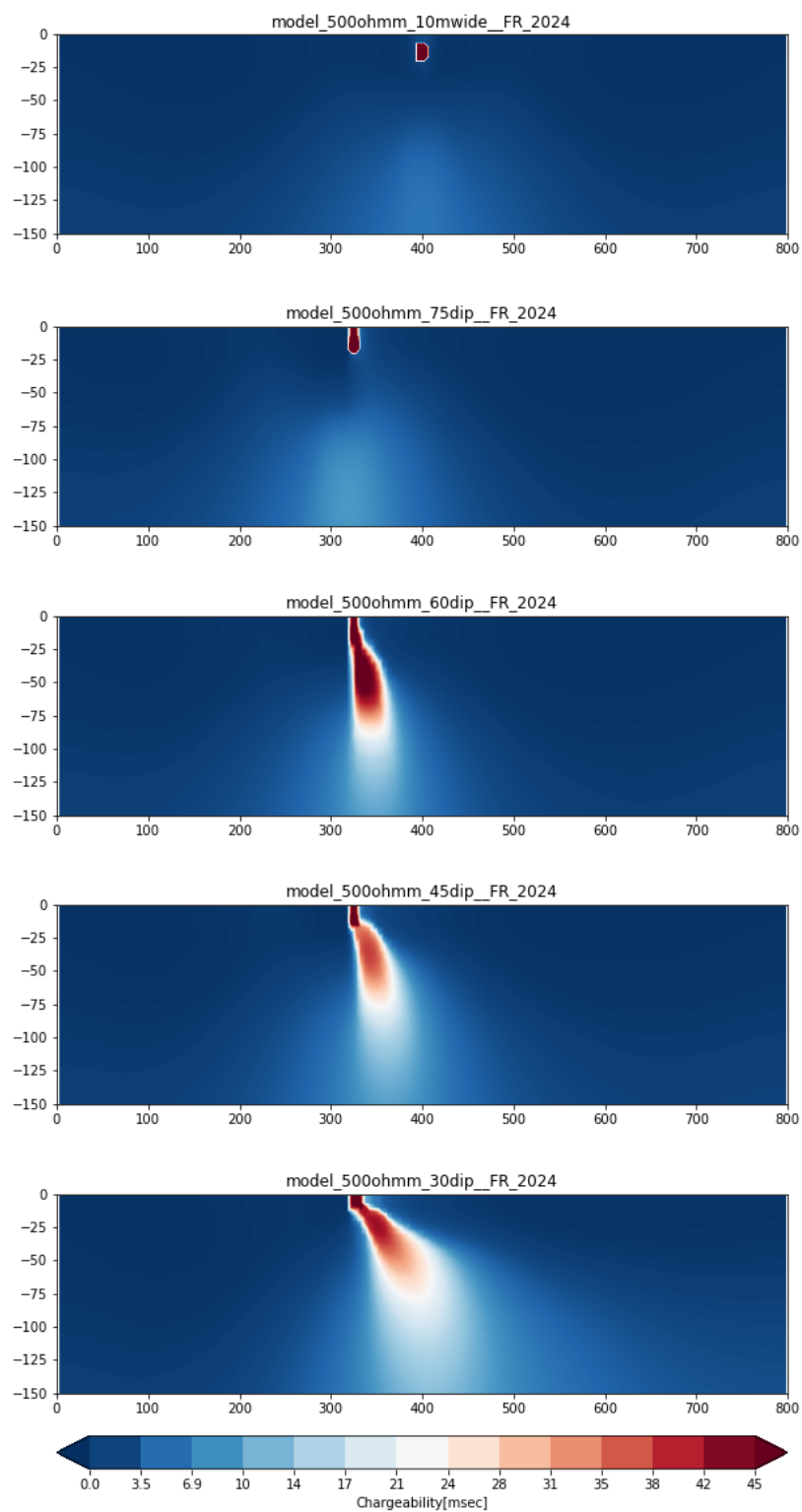
Resistivitet - Full-range gradient array 4065 data



IP-effekt - Multiple gradient array 1176 data



IP-effekt - Full-range gradient array 2023 data



IP-effekt - Full-range gradient array 4065 data

