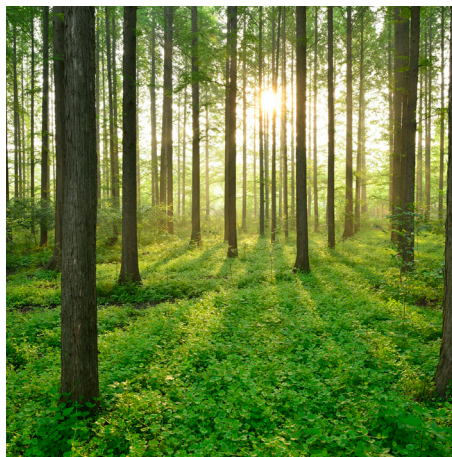
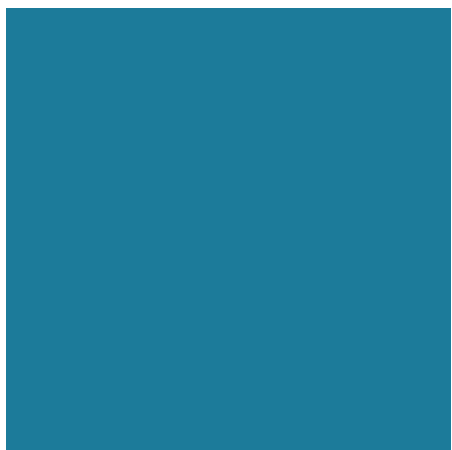


# GEOELEKTRISK TOMOGRAFI FÖR DAMMÖVERVAKNING

RAPPORT 2025:1139



SVENSKT CENTRUM  
FÖR HÅLLBAR VATTENKRAFT



SVENSKT CENTRUM  
FÖR HÅLLBAR VATTENKRAFT

# **Geoelektrisk tomografi för dammövervakning**

## **Anpassning av övervakning med DCIP tomografi för förvaltning av fyllningsdammar**

**TORLEIF DAHLIN, PER HEDBLOM**

ISBN 978-91-89918-41-2 | © Energiforsk november 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



## Förord

**Inre erosion utgör, tillsammans med överströmning, en av de främsta orsakerna till stabilitetsproblem i fyllningsdammar och är ofta svår att upptäcka innan allvarliga skador uppstår. För att minska risken för att inre erosion och onormala läckageflöden förblir oupptäckta krävs utveckling av nya metoder för dammövervakning. Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) har identifierats som en potentiell teknik för dammövervakning men ytterligare forskning och metodutveckling är nödvändig innan tekniken kan implementeras i praktisk tillämpning.**

Projektet har genomförts inom Svenskt centrum för hållbar vattenkraft (SVC) som finansieras av Energimyndigheten, Svenska kraftnät samt vattenkraftbranschen. Arbetet har utförts vid avdelningen för Teknisk geologi, LTH / Lunds universitet, där arbetet har utförts av Torleif Dahlin, Per Hedblom och Aristeidis Nivorlis.

Industrigruppen som har följt projektet och gett värdefulla synpunkter och kommentarer bestod av Christian Bernstone och Saima Raiz Vattenfall, Carl-Oscar Nilsson Uniper, Per Elvnejd Statkraft och Lisa Forsgren, Skellefteälvens Vattenregleringsföretag, Pontus Sjödahl HydroResearch AB och Jasmina Toromanovic Geoteknik, LTU. Ett stort tack riktas även till dammägarna och deras personal för projektgruppens tillgång till anläggningarna samt stöd i samband med de mätförsök som har genomförts inom ramen för projektet.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom Svenskt centrum för hållbar vattenkraft. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

Övervakning med elektrisk resistivitetstomografi (ERT) kan vara ett kraftfullt verktyg för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar. Resultaten av mätning vid ett enstaka tillfälle kan dock vara missvisande på grund av årstidsvariationer i resistivitet som till en betydande del orsakas av flödes-inducerade temperaturvariationer. Utvärdering av tidsserier är mera kraftfullt eftersom man kan utnyttja variationerna som naturligt spårämne. Det ger också möjlighet att upptäcka förändringar i resistiviteten som orsakas av förändrade materialegenskaper som följd av inre erosion. Den komplexa geometriska uppbyggnaden av zonerade fyllningsdammar medför att det ofta kan vara nödvändigt med 3D-undersökning, på grund av att 2D-teknik som är dominerande i praktisk tillämpning riskerar att ge otillräcklig upplösning och missvisande resultat.

Mätförsök som har utförts på existerande elektrodinstallationer på fyra olika fyllningsdammar visar att det är viktigt att installationerna av elektroder och elektrodkablar görs på rätt sätt för att säkerställa stabila långtidsegenskaper. Elektroder i form av plattor av rostfritt syrafast stål som grävs ner i den över delen av tät kärnan ger låga elektrodkontaktmotstånd och bra datakvalitet även 15-23 år efter att de installerades. De så kallade icke-polariserbara (Cu-CuSO<sub>4</sub>) elektroder som installerades samtidigt uppvisar emellertid mycket höga kontaktmotstånd och de ger problem med datakvaliteten. Vidare är det av största vikt att elektrod-kablarna är dimensionerade för de mekaniska påfrestningar, vattenmättade förhållanden samt de elektriska spänningar och strömmar som de kan komma att utsättas för. Detta har varit fallet för tre av testlokalerna men inte för den fjärde vilket lett till allvarliga datakvalitetsproblem.

Det behöver utvecklas metodik för att installera elektroder på olika djup i fyllningsdammar för att förbättra upplösningen mot djupet på högre dammar. Detta skulle till exempel kunna ske genom installation i finfiltren med hjälp av gradad borrhning från krönet eller med styrd borrhning.

Mätsystemet, inklusive mätinstrument / ingångssteg, strömsändare, elektrod-omkopplare (reläväxel), transientskydd (åskskydd), styrprogramvara och användargränssnitt, behöver vara anpassat för tillämpningen. Det behöver också vara flexibelt och skalbart så att det kan anpassas efter förutsättningarna för fyllningsdammen som ska övervakas, eftersom de varierar från en anläggning till en annan. Det finns inga sådana system på marknaden, men ett systemkoncept och prototyputrustning presenteras här. De olika delarna av prototypsystemet har testats och verifierats var för sig, och delvis tillsammans, men det återstår en del integrering och anpassning för att säkerställa full funktionalitet.

Det behövs strömlinjeformade och automatiserade rutiner för datahantering, samt bearbetning, visualisering och tolkning av data för att rutinmässig användning av metoden för att långtidsövervakning av fyllningsdammar skall komma till stånd. Inom ramen för detta projekt har prototypprogramvara utvecklats som

automatiserat hanterar hela dataflödet från daglig mätning över samtliga steg fram till visualiserade modeller. Programvaran har använts för övervakningsmätning på två fyllningsdammar och i samband med det har den gradvis förbättrats och stabiliserats. Den kommer att göras tillgänglig med öppen källkod i samband med att en artikel som beskriver den publiceras.

ERT kombinerat med mätning av inducerad polarisation (IP) har potential att förbättra upplösning och detekteringsförmåga men kräver ytterligare FoU innan rutinmässig praktisk tillämpning. IP ställer också betydligt högre krav på instrumentering och databearbetning då signalnivåerna är lägre och störningskänsligheten större.

## Nyckelord

Fyllningsdammar, tillståndskontroll, övervakning, inre erosion, resistivitet, ERT, elektrisk resistivitetstomografi, inducerad polarisation, DCIP, Direct Current resistivity and Induced Polarisation

## Summary

Electrical resistivity tomography (ERT) monitoring can be a powerful tool for condition monitoring and surveillance of embankment dams. However, the results of a single measurement can be misleading due to seasonal variations in resistivity, which are largely caused by flow-induced temperature variations. Evaluation of time series data from monitoring is more powerful because the variations can be used as a natural tracer. It also provides the opportunity to detect changes in resistivity caused by changes in material properties as a result of internal erosion. The complex geometric structure of zoned embankment dams means that 3D investigation may often be necessary, because 2D technology, which is dominant in practical application, risks giving insufficient resolution and misleading results.

Measurement experiments carried out on existing electrode installations on four different embankment dams show that it is important that the installations of electrodes and electrode cables are done correctly to ensure stable long-term properties. Electrodes in the form of plates of stainless steel buried in the upper part of the dam core provide low electrode contact resistances and good data quality even 15-23 years after they were installed. However, the so-called non-polarizable (Cu-CuSO<sub>4</sub>) electrodes that were installed at the same time have very high contact resistances and they cause problems with data quality. Furthermore, it is of utmost importance that the electrode cables are dimensioned for the mechanical stresses, water-saturated conditions and the electrical voltages and currents to which they may be exposed. This has been the case for three of the test sites but not for the fourth, which has led to serious data quality problems for the latter.

A methodology needs to be developed for installing electrodes at different depth levels in embankment dams to improve the resolution against depth in higher dams. This could, for example, be done by installing electrodes in the fine filters using graded drilling from the crest or with directional drilling.

The measurement system, including measuring instrument / input section, current transmitter, electrode selector (relay switch), transient protection (lightning protection), control software and user interface, needs to be adapted to the application. It also needs to be flexible and scalable so that it can be adapted to the conditions of the embankment dam to be monitored, as they vary from one facility to another. There are no such systems on the market, but a system concept and prototype equipment are presented here. The different parts of the prototype system have been tested and verified separately, and partly together, but some integration and adaptation remain to ensure full functionality.

Streamlined and automated routines for data management, as well as processing, visualization and interpretation of data are needed to enable routine use of the method for long-term monitoring of embankment dams. Within the framework of this project, prototype software has been developed that automatically handles the entire data flow from daily measurement across all stages up to visualised models.

The software has been used for monitoring measurements on two embankment dams and has been gradually improved and stabilised. It will be made available as open source when a scientific paper describing it is published.

ERT combined with induced polarisation (IP) measurement has the potential to improve resolution and detection capability but requires further R&D before routine practical application. IP also places significantly higher demands on instrumentation and data processing as the signal levels are lower and the sensitivity to interference is greater.

# Innehåll

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>                                                          | <b>12</b> |
| <b>2</b> | <b>Syfte, mål och avgränsningar</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>3</b> | <b>Metodbeskrivning</b>                                                   | <b>16</b> |
| 3.1      | Elektriska egenskaper i olika material                                    | 16        |
| 3.1.1    | Resistivitet i olika geomaterial                                          | 16        |
| 3.1.2    | Resistivitet i svenska fyllningsdammar                                    | 18        |
| 3.1.3    | IP-effekter i olika material                                              | 18        |
| 3.2      | Elektrisk resistivitetstomografi                                          | 19        |
| 3.2.1    | Mätprincip                                                                | 19        |
| 3.2.2    | Elektrodkonfigurationer                                                   | 20        |
| 3.2.3    | Kvalitetskontroll av data                                                 | 22        |
| 3.2.4    | Modelltolkning via inversion                                              | 23        |
| 3.2.5    | ERT och zonerade fyllningsdammar                                          | 25        |
| 3.3      | Inducerad polarisation (IP)                                               | 26        |
| 3.3.1    | Mätprincip                                                                | 27        |
| 3.3.2    | Kvalitetskontroll av data                                                 | 28        |
| 3.3.3    | Modelltolkning via inversion                                              | 28        |
| 3.4      | Övervakning                                                               | 28        |
| <b>4</b> | <b>Mättekniska försök på dammar med befintliga elektrodinstallationer</b> | <b>30</b> |
| 4.1      | Metodbeskrivning                                                          | 30        |
| 4.1.1    | Aktiva mätningar                                                          | 30        |
| 4.1.2    | Passiva mätningar                                                         | 31        |
| 4.2      | Beskrivning av testlokalerna                                              | 31        |
| 4.2.1    | Elektrodinstallationer                                                    | 31        |
| 4.2.2    | Damm 1                                                                    | 32        |
| 4.2.3    | Damm 2                                                                    | 33        |
| 4.2.4    | Damm 3                                                                    | 35        |
| 4.2.5    | Damm 4                                                                    | 35        |
| 4.3      | Resultat och diskussion                                                   | 37        |
| 4.3.1    | Elektrodkontaktmotstånd                                                   | 37        |
| 4.3.2    | Reciprokfelanalys                                                         | 40        |
| 4.3.3    | Invers numerisk modellering                                               | 42        |
| 4.3.4    | Signalstörningar                                                          | 42        |
| 4.4      | Diskussion                                                                | 44        |
| <b>5</b> | <b>Metodik, instrumentering och programvara för långtidsövervakning</b>   | <b>45</b> |
| 5.1      | Elektrodinstallation                                                      | 45        |
| 5.2      | Instrumentering                                                           | 47        |
| 5.2.1    | Allmänt                                                                   | 47        |
| 5.2.2    | Egenskaper och krav på system för ERT / DCIP-tomografi                    | 49        |

|                  |                                                            |           |
|------------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.3            | Prototypsystem för ERT / DCIP-tomografi                    | 52        |
| 5.2.4            | Sensor för vattenresistivitet och temperatur               | 57        |
| 5.3              | Programvara                                                | 60        |
| 5.3.1            | Allmänt                                                    | 60        |
| 5.3.2            | Instrumentprogramvara                                      | 60        |
| 5.3.3            | Programvarusvit för datainsamling och databearbetning      | 61        |
| 5.4              | Mätförsök med prototypinstrument                           | 68        |
| 5.4.1            | Mätförsök i begränsad skala                                | 69        |
| 5.4.2            | Resultat                                                   | 69        |
| 5.5              | Diskussion                                                 | 72        |
| <b>6</b>         | <b>Slutsatser och rekommendationer</b>                     | <b>74</b> |
| 6.1              | Slutsatser                                                 | 74        |
| 6.2              | Rekommendationer                                           | 76        |
| <b>7</b>         | <b>Referenslista</b>                                       | <b>77</b> |
| <b>Bilaga A.</b> | <b>Specifikation för upphandling av elektrod kabel</b>     | <b>79</b> |
| <b>Bilaga B.</b> | <b>Databasstruktur för prototypinstrument för ERT/DCIP</b> | <b>80</b> |

# 1 Inledning

De svenska vattenkraftsdammarna är mestadels 50-100 år gamla, med en medianålder på drygt 60 år. Även om dammarna är dimensionerade med säkerhetsmarginaler kan det med tiden uppstå skador, vilket gör att det finns behov av tillståndskontroll och övervakning. Inre erosion är jämte överströmning de vanligaste orsakerna till stabilitetsproblem i fyllningsdammar. Inre erosion pågår i det inre av dammen och är ofta svårt eller omöjligt att upptäcka innan det gått så långt att det uppstår sjunkhål på dammen, vilket i värsta fall kan leda till dammbrott med katastrofala följder. Det finns därför behov av nya metoder för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar för att minimera risken för att inre erosion och onormala läckageflöden förblir oupptäckta. Bland de nya metoder som har framkommit kan nämnas temperaturmätningar och olika geofysiska mätningar, speciellt resistivitet (ERT), inducerad polarisation (IP) och strömningspotential (SP).

Temperaturmätning är numera etablerat för övervakning av fyllningsdammar, och med hjälp av optisk fiber kan kostnadseffektiva installationer med hög rumslig upplösning åstadkommas. I befintliga dammar är det dock inte möjligt att installera sensorer i tåtkärnan, utan man är ofta begränsad till dammtån. Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) kan å andra sidan ge rumslig information från det inre av tåtkärnan om elektrodläggningen installeras i anslutning till denna. ERT har testats som övervakningsmetod i ett antal svenska dammar, med elektroder installerade i ovankant av tåtkärnan med goda resultat (t.ex. Sjö Dahl et al. 2009; Sjö Dahl et al. 2008; Johansson & Dahlin 1996).

För tillämpningen på fyllningsdammar vid vattenkraftverk finns det dock utmaningar som kräver fortsatt FoU. Den speciella geometriska uppbyggnaden för dammar, med smal tåtkärna med hög elektrisk ledningsförmåga i förhållande till omgivande material, kan leda till kraftiga förvrängningar av resultaten på grund av den tredimensionella strukturen (3D-effekter). Mätning av ERT längs ovankant av tåtkärnan fokuserar känsligheten till rätt del av dammen, men för utvärdering av mätdata måste man göra ett antagande om tvådimensionella (2D) strukturer tvärs dammens längsriktning. Det är en mycket dålig approximation av verkligheten vilket leder till kraftiga 3D-effekter (Cho et al. 2014; Sjö Dahl et al. 2006).

Det har gjorts försök att hantera 3D-effekter genom att korrigera för dessa. Fargier et al. (2014) presenterade ett nytt tillvägagångssätt för att kompensera skenbara resistivitetsvärden från de uppmätta data som samlats in från en damm för de externa 3D-effekterna, vilket gav bättre resultat när de tolkades med 2D-inversion. Bièvre et al. (2018) använde 3D-beräkning av geometriska faktorer för att förbättra tolkningen av 2D ERT-data som samlats in på en damm en 2D-inversionsmodell. Dessa tekniker för att kompensera för ytgeometrins 3D-karaktär skulle dock inte fungera för att hantera de 3D-effekter som orsakas av den inre zoneringen av typiska svenska fyllningsdammar, utan det kräver 3D-inversion som kan hantera de skarpa övergångarna i materialegenskaper mellan de olika zonerna i dammen.

Ett annat problem är att upplösningen avtar mot djupet, vilket är en allvarlig begränsning för höga dammar. För att skapa geometriskt och kvantitativt korrekta modeller krävs det att tolkningen av mätdata till modeller av dammens inre sker genom 3D-inversion (invers numerisk modelltolkning). Detta ställer i sin tur krav på ytterligare elektrodplaceringar för att man ska kunna generera data med bättre känslighet för egenskaperna på större djup i konstruktionen.

Utvecklingen av tolkningsalgoritmer och beräkningskraft har gjort det praktiskt möjligt att hantera 3D-modeller som beskriver dammarnas inre struktur med god upplösning (Norooz et al 2024). Teknikutveckling har också möjliggjort att mäta kombinerad resistivitets- och IP-tomografi med god kvalitet (DCIP = DC resistivity and time-domain Induced Polarisation) av god kvalitet på ett förhållandevis tids- och kostnadseffektivt sätt (Olsson et al. 2016). Maurya et al. (2018) visade kopplingar mellan DCIP och hydrauliska egenskaper, vilket öppnar för hydraulisk karaktärisering i 3D. Genom upprepade mätningar (4D, med tiden som dimension) kan flödesberoende förändringar i DCIP egenskaperna som kan kopplas till variationer i temperatur, jonhalter och materialegenskaper detekteras och analyseras. För att tillvarata de nya möjligheterna krävs dock att mätmetodik, installationer och instrumentering är utformade på rätt sätt, liksom hantering och bearbetning av mätdata.

En annan utmaning är signalstörningar som genereras av elkraftanläggningarna som normalt finns i nära anslutning till fyllningsdammarna. Olsson et al. (2016) har visat att olika typer av signalstörningar i DCIP data kan filtreras bort med en kombination av metoder, vilket medför ett lyft för kvaliteten och informationsinnehållet i data. Detta skulle vara tillämpbart för övervakning av fyllningsdammarna med viss anpassning.

Vattenfall investerade under 2019 i en ny försöksanläggning i form av en 4 meter hög och 20 meter lång fyllningsdamm i anslutning till Älvkarlebylaboratoriet (Bernstone et al. 2021). Denna anläggning har erbjudit ett unikt tillfälle till forskning och utveckling av metoder för tillståndskontroll och övervakning av en fyllningsdamm. Konceptet med elektrodutlägg ovanpå tåtkärnan längs dammkronet, i uppström- och nerströmsfiltret vid basen av tåtkärnan samt på en mellanliggande nivå har provats i testdammen i Älvkarleby. Omfattande numerisk 3D-modellering med finita elementmetoden (FEM) genomfördes för att simulera den typ av defekter som sedermera byggdes in i testdammen. Det har följts av 3D-inversion (invers numerisk modellering) av såväl simuleringsresultat som tidsserier av uppmätta data från testdammen.

DCIP mätningar har utförts automatiskt dagligen i testdammen i Älvkarleby. Elektroden i form av rostfria plåtar som installerades under byggandet av dammen har tack vare god elektrodkontakt och den lilla skalan givit utmärkt datakvalitet. Resultaten visar att de defekter som är allvarligast ur dammsäkerhetssynpunkt detekterades, medan de som inte gav upphov till avvikande läckageflöden samt hade liten kontrast i materialegenskaper var svåra att upptäcka

(Norooz et al. 2024). Resultaten visar också att det finns anledning till vidare optimering av tekniken.

Detta projekt har haft som ambition att utvärdera och belysa de viktigaste faktorerna för automatisering av hela mätdatakedjan för övervakning av fyllningsdammar med ERT / DCIP. Detta inkluderar att mätmetodik, installationer och instrumentering är utformade på ett ändamålsenligt sätt, och att hantering och bearbetning av mätdata görs effektivt och robust. Arbetet omfattar mätförsök på och utvärdering av befintliga elektrodinstallationer i fyra fyllningsdammar. Vidare utveckling av metodik, instrumentation och programvara ingått i arbetet. Rapporten inleds med en metodbeskrivning med fokus mot tillståndskontroll och övervakning av dammar.

## 2 Syfte, mål och avgränsningar

Det övergripande syftet med detta projekt har varit att utveckla teknik för övervakning av tät kärnan i fyllningsdammar så att inre erosion och onormala läckage kan upptäckas i tidiga skeden och åtgärdas på ett planerat sätt. Det specifika syftet är att optimera informationsinnehållet i mätdata för DCIP (Direct Current resistivity and time-domain Induced Polarisation) tomografi för att öka detekteringsförmågan och för att möjliggöra fördjupad analys och tolkning av data.

Projektets specifika mål är att anpassa och utveckla mätmetodik och mätteknik för geoelektrisk övervakning av fyllningsdammar med DCIP tomografi, med förbättrad datakvalitet och kvantifiering av denna. I detta ingår att:

1. Genomföra mättekniska försök på fyra existerande dammar med befintliga installationer av elektrodutlägg.
2. Analysera mätdata med avseende på signalstörningar (från elkraftsanläggning etc.) och datakvalitet.
3. Anpassa och automatisera datahanteringen inklusive datakvalitetskontroll, signalbehandling och filtrering av data, samt formathantering och arkivering, med sikte på tänkbar framtida integration med dammägarnas befintliga system för dammätningar.
4. Bygga en prototyp till ett kostnadseffektivt mätinstrument anpassat för fast installation vid dammanläggningar, inklusive referenssensorer (magasinsvattnets konduktivitet och temperatur).
5. Testa och utvärdera utvecklad prototyp i fält.

Anpassning och automatisering av datatolkning genom inversmodellering och visualisering av resultat är viktigt för en bredare tillämpning av tekniken, men ingår inte i detta projekt av tids- och resursskäl.

### 3 Metodbeskrivning

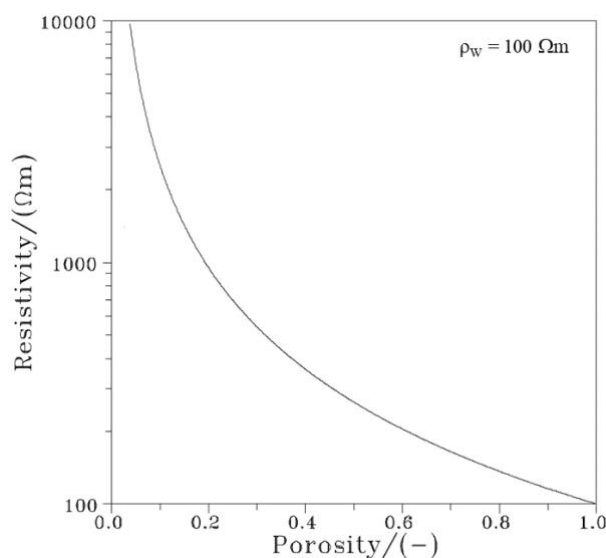
**Resistivitetsmätning bygger på systematisk mätning av elektrisk resistivitet (ofta benämnt enbart resistivitet, eller specifikt motstånd). Material med hög ledningsförmåga (elektrisk konduktivitet) har låg resistivitet medan isolatorer har hög resistivitet. Geoelektrisk undersökning kan även inkludera mätning av uppladdningsförmåga (så kallad inducerad polarisation, eller IP-effekt).**

Resistivitetsmätning är en av flera geofysiska metoder som kan användas till tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar, vilka Sjö Dahl et al. (2019) ger en översikt över medan Lin et al. (2018) har sammanställt publicerade tillämpningar. Nedan ges en kort introduktion till resistivitetsmetoden, en mera ingående metodbeskrivning ges av exempelvis Binley & Slater (2020), Reynolds (2011) och Seidel & Lange (2007). Vidare ger Dahlin et al. (2008) en utförligare vägledning för tillämpning av resistivitetsmetoden för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar.

#### 3.1 ELEKTRISKA EGENSKAPER I OLIKA MATERIAL

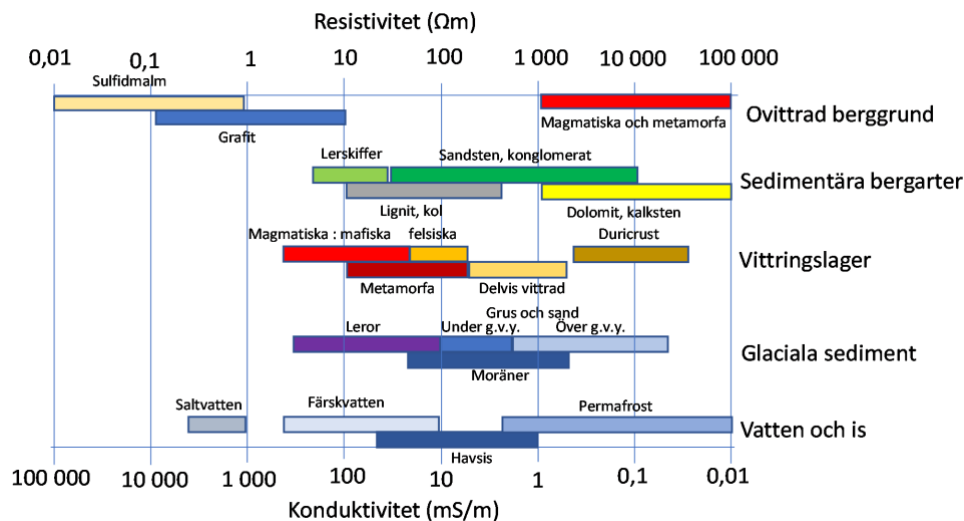
##### 3.1.1 Resistivitet i olika geomaterial

Resistiviteten i geomaterial styrs i huvudsak av vatten- och finmaterialinnehållet, då de vanligaste jord- och bergartsbildande mineralen i praktiken är isolatorer. Mängd vatten, joninnehåll i vattnet samt hur vattnet är fördelat i materialet är viktiga faktorer. Lerinnehåll har stor betydelse för resistiviteten, och lerhaltiga och organiska sediment har normalt låga resistiviteter. I vattenmättade i lerfria sediment är resistiviteten starkt beroende av porositeten (Figur 1).



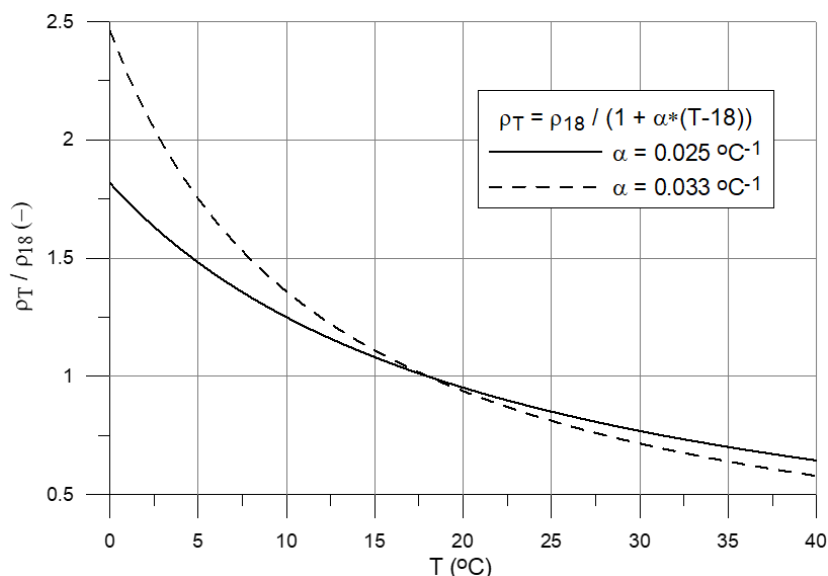
**Figur 1.** Resistiviteten som funktion av porositeten i lerfria sediment där vattnets resistivitet är 100 Ωm (modifierad från Dahlin 1993).

Exempel på typiska resistiviteter visas i Figur 2. 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 låga resistiviteter (få tiotal  $\Omega\text{m}$  eller lägre). Vidare har vissa malmmineral metallisk ledningsförmåga vilket kan ge mycket låg resistivitet. Grovkorniga sediment som sand och grus ligger oftast relativt högt (några hundra  $\Omega\text{m}$  vattenmättade), men om vatteninnehållet har hög salthalt kan de bli lågresistiva.



Figur 2. 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. Ofta tar man inte hänsyn till temperaturvariationer i anläggningstekniska tillämpningar, men i fallet med fyllningsdammar kan de ha signifikant påverkan och kan förstärka eller försvaga möjligheten att detektera avvikande zoner beroende på årstid.



Figur 3. Temperaturs betydelse för vattnets resistivitet, för temperaturkoefficient för resistiviteten  $\alpha = 0,025^\circ\text{C}^{-1}$  och  $\alpha = 0,033^\circ\text{C}^{-1}$  (Dahlin et al. 2008).

### 3.1.2 Resistivitet i svenska fyllningsdammar

Materialens elektriska egenskaper i fyllningsdammar varierar inom mycket breda intervall och är platsspecifika. Variationen mellan olika platser styrs till stor del av reservoarvattnets egenskaper. Med vattenresistiviteter på hundratal  $\Omega\text{m}$ , vilket är typiskt i norra Sverige (Sjödahl et al. 2009; Sjödahl et al. 2008), blir formationens bulkresistivitet för stenfyllnings- och filterzonerna hög och kan ligga på tusentals  $\Omega\text{m}$ . Täckärnor konstruerade av glacial morän, med en typisk finhalt på 15-40 % (Vattenfall 1988), kan ha en resistivitet på ett par till några tiotal  $\Omega\text{m}$ . För dessa är betydelsen av ytledning betydande. För skandinaviska förhållanden med högresistivt vatten är det troligt att glacialmoränen i tätkärnan är den bästa ledaren av alla material inklusive reservoarvattnet (Dahlin et al. 2008).

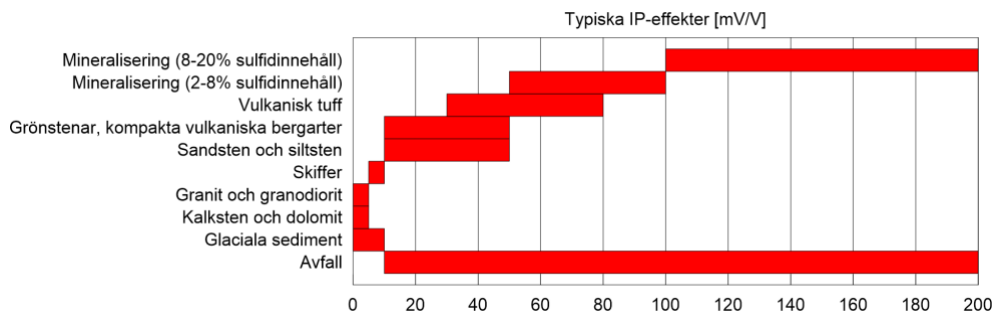
Inre erosion är anledningen till att svaga zoner kan framstå som avvikelser med hög resistivitet. När inre erosion inträffar tvättas finpartiklarna ut från tätkärnan. Denna process skulle kunna tänkas påverka resistiviteten på två sätt som motverkar varandra. För det första ökar porositeten i tätkärnan vilket om vattnet har bättre ledningsförmåga än tätkärnans bulkledningsförmåga skulle leda till en minskning av resistiviteten på grund av den högre vattenhalten. För det andra gör minskningen av finmaterialhalten att resistiviteten ökar. Det kan vara svårt att förutsäga effekten av inre erosion på tätkärnans elektriska egenskaper och den kan skilja sig från en damm till en annan beroende på materialegenskaper och vattenresistivitet. Laboratorietester på material med liknande sammansättning som typiska tätkärnor indikerar en signifikant ökning av resistiviteten då finhalten minskar (Dahlin et al. 2008). I typiska svenska fyllningsdammar med magasinsvatten som inte har låg resistivitet (hög ledningsförmåga) torde resistiviteten i tätkärnan öka till följd av inre erosion.

Den säsongsmässiga temperaturvariationen som i svenska kraftverksmagasin kan ligga i intervallet 0 – 20 °C gör att resistiviteten kan variera med upp till en faktor 2. Detta fortplantar sig in i dammkonstruktionen med olika hastighet beroende på läckageflödena. Vidare påverkar tjälning resistiviteten kraftigt. En enstaka resistivitetsundersökning kan därför förväntas ge olika resultat beroende på årstid.

### 3.1.3 IP-effekter i olika material

Markens elektriska uppladdningsförmåga kallas inducerad polarisation (IP). IP-effekterna kopplar till materialets inre struktur och kan i en del fall ge värdefull kompletterande information relaterad till materialegenskaperna och exempelvis kemiskt innehåll. Vissa typer av mineraliseringar ger upphov till stora IP-effekter och metoden är därför vanlig i vissa typer av malmprospektering.

Figur 4 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 4. Typiska IP-effekter (delvis baserat på Loke (2020)).

De vanligaste svenska jord- och bergarterna ger upphov till små eller måttliga IP-effekter, där dock sulfidinhåll 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 metallobjekt ger ofta upphov till förhöjda IP-effekter, hur stora beror på dessas egenskaper, yteläggning och geometri. Vidare påverkar vatteninnehållet i gränsytan till det antropogena materialet hur det kopplar till omgivningen. Nedgrävt avfall ger generellt upphov till förhöjda IP-effekter, hur mycket beror på dess sammansättning där 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 föroreningsspridning (Gazoty et al. 2012; Dahlin et al. 2010).

Det finns veterligen inga publicerade värden på IP-effekter i svenska fyllningsdammar, men de kan förväntas ligga i samma storleksordning som för glaciala sediment för tätäckarna och filter. Om stödfyllningen består av sprängsten från berg med mineraliseringar kan det tänkas att den kan ge förhöjda IP-effekter. En komplicerad faktor kan vara olika metallobjekt i dammen som kan ge upphov till så kraftiga IP-effekter att de maskerar mera subtila variationer i de geomaterial som dammen är uppbyggd av.

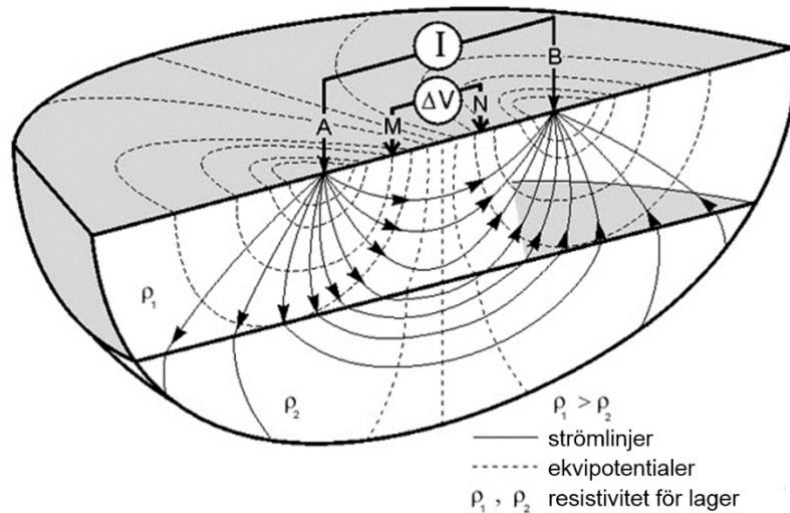
## 3.2 ELEKTRISK RESISTIVITETSTOMOGRAFI

ERT (Elektrisk ResistivitetsTomografi) bygger på systematisk mätning på en undersökningsvolym med olika elektrodkombinationer för att få information om den rumsliga fördelningen för dess elektriska egenskaper. Data används för att med hjälp av en form av avancerad passningsräkning, invers numerisk modelltolkning (inversion), skapa en modell av fördelningen av resistivitet i tvärsnitt eller volymer i marken. Oftast används finita elementmetoden (FEM) för modellberäkningarna i två (2D) eller tre dimensioner (3D) beroende på hur data samlats in.

### 3.2.1 Mätprincip

Resistiviteten (det specifika elektriska motståndet) kan mätas genom att skicka kontrollerade strömpulser mellan två elektroder samtidigt som spänningen mäts mellan ett annat elektrodpar (Figur 5). Elektrisk resistivitets tomografi (ERT) bygger på

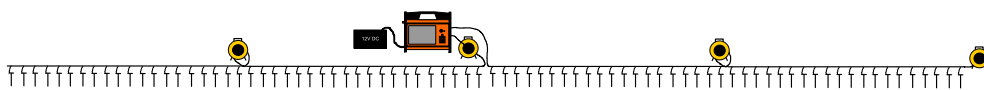
systematisk mätning med många olika elektrodkombinationer för att erhålla rumslig information.



Figur 5. Princip för elektrisk resistivitetsmätning illustrerad på en tvålagerföljd, där A och B är strömelektroder, medan M och N är potentialelektroder (modifierad från Seidel & Lange 2007).

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

Resistivitetsundersökningar utfördes förr som profilering eller sondering, men numera nästan uteslutande som ERT vilket kan ses som kombinerad profilering-sondering. Man använder typiskt flera tiotal elektroder som ansluts via multielektrodkablar (Figur 6), varefter instrumentet automatiskt mäter hundratals eller tusentals elektrodkombinationer enligt en fördefinierad mätsekvens.

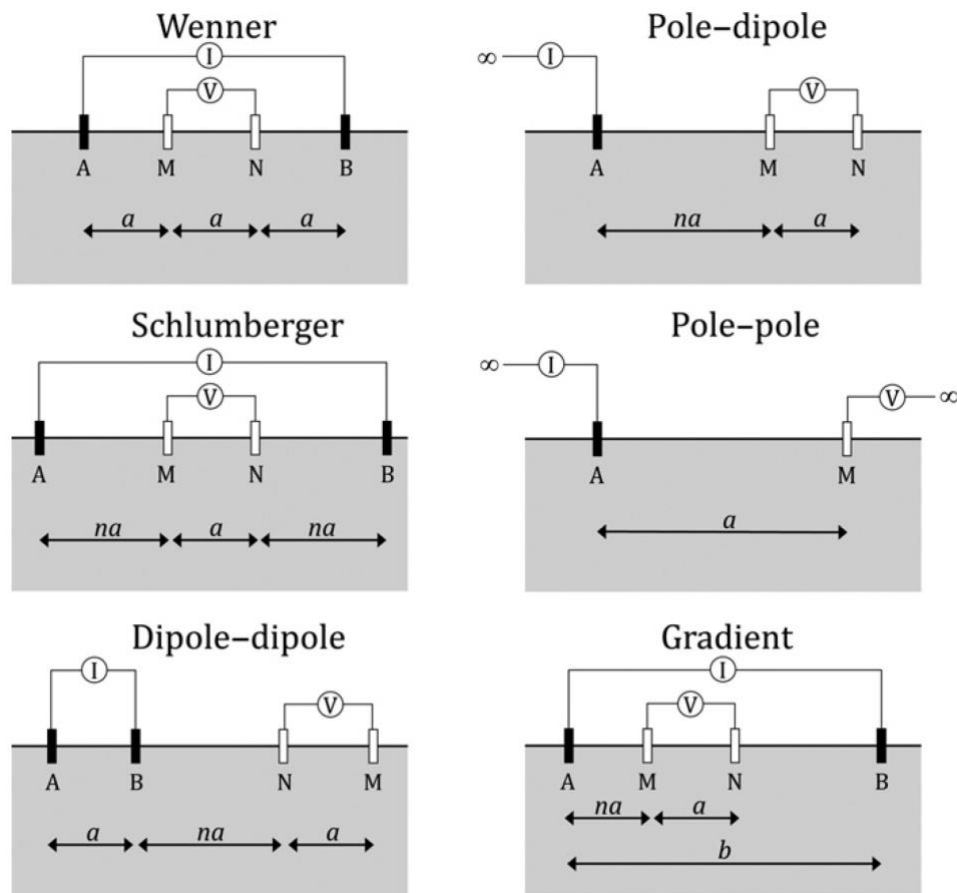


Figur 6. Skiss på typiskt mätutlägg för 2D ERT, i detta fall med 81 elektroder. Utläggets längd varierar beroende på elektrodavstånd och antal elektroder.

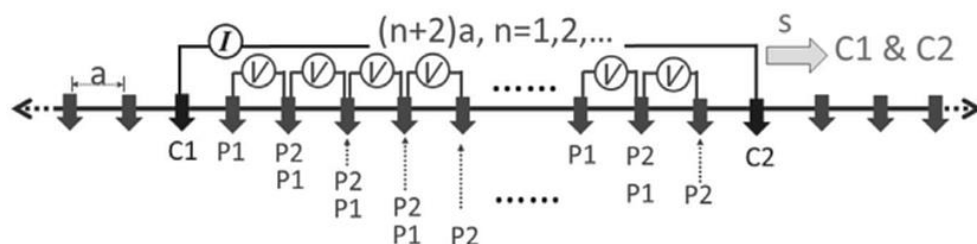
### 3.2.2 Elektrodkonfigurationer

Elektroderna kan placeras ut enligt många olika principer, t.ex. med Wenner-konfiguration där man har samma avstånd mellan alla fyra elektroderna som i Figur 5. Det finns dock flera olika varianter beroende på syfte med undersökningen, mätplatsens förutsättningar och mätutrustningens design (Figur 7). 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 resistivitetsmätning, 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 8) 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 upplösningsförmåga med bra signal-brusförhållande. Man kan härvid minska antalet strömsändningar tack vare att spänningsdipolernas relativa placering i förhållande till strömelektroden ger olika djupnedträngning (Dahlin & Zhou 2006; Dahlin & Zhou 2004).



Figur 7. Skiss på olika elektrodkonfigurationer för ytbaserad resistivitetsmätning, där A, B betecknar strömelektroder och M, N är potenzialelektroder (från Slater & Binley 2020).

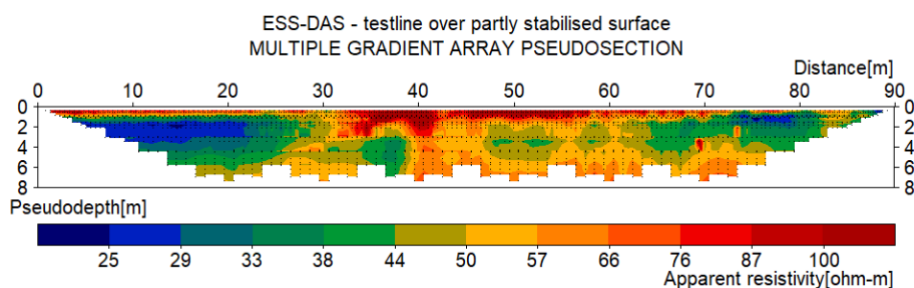


Figur 8. Skiss på mätprincipen för multipel gradientkonfiguration, där flera spänningar mäts samtidigt vid varje strömsändning (modifierad från Zhou m.fl. 2020).

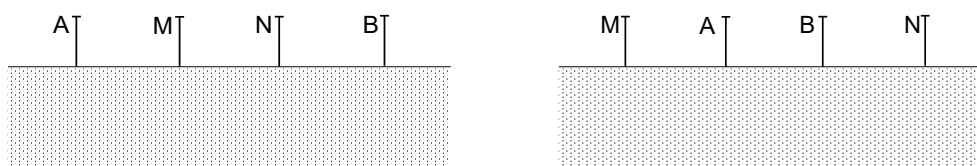
Pol-dipolkonfiguration kan sägas likna multipel gradientkonfiguration, med skillnaden att den ena strömelektroden placeras på ett stort avstånd från mätutlägget. Beräkningsmässigt betraktas den så kallade fjärrelektroden vara placerad oändligt långt borta, medan man i praktiken oftast får nöja sig med 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.

### 3.2.3 Kvalitetskontroll av data

Mätdata från 2D ERT kvalitetskontrolleras ofta genom att rita upp dem som pseudosektioner, där den skenbara resistiviteten ritas upp som funktion av medianen för undersökningsdjupet som funktion av mittpunkten för elektrodutlägget eller spänningselektroden (beroende på vad som passar bäst för den aktuella elektrodgeometrin). Med hjälp av en pseudosektion och erfarenhet kan man snabbt avgöra om datakvaliteten är tillräckligt bra (Figur 9), dock kan det vara svårt att tillämpa för 3D-undersökningar och borrhålstomografi.



Figur 9. Exempel på pseudosektion med övervägande bra datakvalitet men där ett fåtal datapunkter kring 70 m och pseudodjup 2-4 m kan redigeras bort.



Figur 10. Normal (vänster) och reciprok (höger) Wennerkonfiguration.

Det går att kvantifiera mätdatakvaliteten med hjälp av reciprocitetsprincipen, som innebär att man teoretiskt sett kan byta plats på ström- och potentialelektrodena (Figur 10) och ändå få samma mätvärde. Om mätresultaten skiljer sig åt beror det på olika typer av mätfel, vilket man utnyttjar genom att beräkna observationsfel:

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

De beräknade mätfelens storlek anges ofta i procent.

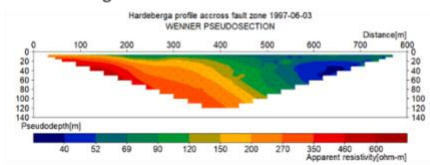
En nackdel med reciproka mätningar är att det krävs dubbelt så många mätningar för en fullständig kvalitetskontroll, vilket tar lång tid att genomföra. I praktiken kan ofta det ta fyra gånger så lång tid på grund av att det är svårare att utnyttja instrumentets förmåga att mäta i många kanaler samtidigt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

att det sällan används i praktisk tillämpning. Vidare tenderar de reciproka mätningar vara känsligare för mätstörningar för sådana elektrodkonfigurationer där de görs med större avstånd mellan potentialelektrodena än de normala mätningarna, vilket i fallet för exemplet i Figur 59.

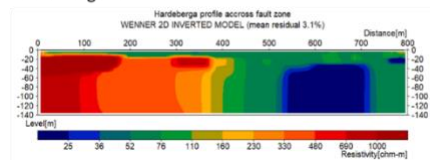
### 3.2.4 Modelltolkning via inversion

För att tolka data från ERT är det nödvändigt att skapa modeller av fördelningen av de fysikaliska egenskaperna i marken eller objektet som mätningen avser. Det kan man göra med hjälp av så kallad invers numerisk modelltolkning (inversion). Inversionen sker genom att tolkningsprogramvaran skapar en modell där den undersökta volymen delas upp i celler, och därefter anpassar fördelningen av resistivitet i modellcellerna genom s.k. iteration. Detta innebär att programvaran antar en startmodell och justerar den i ett antal steg. Målet är att hitta en modell av fördelningen av materialegenskaper i den undersökta volymen, som gör att de simulerade mätdata som modellen ger upphov till (modellsvaret) så väl som möjligt stämmer överens med uppmätta data (Figur 11).

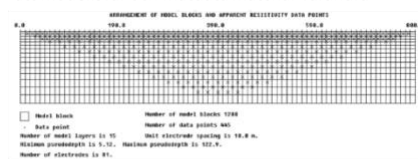
Pseudosektion = uppmätta data efter ev. signalbehandling och filtrering



Modellsektion = tolkad modell av resistiviteten i vertikalt tvärsnitt genom marken

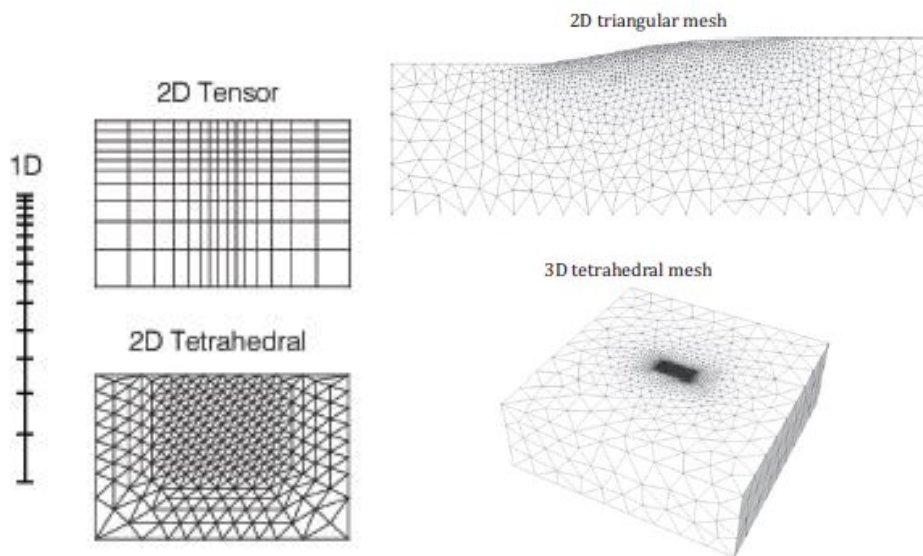


Inversion (invers numerisk modelltolkning) = iterativ anpassning av resistivitetsfördelningen så att modellsvar och mätdata matchar varandra



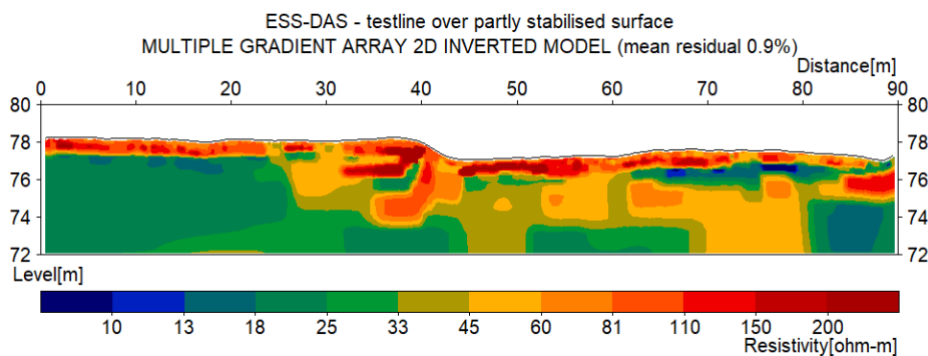
**Figur 11.** Principen för inversion av resistivetsdata består av att skapa en modell av resistivitetsfördelningen i marken genom att med hjälp av en iterativ process anpassa en modell så att modellsvaret så väl som möjligt efterliknar uppmätta data.

Beroende på hur data har samlats in kan man skapa 1D, 2D eller 3D modeller (Oldenburg et al. 2023). Ofta använder man finita differens- (FD) eller finita element-metoden (FEM) för att skapa modellen, där den senare är att föredra om det finns topografi att ta hänsyn till eller vid komplicerade mätgeometrier. Figur 12 visar exempel på olika principer för modelldiskretiseringar i en, två och tre dimensioner.



Figur 12. Exempel på olika modelldiskretiseringar i en, två och tre dimensioner (från Oldenburg et al. 2023; Binley & Slater 2020).

Det finns osäkerheter inbyggd i modelltolkning genom inversion på grund av att många olika resistivitetsfördelningar kan ge upphov till samma eller snarlika mätdata, så kallad ekvivalens. Lager och strukturer med liten mäktighet eller utsträckning i förhållande till undersökningsdjupet blir svåra eller omöjliga att detektera. Vidare kan olika geomaterial ha överlappande resistivitetsintervall varför det är viktigt med referensdata från andra metoder för att göra en bra tolkning av resultaten. Å andra sidan kan placeringen av punkter för t.ex. borrhning och provtagning optimeras baserat på ERT-resultaten. Genom att styra upp modelltolkningen med information från sådana undersökningar och annan så kallad a priori-data kan osäkerheterna minskas radikalt (Binley & Slater 2020).



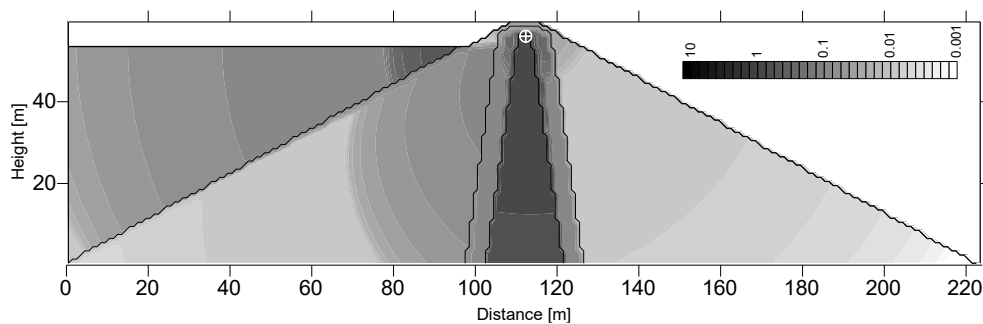
Figur 13. Exempel på inverterad sektion baserad på data från ERT med topografi.

Det finns olika programvaror för inversion av ERT-data från mätningar med elektroderna på markytan i såväl 2D som 3D, som även stödjer elektroder i borrhål. De kommersiella programmen Res2dinv (Loke et al. 2003) och Res3dinv är väl beprövade och stabila, och fungerar väl i de flesta standardbetonade tillämpningar (exempel i Figur 13) men har begränsningar för mera speciella geometrier. En sådan begränsning är att de inte går att konfigurera för att hantera den inre strukturen och materialfördelningen i en fyllningsdamm. Programvarubiblioteket pyGIMLi (Rücker et al. 2017) som har öppen källkod är tillräckligt flexibelt för att det ska vara möjligt att anpassa

diskretiseringen av FEM-modellen med hänsyn till den inre strukturen i fyllningsdammar.

### 3.2.5 ERT och zonerade fyllningsdammar

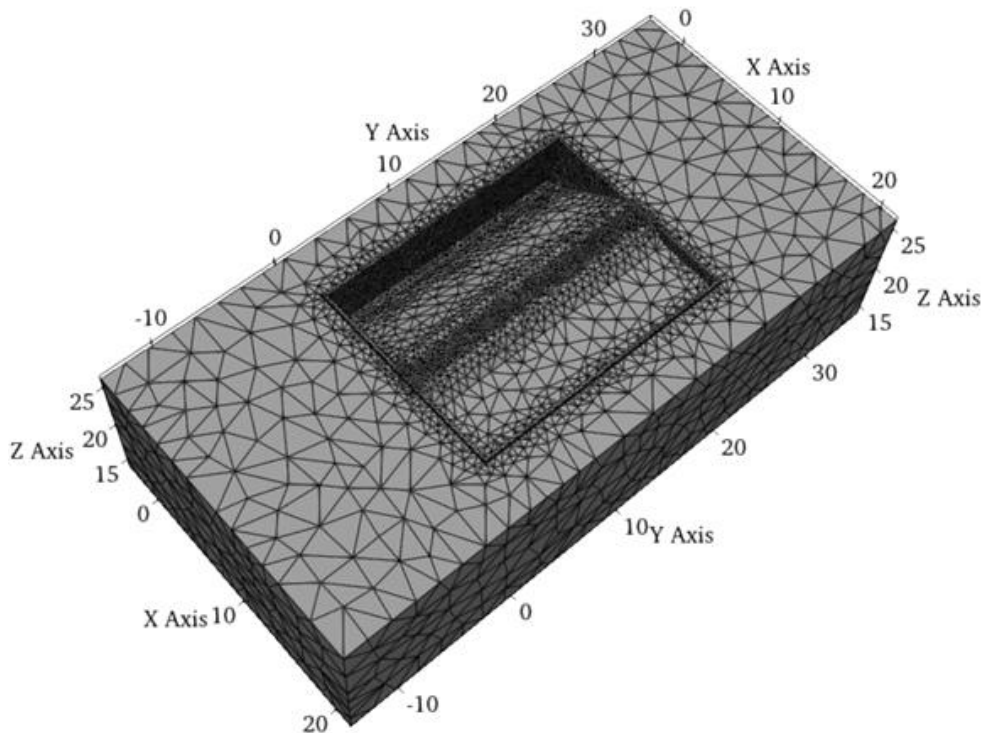
Resistivitetsundersökning på fyllningsdammar utförs ofta som 2D ERT, med elektroderna placerade längs tåtkärnan. Detta beror på att det i allmänhet är relativt enkelt att installera elektroderna, och det har fördelen att fokusera känsligheten för mätningen till tåtkärnan eftersom den normalt är den mest konduktiva delen vilket leder till en fokusering av mätströmmen dit. Principen för att invertera data från 2D ERT bygger dock på antagandet att alla strukturer och materialzoner har oändlig utsträckning i planet vinkelrätt mot mätlinjen, vilket uppenbart inte är fallet för en zonerad fyllningsdamm. Det leder till att såväl resistiviteter som geometri i de inverterade modellerna blir kraftigt förvrängda. Detta innebär att 2D ERT kan användas för att indicera var det finns anomala zoner men positionen liksom kvantifieringen av resistiviteten blir inte korrekt (Cho et al. 2014; Dahlin et al. 2008; Sjö Dahl et al. 2006).



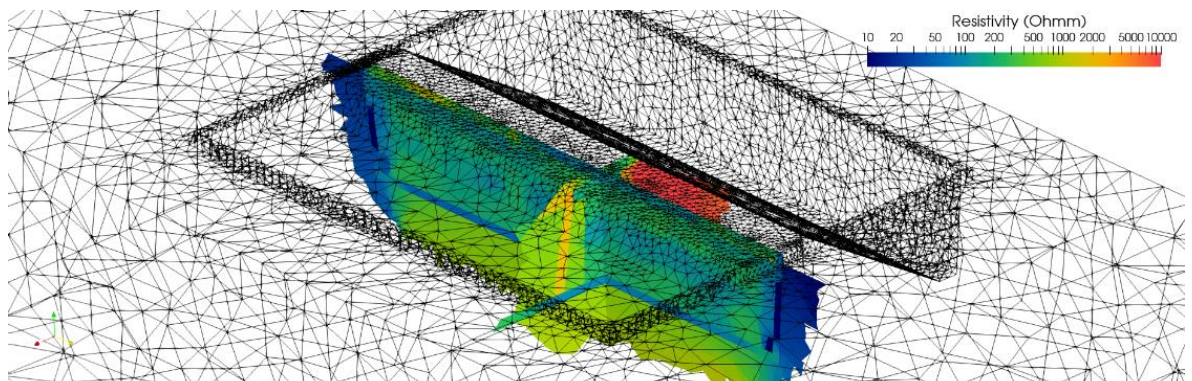
**Figur 14.** Exempel på beräknad strömfördelning i tvärsektion av en typisk svensk fyllningsdamm med 100 m mellan strömelektroderna, angivet som strömtäthet i mA/m<sup>2</sup> vid 1 A utsänd ström (från Sjö Dahl et al. 2006).

För att kunna uppnå så korrekta modeller som möjligt av fördelning av resistivitet i tåtkärnan behövs 3D ERT, vilket kräver att elektrodinstallationer, mätkonfigurationer och inversion anpassas för det. Vidare behöver man kunna ta hänsyn till variationer i vattennivå och vattenresistivitet i reservoaren.

Figur 15 visar ett exempel på hur ett 3D FEM-nät för en fyllningsdamm, i detta fall testdammen i Älvkarleby där modellen även behöver inkludera betonginneslutningen och omgivande marken eftersom ström- och potentialfält fördelar sig i dessa. Den inre cellstrukturen i modellen har konstruerats med ledning av den kända (eller förmodat kända) inre materialstrukturen, vilket i sin tur medför att inversionsprocessen kan optimeras för att ge så bra upplösning som möjligt av tåtkärnans egenskaper. Figur 16 visar ett exempel på resultat från inversion av uppmätta data från en dag från testdammen i Älvkarleby, med cellindelning och ett par tvärsnitt genom modellen.



Figur 15. Exempel på modelldiskretisering från testdammen i Älvkarleby, där modellen inkluderar betonginneslutningen såväl som omgivande mark (modifierad från Norooz et al. 2024).



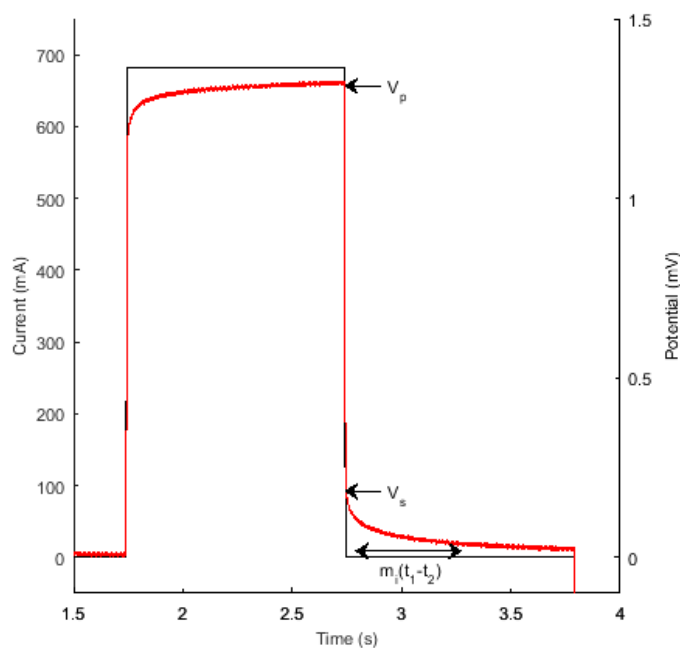
Figur 16. Exempel på resultat från inversion av uppmätta data från testdammen i Älvkarleby, med cellindelning och ett par tvärsnitt genom modellen.

### 3.3 INDUCERAD POLARISATION (IP)

Det är möjligt att mäta inducerad polarisation (IP) med samma instrument som resistivitet, förutsatt att de är designade för det. 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. ERT kombinerat med IP-mätning kallas ofta DCIP (Direct Current resistivity and Induced Polarisation tomography).

### 3.3.1 Mätprincip

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 17). 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 (Jeppsson et al. 2022; Binley & Slater 2020). Senare tids utveckling har gjort det möjligt att mäta IP-effekterna samtidigt som man skickar strömpulser vilket snabbar upp mätförloppet avsevärt (Olsson et al. 2015).



Figur 17. 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 gränssytan mellan fast material och vätska, d.v.s.

längs por- och sprickytor 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 (Binley & Slater 2020).

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 som 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, men Olsson et al. (2016) har visat att man kan erhålla SIP från mätningar i tidsdomän vilket öppnar för praktisk tillämpning.

### 3.3.2 Kvalitetskontroll av data

IP-data är betydligt känsligare för mätstörningar än resistivitetsdata. Detta beror dels på att storleken på mätvärdena i vanligt förekommande geomaterial typiskt är en bråkdel av de för resistivitet, dels för att mätning sker med betydligt kortare fördröjning efter att ström stängs av eller växlar polaritet, vilket ökar risken för att signalstörningar av olika slag ska påverka mätresultatet påtagligt. För SIP är mätintegrationsintervallen dessutom avsevärt kortare vilket försvårar ytterligare.

Eftersom uppladdningsförmågan kan vara försumbar är det inte lämpligt att ange feluppskattningen i procent, utan den anges normalt i samma enhet som mätvärdena, d.v.s. mV/V eller msec.

### 3.3.3 Modelltolkning via inversion

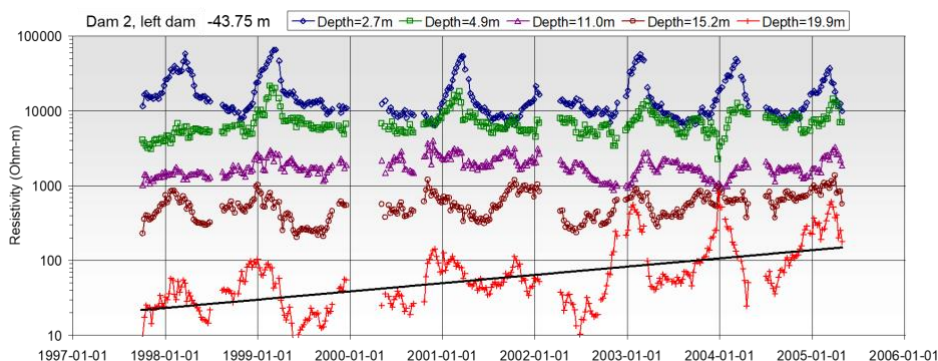
Samma principer och programvaror som för resistivitet används för att skapa modeller baserat på IP-data, och det är nödvändigt att känna resistivitetsfördelningen för att kunna skapa en modell av uppladdningsförmågan (IP-egenskaperna).

## 3.4 ÖVERVAKNING

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

En fördel i detta sammanhang är att temperaturvariationen kan användas som ett naturligt spårämne genom att göra upprepade mätningar på samma elektrodlägg vid olika årstider och analysera tidsvariationen. Det ökar möjligheten att lokalisera avvikelser och underlättar detekteringen av zoner med förhöjda läckageflöden, där amplitud och fas på temperaturvariationen och därmed resistivitetsvariationen kan förväntas avvika från omgivande material. Det öppnar också möjligheter för mera avancerad modellering och tolkning. Figur 18 visar ett exempel på långtidsvariationen i

utvalda modellceller i en fyllningsdamm där det framgår att det förutom årstidsvariation syns en ökande trend för en av cellerna vilket kan tolkas som ett tecken på fortgående inre erosion.



**Figur 18.** Exempel på resultat från långtidsövervakning av en fyllningsdamm, där diagrammet visar långtidutvecklingen av resistiviteten i modellceller på olika djup under dammkrönet (Sjödahl et al. 2008).

Det är av stor vikt att elektrodernas position inte varierar mellan mättillfällena eftersom det annars tillför mätosäkerhet och förhindrar god repeterbarhet. Det överlägset bästa är att använda fast installerade och nergrävda elektroder vilket också säkerställer att elektrodkontaktförhållandena varierar så lite som möjligt mellan mätningarna. För fasta installationer med automatisk mätning är det också nödvändigt att gräva ner elektroder och kablar för att förhindra direktkontakt med personer och djur som kan leda till skador på dem eller utrustningen.

## 4 Mättekniska försök på dammar med befintliga elektrodinstallationer

Mättekniska försök med "state-of-the-art" mätinstrument har genomförts på existerande dammar med sedan tidigare installerade elektrodutlägg. Detta gjordes på dammar där det pågår långtidsövervakning med äldre mätsystem för ERT, eller där det tidigare genomförts mätningar och där det av den anledningen finns elektrodutlägg installerade. Resultaten visar att det går att uppnå goda långtidsegenskaper för elektrodinstallationer för långtidsövervakning av fyllningsdammarna, men att det förutsätter att elektroder och elektrodkablar av rätt kvalitet används. Vidare att installationerna utförs på rätt sätt med noggrannhet på detaljnivå.

Mättekniska försök har genomförts på fyra olika dammar med befintliga installationer. Detaljer kring installationerna och resultat har presenterats av Dahlin et al. (2001) och Johansson et al. (2005), och resultat av Sjö Dahl et al. (2008) samt Sjö Dahl et al. (2009).

### 4.1 METODBESKRIVNING

#### 4.1.1 Aktiva mätningar

Förberedelser för testmätningarna gjordes genom att skapa spreadfiler som beskriver hur elektrodutläggen är designade och kopplade till instrumentet, och protokollfiler som definierar mätsekvenserna som ska användas.

Elektrodkonfigurationerna som användes varierar mellan dammarna och elektrodutläggen, men multipel gradientkonfiguration och en reciprok version av den ingår i samtliga fall. För några av elektrodutläggen gjordes också mätningar med utökad gradient, dipol-dipol eller pol-dipolkonfiguration.

Ändkontakterna på de befintliga elektrodablarna kopplades till en ABEM Terrameter LS2 för varje elektrodutlägg. Elektrodkontaktresistans mättes med "focus-one"-tekniken innan mätningarna startade (Ingeman-Nielsen et al. 2016), med en liten testström (1 mA) med hänsyn till de icke-polariserbara elektroderna. Mätttesterna gjordes med 100 % duty cycle IP-läge (Olsson et al. 2015) med 2 s långa pulser och 2 hela mätcykelstackar (+--+). Maximal utspänning från sändaren var begränsad till 400 V och den begärda strömmen var 200 mA, förutom några omgångar av testrundor med reducerad ström.

De reciproka dataparen användes för att beräkna observationsfel på basis av reciprocitetssatsen, som säger att mätningar gjorda med omvända sändar- och mottagarpositioner ska ge identiska resultat om det inte finns mätfel.

#### 4.1.2 Passiva mätningar

Passiva mätningar genomfördes när inga aktiva mätningar pågick för att få insikt i karaktären av elektriskt brus på platserna. En reläomkopplare av typ ABEM Electrode Selector ES10-64C användes för att koppla valda elektroder från ett eller två elektrodutlägg till en 8-kanals prototypmottagare för DCIP med 24 bitars A/D-omvandlare som är utvecklad av oss. Mottagaren var inställd att registrera spänningssignalerna mellan de valda elektrodparen kontinuerligt under flera timmar, främst utanför kontorstid och över natten, med en samplingshastighet på 32 kHz.

Analys av det spektrala innehållet i signalerna gjordes i Matlab med hjälp av Welchs power spectral density estimate (pwelch). Två tidsperioder på 54 sekunder vardera ( $\sim 1,7 \cdot 10^6$  mätningar) valdes ut från den flera timmar långa kontinuerliga inspelningen. Fönstertiden och nFFT sattes till 217 (131 072) utan överlappning, vilket resulterade i 0,2 Hz breda FFT-intervall.

### 4.2 BESKRIVNING AV TESTLOKALERNA

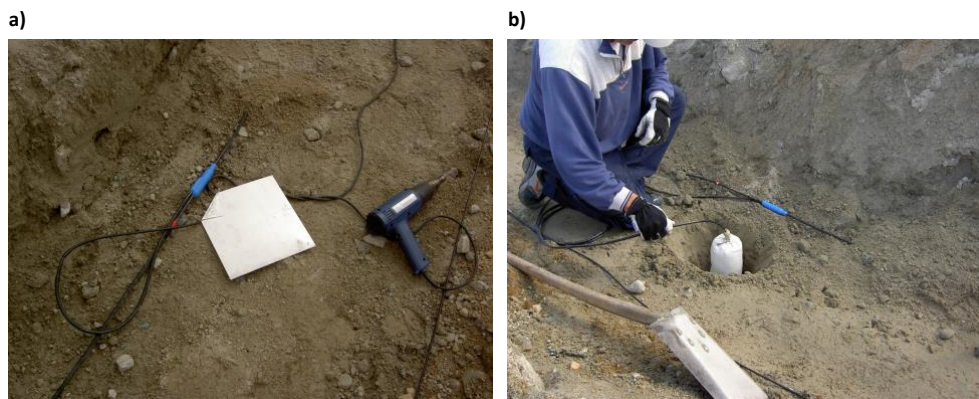
#### 4.2.1 Elektrodinstallationer

Elektrodutlägg installerades i fyra svenska fyllningsdammar under perioden 1999 till 2007, vilka alla är konstruerade och byggda som zonerade fyllningsdammar, som sammanfattas i tabell 1. En kombination av rostfria stålplåtar och icke-polariserbara elektroder användes, där de senare var avsedda för självpotential (SP) samt ERT-potentialmätningar, förutom för en av dammarna där endast stålplåtar installerades (Sjödahl et al. 2008; Dahlin et al. 2001).

Stålelektroderna består av 250 mm x 250 mm x 0,5-1,0 mm plattor av rostfritt-syrafast stål, som är sammanfogade med en flertrådig rostfri ståltråd med polyuretanmantel (PUR) genom att böja ena hörnet av plattan över en avskalad del av tråden och fixera den med några hammarslag. Den PUR-täckta vajern förbands till pig-tail-uttag på en mångledarkabel med PUR-mantel med hjälp av en crimphylsa, och skarven isolerades med krympslang med en generös mängd smältlim. Detta kompletterades med självvulkaniserande tejp, för att säkerställa en vattentät anslutning för att förhindra korrosion orsakad av en kombination av olika metaller som exponeras för fukt.

Icke-polariserbara referenselektroder av typ Farwest Corrosion Control SP-150 Cu-CuSO<sub>4</sub> levererades färdigförpackade i en påse med en bentonitblandning avsedd att säkerställa god elektrodkontakt efter blötläggning med vatten vid installationen.

Elektrodkablarna skräddarsyddes av tillverkare som förser olje- och gasindustrin med seismiska undersökningskablar. Kablarna har en kraftig PUR-mantel som lämpar sig för permanent nedgrävning under jord i vattenmättade förhållanden, med undantag för Damm 4 där kablarna är mindre robusta.



Figur 19. Installation av: a) plattelektrod av rostfritt stål, b) icke-polariserbar elektrod (Cu CuSO<sub>4</sub> förpackad i bentonitblandning) (foto: Pontus Sjö Dahl).

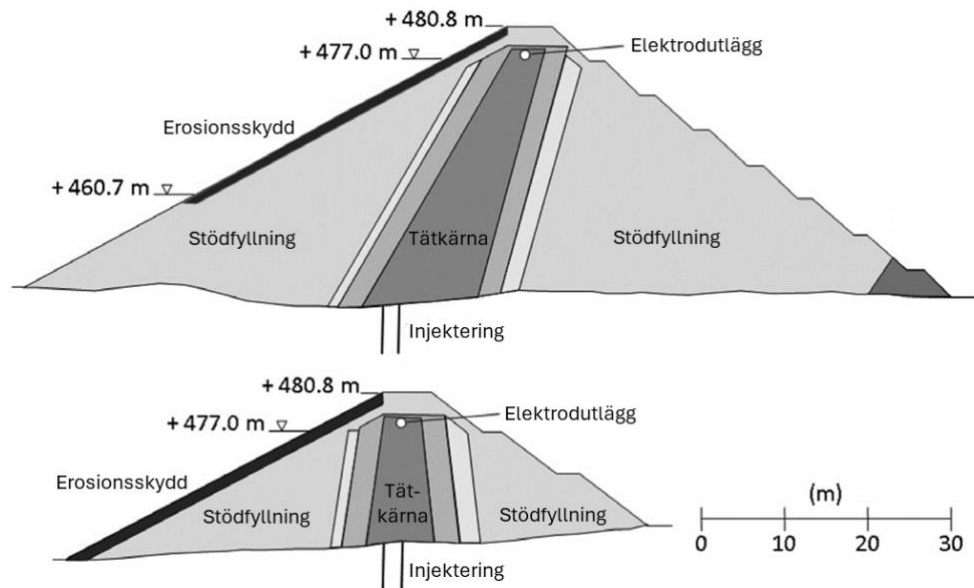
Automatisk långtidsövervakning av ERT har utförts under olika tidsperioder på de installerade elektroderna, med data som har varierat i kvalitet mellan platserna.

Tabell 1. Sammanställning av elektrodinstallationer i dammarna (SS = stainless steel plate / rostfri stålplatta och NP = non-polarisable / icke-polariserbar).

| Installationsparameter       | Damm 1       | Damm 2                                 | Damm 3                    | Damm 4                                              |
|------------------------------|--------------|----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| Dammlängd [m]                | 210+410      | 120+200                                | 140                       | 150                                                 |
| Maximal dammhöjd [m]         | 32           | 30                                     | 25                        | 9                                                   |
| Elektrodpacering             | Dammkrön     | Dammkrön, uppströmsslänt & nedströmstå | Dammkrön & nedströmsslänt | Dammkrön, botten av finfilter uppströms & nedströms |
| Installationsår              | 1999         | (1996) 2005                            | 2006                      | 2007                                                |
| Mätperiod                    | 2001-2009    | 1996-2005 & 2006-pågående              | 2007- pågående            | 2019-2022                                           |
| Elektrodotyper               | SS and NP    | SS & NP                                | SS                        | SS & NP                                             |
| Elektroдавstånd [m]          | 3-6          | 3.5-7                                  | 2                         | 2.5                                                 |
| Installerade utlägg / linjer | 2            | 5                                      | 2                         | 3                                                   |
| Antal elektroder             | 58+64        | 32+54+24+17+19                         | 41+64                     | 60+34+34                                            |
| Typ av mätningar             | ERT, IP & SP | ERT, IP & SP                           | ERT & IP                  | ERT, IP & SP                                        |
| Existerande / ny damm        | Existerande  | Existerande                            | Existerande               | Nybyggd                                             |

#### 4.2.2 Damm 1

Fyllningsdammen består av en 210 m huvuddamm med en maximal höjd på 32 m, och en 410 m lång lägre sidodamm. Elektrodulägg installerades i den övre delen av tatkärnan i samband med att den höjdes under sommaren 1999. Elektroder av rostfritt stål placerades med ett inbördes avstånd av 6 meter längs huvuddammens och sidodammens krön, och dessutom installerades icke-polariserbara elektroder längs dammkrönet med samma inbördes avstånd men med en förskjutning på 3 meter i förhållande till stålelektrodena. En sensor för vattenresistivitet och temperatursensorer installerades i reservoaren och kopplades till ERT-instrumentet. Övervakning med automatiserad ERT genomfördes under 8 år med start i maj 2001.



Figur 20. Figur med skiss på elektrodupplägg för huvuddamm (övre) och sidodamm (nedre) för Dam 1 (modifierad från Sjö Dahl et al. 2009)



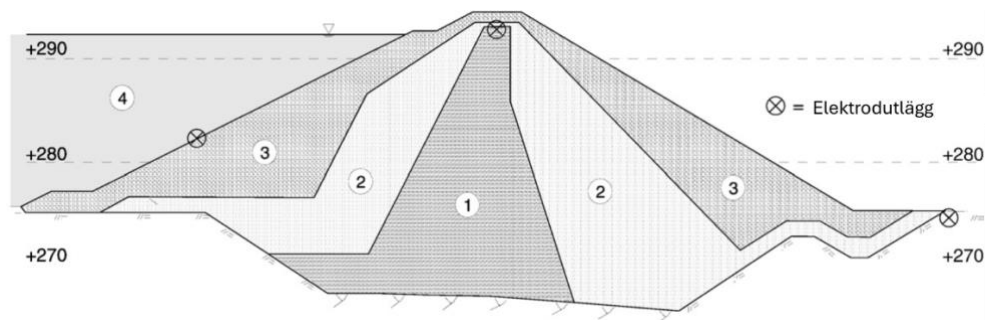
Figur 21. Elektrodupplägg i övre delen av Tåtkärnan i samband med höjning av dammkrönet för Dam 1 (foto: Torleif Dahlin).

#### 4.2.3 Dam 2

Fyllningsdammen är uppdelad i en vänster och en höger del med centralt placerat kraftverk och bräddkonstruktion. Elektrodupplägg installerades i den övre delen av Tåtkärnan i samband med höjningen av denna under sommaren 2005 vilka ersatte äldre elektrodupplägg från 1996 som togs bort. Elektroder i form av rostfria

stålplåtar placerades med ett inbördes avstånd av 7 m längs vänster och höger dammkrön, och dessutom installerades där icke-polariserbara elektroder med samma inbördes avstånd men med en förskjutning på 3,5 m i förhållande till stålelektroderna. Det finns totalt 32 elektroder i vänster krön och 54 i höger krön. Vidare placerades en undervattenselektrodkabel med 24 inbyggda cylindriska elektroder av rostfritt stål längs uppströmssidan av den vänstra dammen. På högerdammen togs elektrodkablar som ursprungligen installerades längs nedströmssidan och i reservoaren på uppströmssidan 1996 bort innan byggnadsarbetena startade och återinstallerades efteråt. Det finns 19 elektroder på höger nedströmssida och 17 på uppströmssidan, i båda fallen med ett avstånd på 7 m. En sond för vattenresistivitet och temperatur placerades hängande i intaget för anslutning till ERT-instrumentet.

Övervakning med automatiserade dagliga mätningar på den ursprungliga elektrodinstallationen skedde mellan hösten 1996 och våren 2005. Med nuvarande elektrodutlägg startade dagliga mätningar i mars 2006 och pågår fortfarande, inklusive resistivitet och IP.



**Figur 22.** Figur med skiss på elektrodplacering för högerdelen av Damm 2, där (1) = tät kärna, (2) = filter, (3) = stödfyllning och (4) = magasinets vatten (modifierad från Sjö Dahl et al. 2008).

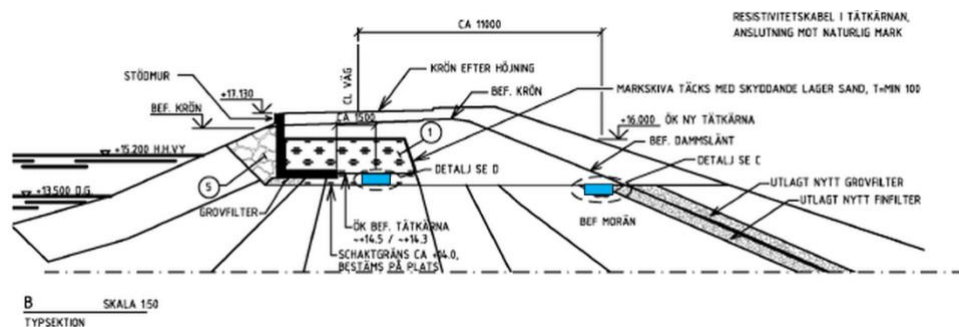


**Figur 23.** Förberedelse för elektrodinstallation i Damm 2, med elektroderna utplacerade med c/c 3,5 m i rätt positioner i längsled (foto: Pontus Sjö Dahl).

#### 4.2.4 Damm 3

Dammen är 140 m lång med en maximal höjd runt 25 m. Elektrodlägg installerades längs dammkrönet i samband med höjningen av tåtkärnan under sommaren 2006. Ytterligare en rad med elektroder installerades i stödfyllningen längs nedströmsslänten. Krönutlägget består av 41 elektroder och nedströmsutlägget av 64 elektroder, alla med 2 m avstånd och genomgående i form av rostfria stålplåtar.

Övervakning med automatiserade dagliga mätningar pågår sedan december 2007 och inkluderar resistivitet och IP.



Figur 24. Elektrodlägg för Damm 3 med positionen för elektrodläggen markerad med blå rektanglar.

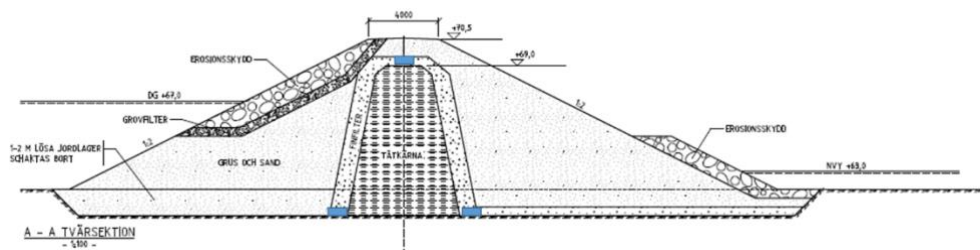


Figur 25. Elektrodlägg i Damm 3, a) krönutlägg, och b) nedströmsslänt (foto: Olof Lundborg).

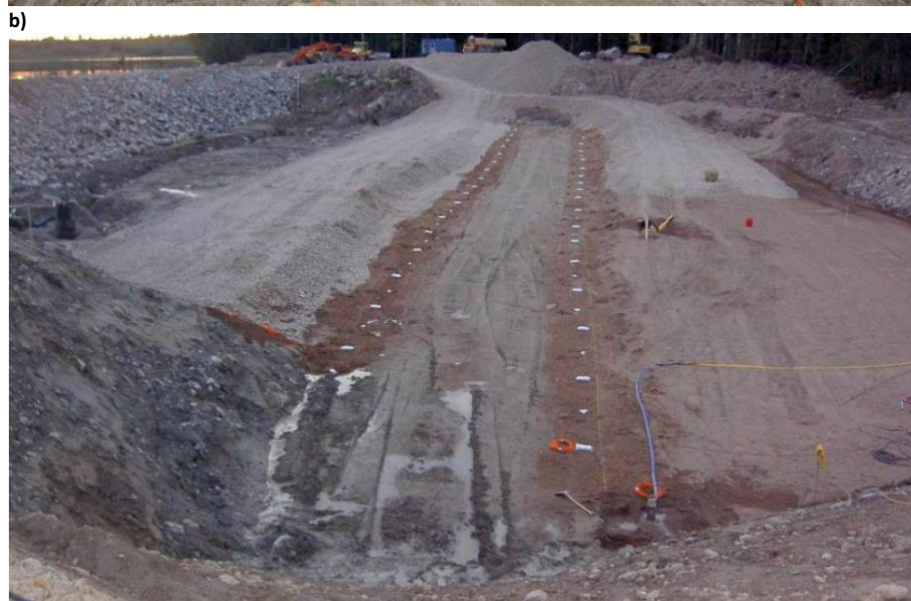
#### 4.2.5 Damm 4

En ny 9 m hög och 150 m lång fyllningsdamm byggdes 2007 (Figur 26). Längs tåtkärnans övre del installerades 60 elektroder (Figur 27a), där varannan elektrod är en rostfri stålplatta och varannan är icke-polariserbar. Ytterligare två linjer med vardera 34 elektroder installerades i uppströms- och nedströmsfiltret strax ovanför grundläggningsnivån (Figur 27b), även där med varannan elektrod av respektive

typ. Totalt installerades alltså 128 elektroder fördelade på 3 linjer, genomgående med ett avstånd på 2,5 m.



Figur 26. Sektionsritning för Damm 4 med positionen för elektrodläggningen markerad med blåa rektanglar.



Figur 27. Elektrodinstallation i Damm 4, a) bottenutlägg i uppströms och nedströmsfilter, och b) krönutlägg längs övre delen av tättkärnan (foto: Hydroresearch AB).

Noterbart är att installationsdjupet är mycket större för elektroderna som är installerade i filtren jämfört med de andra installationerna, vilket torde leda till större påfrestningar mekaniskt och hydrauliskt. Dessutom har elektrodkablar som används vid Damm 4 tunnare mantel av annorlunda kvalitet jämfört med de andra testplatserna, troligen på grund av brister i kommunikationen med kabeltillverkaren under inköpsprocessen.

Kontinuerlig övervakning med ERT gjordes under åren 2019 till 2022.

## 4.3 RESULTAT OCH DISKUSSION

### 4.3.1 Elektrodkontaktmotstånd

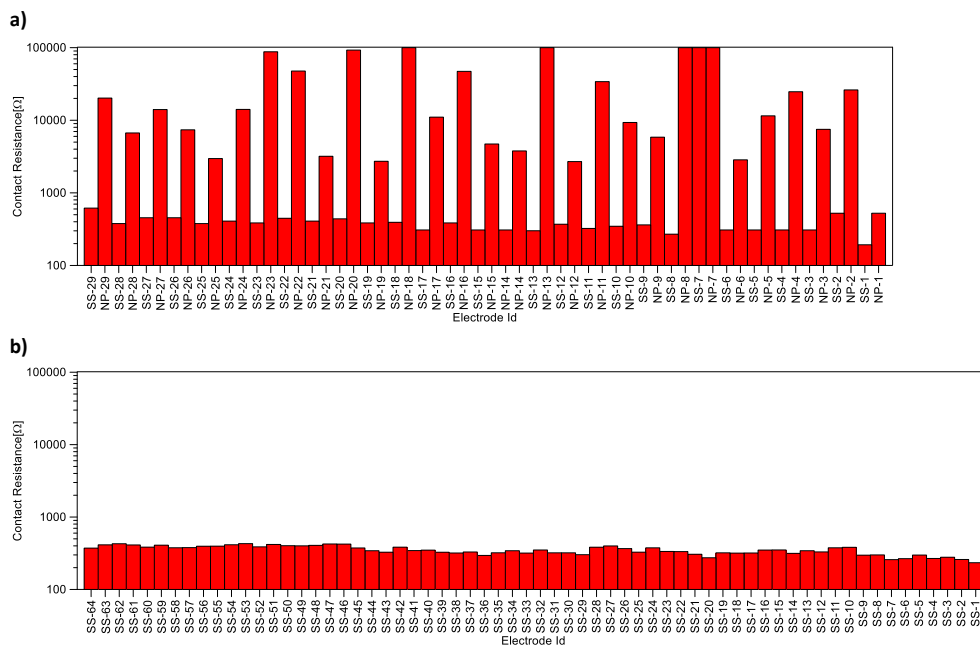
Elektrodkontaktresistansmätningarna gav stabila och repeterbara resultat trots den lilla testströmmen (1 mA). De rostfria stålelektroderna har låga till medelhöga kontaktresistanser (några hundra till några tusen  $\Omega$ ) genomgående (Tabell 2). Notera att Damm 2 vänster uppströms sida uppvisar de högsta motstånden bland stålelektroderna trots att de ligger nedsänkta i vattenmagasinet, vilket kan förklaras av den höga resistiviteten (låg konduktivitet) hos magasinssvattnet och en relativt liten yta på elektroderna. Elektroderna på Damm 2 höger uppströmssida har en annan design med större yta, vilket ger lägre kontaktmotstånd. Stålelektroderna verkar generellt vara i gott skick och alla är funktionella för Damm 2 och Damm 3, med undantag för en med skadad anslutning för Damm 1 och med 7 skadade för Damm 4. I det senare fallet har den sämre kvaliteten på elektrodkablar troligen haft avgörande betydelse för skadorna på utlägggen.

Tabell 2. Sammanställning av resultat från elektrodkontakttest.

| Lokal och utlägg         | Antal elektroder | Kontaktresistans [ $\Omega$ ] |        |         | Kommentar                 |
|--------------------------|------------------|-------------------------------|--------|---------|---------------------------|
|                          |                  | Medel                         | Median | Std.av. |                           |
| Damm 1 main dam (SS)     | 28(29)           | 371                           | 374    | 84      | Rostfritt stål (1 trasig) |
| Damm 1 main dam (NP)     | 29               | 41 158                        | 11 508 | 60 407  | Icke-polariserbar         |
| Damm 1 side dam          | 64               | 349                           | 344    | 49      | Rostfritt stål            |
| Damm 2 vänster krön (SS) | 16               | 2 040                         | 2 163  | 1 014   | Rostfritt stål            |
| Damm 2 vänster krön (NP) | 16               | 86 890                        | 70 408 | 92 990  | Icke-polariserbar         |
| Damm 2 höger krön (SS)   | 27               | 1 799                         | 1 680  | 589     | Rostfritt stål            |
| Damm 2 höger krön (NP)   | 26               | 29 322                        | 6 871  | 36 446  | Icke-polariserbar         |
| Damm 2 vänster uppstr.   | 24               | 5 198                         | 5 129  | 254     | Rostfritt stål            |
| Damm 2 höger uppström    | 17               | 2 020                         | 2 004  | 179     | Rostfritt stål            |
| Damm 2 höger nedström    | 19               | 4 485                         | 4 482  | 1 829   | Rostfritt stål            |
| Damm 3 krön              | 41               | 605                           | 576    | 243     | Rostfritt stål            |
| Damm 3 nedström          | 64               | 997                           | 796    | 432     | Rostfritt stål            |
| Damm 4 krön (SS)         | 29(30)           | 798                           | 791    | 118     | Rostfr. stål (1 trasig)   |
| Damm 4 krön (NP)         | 29(30)           | 1 609                         | 1 022  | 2 810   | Icke-pol. (1 trasig)      |
| Damm 4 botten (SS)       | 27(34)           | 472                           | 444    | 358     | Rostfr. stål (7 trasiga)  |
| Damm 4 botten (NP)       | 30(34)           | 1 179                         | 1 145  | 1 317   | Icke-pol. (4 trasiga)     |

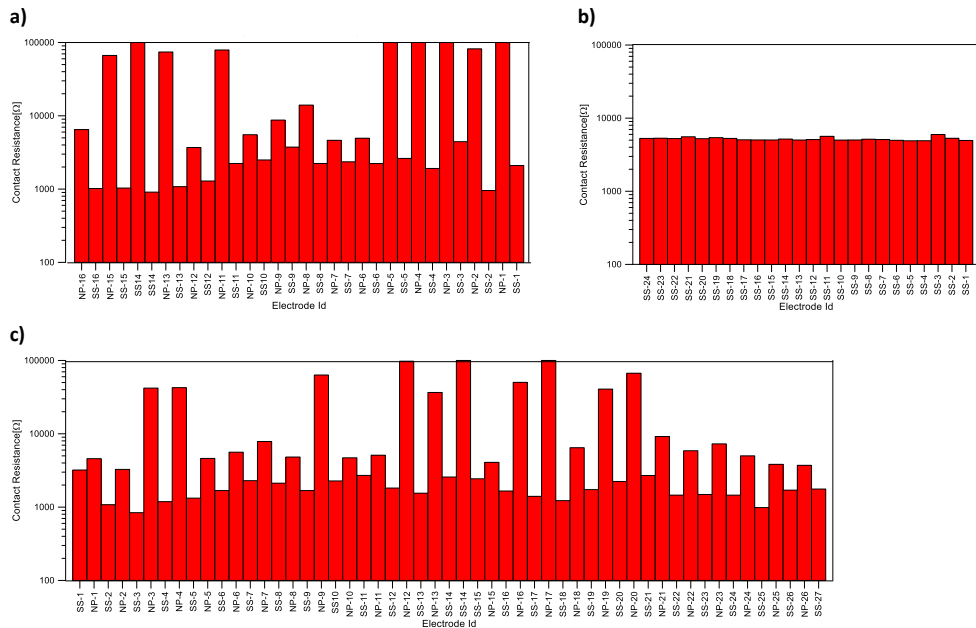
De icke-polariserbara elektroderna uppvisar högre kontaktresistanser för alla utlägg, vilka för krönutlägggen på Damm 1 (Figur 28) och Damm 2 (Figur 29) är omkring en storleksordning högre än kontaktresistanserna för stålelektroderna. Det är inte känt om de höga kontaktmotstånden orsakas av uttorkning av  $\text{CuSO}_4$ .

lösningen i elektroderna, eller om vätningen av bentonitblandningen som de installerades i var otillräcklig för dessa. Liknande elektroder bör blötläggas med minst cirka 20 liter vatten vardera enligt instruktionerna, och det kan inte uteslutas att otillräckligt med vatten användes i en del fall. De instrument som användes vid tidpunkten för installationerna erbjöd inte en möjlighet att mäta elektrodkontaktresistanserna på ett sätt som är jämförbart med det moderna instrumentet, därför finns inga sådana data från installationstillfället, även om grundliga mättester och analyser gjordes efter att installationerna hade slutförts (Johansson et al. 2005).



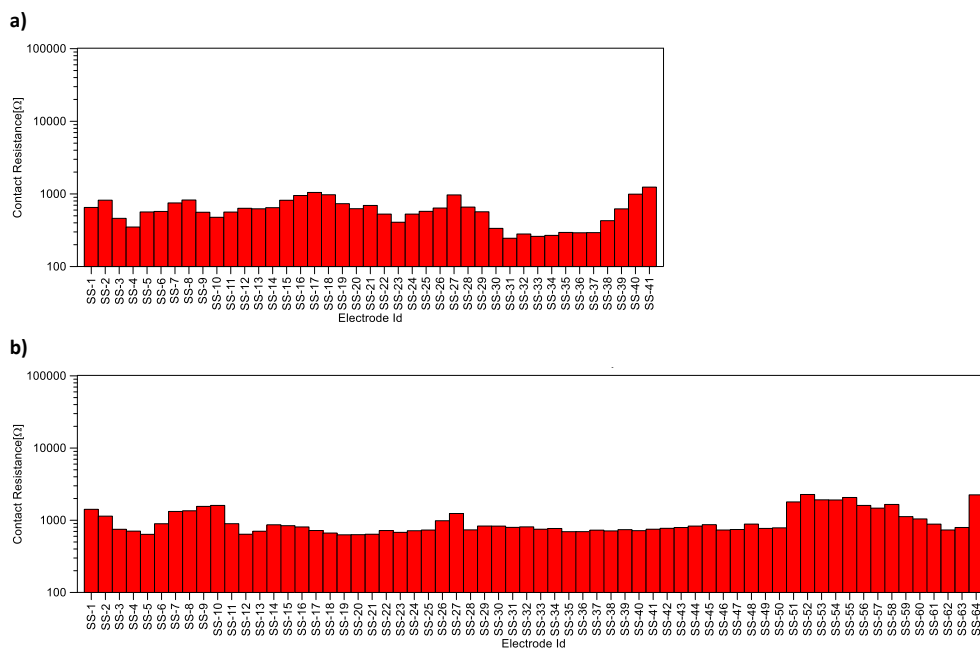
**Figur 28. Elektrodkontaktresistans för Damm 1, a) huvuddammen på, där NP markerar icke-polariserbara elektroder och SS markerar rostfria stålelektroder, och b) sidodammen där samtliga är rostfria stålelektroder.**

Enligt dokumentation från tillverkaren av de icke-polariserbara elektroderna som har letats fram i detta projekt, men som inte förefaller ha varit tillgänglig i samband med att installationerna gjordes, var elektrodens designlivslängd 10 år. Detta innebär att dessa elektroder har passerat sin designlivslängd med marginal för alla dammar. Det är dessutom komplicerande för datakvalitetsbedömningen att de icke-polariserbara elektroderna inte ska användas för strömsändning, eftersom det förhindrar reciproka felutvärderingar som är den mest tillförlitliga metoden för kvalitetsbedömning av elektrodfunktionen.



**Figur 29.** Elektrodkontaktresistans för Dam 2, där NP markerar icke-polariserbara elektroder och SS markerar rostfria stålelektroder; a) vänster krönutlägg, b) höger nedströmssida (endast stålelektroder), och c) höger krönutlägg.

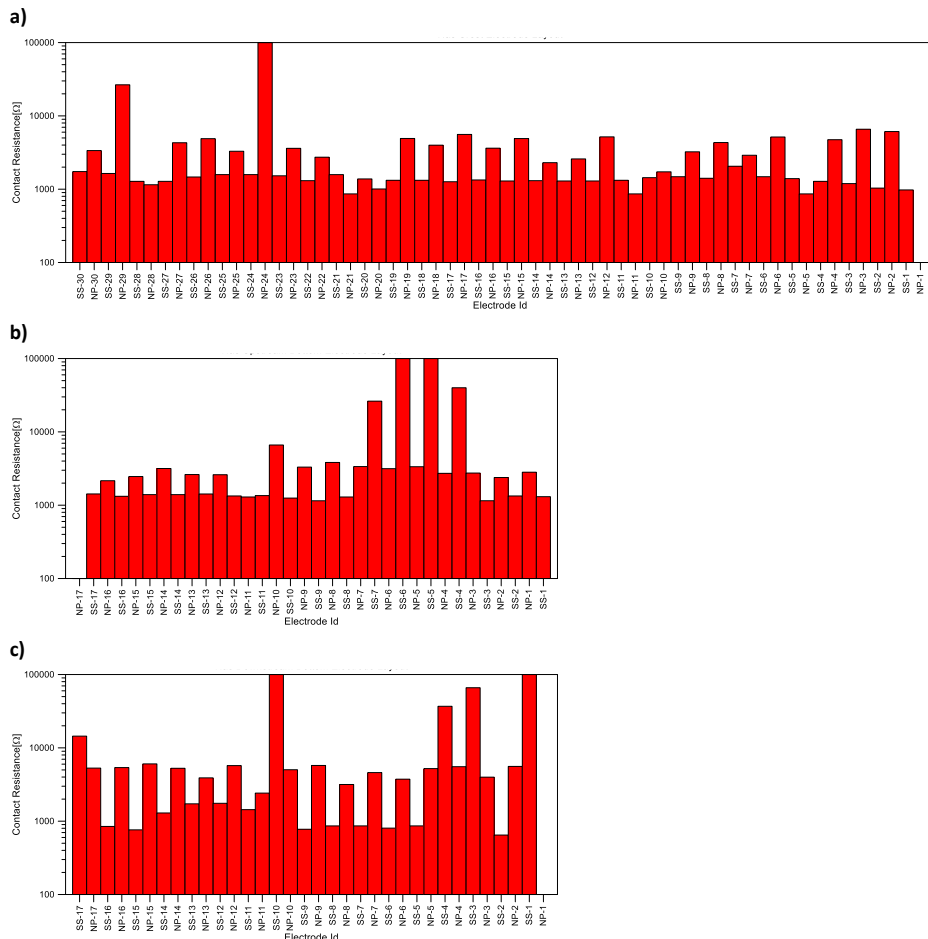
För Dam 3, där endast elektrodplåtar av rostfritt stål installerades, ligger kontaktresistanserna genomgående kring 1 kΩ eller lägre (Figur 30).



**Figur 30.** Elektrodkontaktresistans för Dam 3 där samtliga är rostfria stålelektroder; a) dammkrönet, och b) nedströmsslätten.

Vid Dam 4 (Figur 31) har fem av de icke-polariserbara elektroderna skadad anslutning. Dessutom har 18 av uppströmssidans botten elektroder vid Dam 4 misstänkt lågt kontaktmotstånd som skulle kunna motsvara ledarresistansen i

elektrodkabeln (cirka 100  $\Omega$ ). Detta tillsammans med en observation av att uppmätta potentialer ligger i samma storleksordning som utspänningen från sändaren tyder på kortslutning i elektrodkabeln.

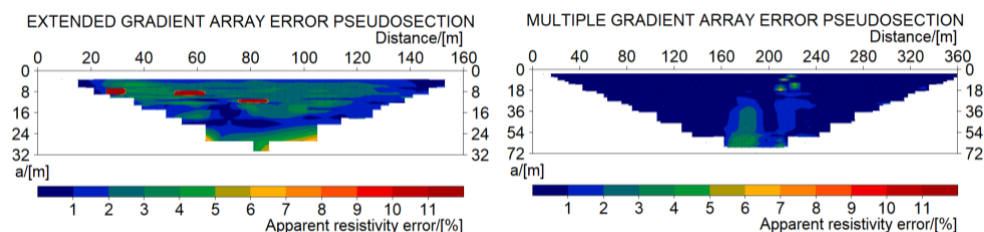


**Figur 31.** Elektrodkontaktresistans för Damm 4, där NP markerar icke-polariserbara elektroder och SS markerar rostfria stålelektroder; a) krönutlägg, b) bottenutlägg uppströmssida, och c) bottenutlägg nedströmssida.

Vattenresistivitets- och temperatursonderna vid Damm 1 och Damm 2 förefaller ha försvunnit.

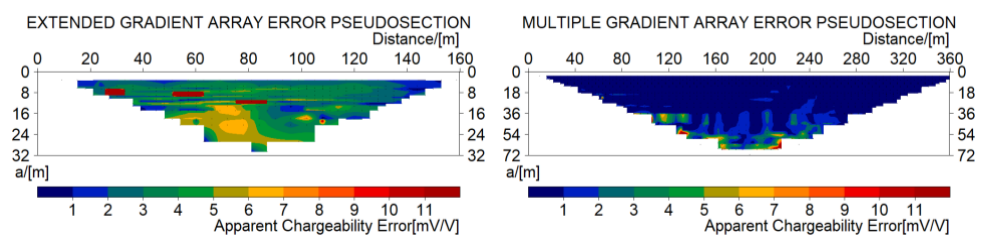
### 4.3.2 Reciprokfelanalys

Mätfelen kvantifierades från reciproka datapar från mätning med multipel gradientkonfiguration, där alla potentialelektroddpar ligger mellan strömelektroderna för den normala konfigurationen. I vissa fall utökades mätsekvensen med mätningar även utanför strömelektroderna, så kallad extended gradient array eller full-range gradient array (Zhou et al. 2020). Utsänd ström låg i intervallet 100-200 mA för Damm 1, Damm 3 och Damm 4, medan det för Damm 3 låg inom 50-200 mA för krönutläggen, 30-100 mA för uppströmsutläggen (lägre för mindre elektrodyta) och 20 mA för nedströmsutlägget.



**Figur 32.** Exempel på pseudosektioner för mätfel baserat på reciproka mätningar för skenbar resistivitet från Damm 1.

Felpseudosektioner för resistivitet från huvuddammen och sidodammen på Damm 1 visas som exempel i figur 3, baserat på reciproka datapar från utökad gradient-konfiguration respektive multipel gradientkonfiguration. De tre extremvärdena för krönet orsakas av data för mätning där de normala konfigurationerna har potentialelektrodena utanför strömelektrodena. Dessa är mer mottagliga för störningar på grund av de lägre signalnivåerna och stor separation mellan de potentialelektrodena i det reciproka fallet, och de är inte närvarande för data från vanlig gradientkonfiguration (se tabell 3). Bortsett från dessa ligger felen inom några få procent för den skenbara resistiviteten (Figur 32).



**Figur 33.** Exempel på pseudosektioner för mätfel baserat på reciproka mätningar för IP-effekt uttryckt som integrerad uppladdningseffekt (10 -1990 ms) från Damm 1.

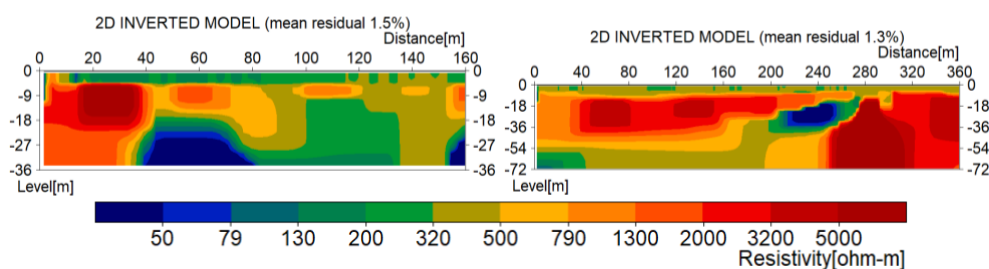
Motsvarande fel för IP-effekten, baserat på integrerad laddningseffekt, är under 10 mV/V med marginal med några få undantag, som visas i pseudosektionerna i Figur 33.

**Table 1.** Sammanställning av mätfel beräknade från reciproka datapar, där skenbara uppladdningseffekter är baserade på integrerad uppladdningsförmåga (10 -1990 ms). Alla mätningar gjordes på elektroder av rostfritt stål.

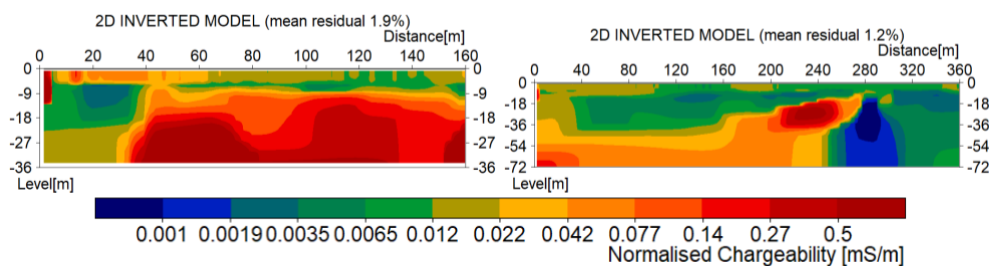
| Lokal och utlägg   | Antal data | Resistivitet mätfel[%] |        |         | IP-effekt mätfel[mV/V] |        |                     |
|--------------------|------------|------------------------|--------|---------|------------------------|--------|---------------------|
|                    |            | Medel                  | Median | Std avv | Medel                  | Median | Std avv             |
| 1 huvuddamm (GD)   | 198        | 2.08                   | 2.07   | 1.19    | 3.2                    | 3.15   | 1.46                |
| 1 huvuddamm (alla) | 409        | 3.62                   | 2.16   | 16.91   | 2.3·10 <sup>3</sup>    | 3.09   | 4.5·10 <sup>4</sup> |
| 1 sidodamm         | 1373       | 0.44                   | 0.18   | 0.99    | 0.69                   | 0.18   | 1.89                |
| 2 hö krön (GD)     | 189        | 13.57                  | 3.58   | 26.17   | 46.49                  | 1.27   | 486.91              |
| 2 hö krön(alla)    | 389        | 11.88                  | 4.32   | 24.56   | 26.04                  | 1.33   | 340.23              |
| 2 vä krön          | 48         | 11.38                  | 3.69   | 17.61   | 5.58                   | 2.18   | 11.26               |
| 2 vä uppström      | 147        | 0.28                   | 0.19   | 0.37    | 1.28                   | 0.63   | 2.12                |
| 2 hö uppström      | 56         | 0.09                   | 0.06   | 0.08    | 0.22                   | 0.18   | 0.18                |
| 2 hö nedström      | 76         | 5.54                   | 0.26   | 30.59   | 7.7                    | 0.31   | 47.88               |
| 3 krön             | 518        | 1.91                   | 1.14   | 2.19    | 1.2                    | 0.82   | 1.22                |
| 3 nedströmsslänt   | 1372       | 3.36                   | 1.24   | 7.84    | 22.04                  | 0.87   | 768.04              |
| 4 krön             | 216        | 163.91                 | 75.25  | 293.34  | 146.96                 | 55.51  | 257.64              |
| 4 botten           | 26         | 83.25                  | 11.91  | 282.18  | 15.29                  | 5.64   | 19.33               |

### 4.3.3 Invers numerisk modellering

Inverterade modeller baserade på normala datasektioner, samma som ligger bakom felsektionerna som visas i Figur 32 och Figur 33, visas i Figur 34 respektive Figur 35. Både resistivitet och uppladdningsbarhet (IP-effekter) ger inverterade modeller med små residualer, vilket är en manifestation av god datakvalitet.



Figur 34. Exempel på sektioner med inverterad resistivitet från Damm 1.

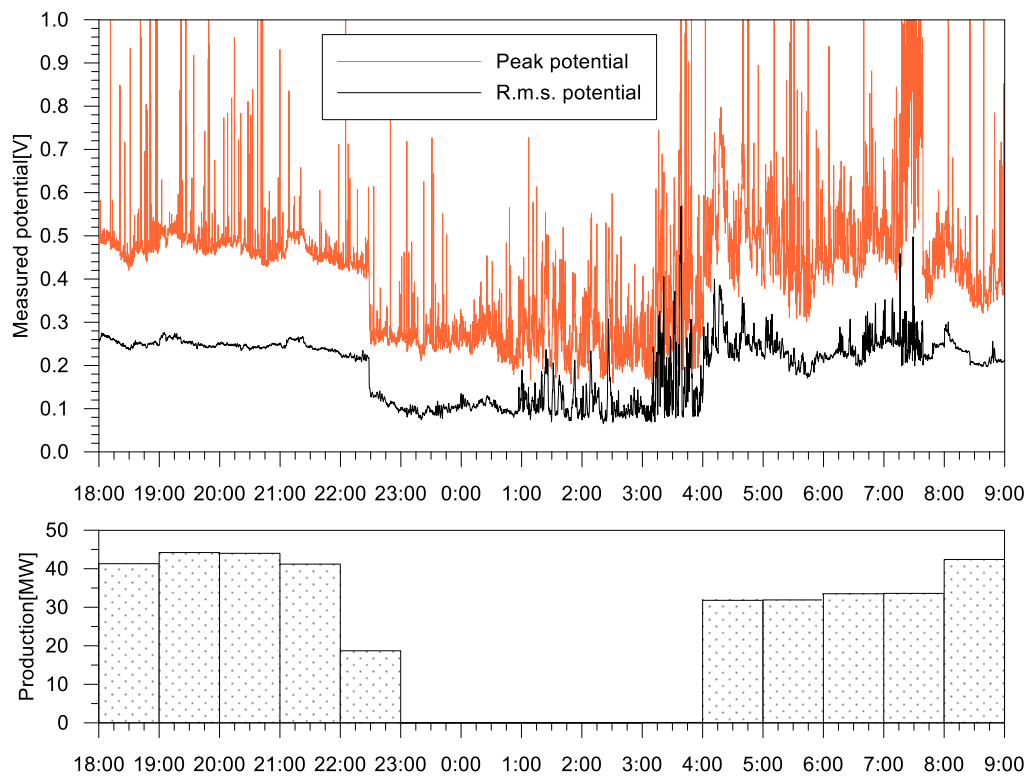


Figur 35. Exempel på sektioner med inverterad normaliserad uppladdningsförmåga (IP-effekt) från Damm 1.

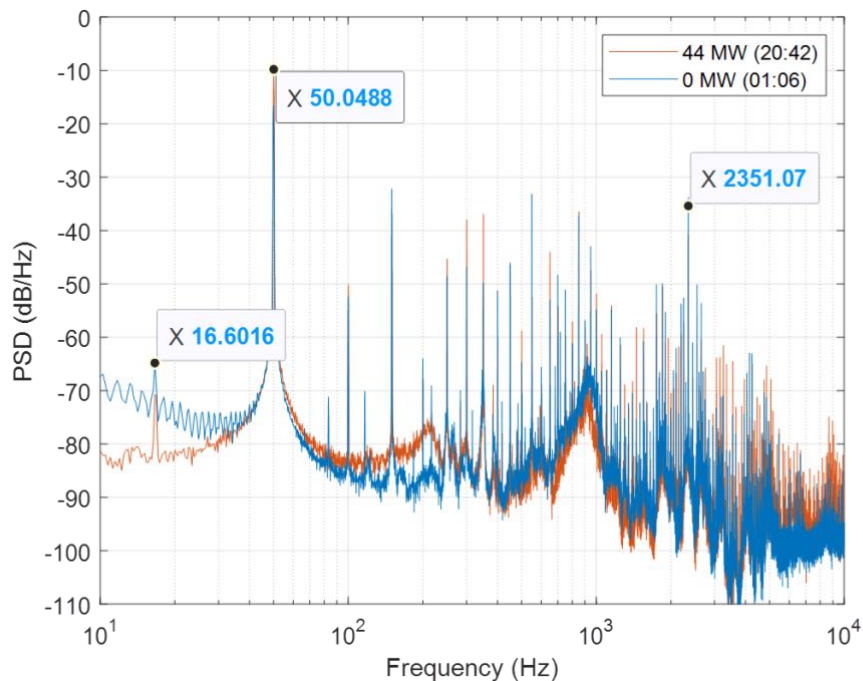
### 4.3.4 Signalstörningar

Variationer i bakgrundsbrus mättes i dammarna under perioder när det inte pågick några ERT-mätningar, varav ett exempel på resultat presenteras här. Bakgrundsbruset uppmättes i 8 samtidiga kanaler mellan ett antal utvalda elektroder fördelade längs elektrodlägggen, vid varierande avstånd i intervallet 14-98 m. Signalen varierar i tid och längs elektrodlägggen och når över 2,5 V toppamplitud för vissa kanaler (Figur 36). I vissa fall finns det ett tydligt samband mellan störningsnivån och produktionen, som i exemplet i figur 7 där produktionen stoppades 22:30 och startade om 04:00. Det finns dock också störningar som inte verkar vara kopplat till produktionen vid anläggningen utan möjligen kommer från elnätet, som mellan 01:00 och 04:00. Ökningen av brusnivån kl 07:30 sammanfaller med att ERT-mätningar påbörjas.

Bruset domineras av 50,0 Hz och övertoner (Figur 37), plus en mindre topp för 16,6 Hz under pågående produktion, vilket tyder på att järnvägens kraftförsörjningssystem påverkar brusspektrumet. Bruset innehåller frekvenser över flera kHz på betydande nivåer, vilket har konsekvenser för utformningen av ingångsdelen av instrument som ska användas för ERT/DCIP på sådana platser.



Figur 36. Exempel på resultat från mätning av bakgrundsbrus på mellan två installerade elektroder inuti den övre delen av tåtkärnan (övre) samt kraftproduktionen för anläggningen under samma period (nedre).



Figur 37. Exempel på frekvensinnehåll i uppmätta signaler, för data extraherade från tidsserien som visas i Figur 36.

#### 4.4 DISKUSSION

Resultaten visar att majoriteten av elektroderna i rostfritt stål bibehåller goda egenskaper med låg till måttlig kontaktresistans och ger god datakvalitet 15-23 år efter installationen. Med undantag är Damm 4, där problem var uppenbara i samband med installationerna, har bara en elektrod blivit oanvändbar på grund av någon okänd typ av skada. De icke-polariserbara (Cu-CuSO<sub>4</sub>) elektroderna är dock problematiska med mycket höga kontaktresistanser för många av dem. Det är inte känt om de höga kontaktmotstånden orsakas av uttorkning av CuSO<sub>4</sub>-lösningen i elektroderna, eller om vätningen av bentonitblandningen under installationen var otillräcklig. Hursomhelst har den förväntade livslängden för dessa passerats med råge. Vidare är det komplicerat för datakvalitetsbedömningen att de icke-polariserbara elektroderna inte är designade för strömöverföring, eftersom det förhindrar felutvärdering med hjälp av reciproka mätningar.

Analyserna av mätfel visar mestadels små mätfel för resistivitetsdata uppmätta med stålelektroder. Resultaten visar att elektroder av rostfritt stål kan rekommenderas för installationer för långtidsövervakning med ERT eller DCIP.

Resultaten visar att kvaliteten på elektrodablarna och omsorg om detaljer i installationsprocessen är avgörande. Kablarna är av otillräcklig kvalitet vid Damm 4, vilket ledde till skador under installationen med förlust av elektroder och som det verkar fortsatt nedbrytning samt trolig kortslutning inuti kablarna. För de övriga 3 dammarna tyder allt på att installationerna av elektroder och kablar är intakta eftersom de fortsätter att ge data av god kvalitet.

För framtida installationer för övervakning med ERT eller DCIP rekommenderas att följa samma typ av installationsprocedur som gjordes för de undersökta dammarna men säkerställa att köpa kablar som är konstruerade för permanent nedgrävning under delvis eller helt vattenmättade förhållande. För installationer i vattenmagasinet och på lägre nivåer i dammen måste vattentrycket beaktas. Icke-polariserbara elektroder som liknar den typ som används här bör undvikas, såvida de inte har bevisats fungerande genom långtidstestning. Kabelns och anslutningarnas mekaniska hållfasthet måste tåla hanteringen vid nedgrävning av dem i fyllningsdammen och anslutningspunkterna mellan olika metaller måste tätas säkert mot vatteninträning för att undvika korrosion. Det är vidare nödvändigt att kablarna är dimensionerade för att tåla de spänningar och strömmar som mätinstrumentet sänder ut, vilket innebär upp till 600 V och cirka 2 A likström.

Sonderna för att mäta vattenresistivitet och temperatur i reservoaren behöver vara robusta och lätta att installera för utbyggnad och överlevnad i typiska dammiljöer, och de behöver utformas för de mycket låga konduktiviteterna (höga resistiviteter) som är typiska för svenska förhållanden. Många av de produkter som erbjuds på marknaden är troligen inte lämpliga.

Registreringarna av bakgrundssignaler visar att det finns bruskomponenter mellan 16,6 Hz och flera kHz som måste beaktas för DCIP-instrumentdesign och signalbehandling

## 5 Metodik, instrumentering och programvara för långtidsövervakning

Övervakning med ERT / DCIP kan göras med olika ambitionsnivåer. Det mest ambitiösa är att använda ett permanent installerat mätsystem vilket har flera fördelar. Det gör det möjligt att övervaka med en tidsmässig upplösning som är otänkbar om systemet ska anslutas manuellt vid varje mättillfälle. Fel orsakade av skillnader i elektrodplaceringen mellan tidsstegen elimineras och variationer i elektrod-till-mark-kontakten minimeras. Risken för att mätinställningar inte är konsekventa mellan tidsstegen, vilket försvårar utvärderingen av data, kan undvikas med ett helautomatiskt system. Tidsskalan för övervakningen kan sträcka sig från kort sikt (några dagar eller veckor) till lång sikt (flera år).

Korttidsövervakning med ERT / DCIP kan vara användbart för att exempelvis lokalisera koncentrerade läckagevägar eller andra avvikande zoner i en fyllningsdamm om det görs i anslutning till att magasinsnivån förändras snabbt efter att ha hållits konstant en period. Det skulle också kunna vara användbart för att ge en bild av spridningen av injekteringsbruk i samband med reparation av en fyllningsdamm. Detta avsnitt har dock främst fokus på långtidsövervakning.

### 5.1 ELEKTRODINSTALLATION

Elektrodinstallationerna är kritiska för kvalitet och upplösning för ERT / DCIP. För automatiserad mätning är det viktigt att ha alla delar av systemet, inklusive elektroderna och deras anslutningar, skyddade från kontakt med människor och djur av säkerhetsskäl och för att undvika skador. Detta uppnås normalt genom att gräva ner elektrodablarna och elektroderna. Detaljutformningen av elektrodablarna och elektroderna, inklusive anslutningspunkterna, är central för att ge tillräcklig galvanisk kontakt som inte försämras med tiden och för att undvika korrosionsproblem så att stabila prestanda säkerställs under hela övervakningsperioden.

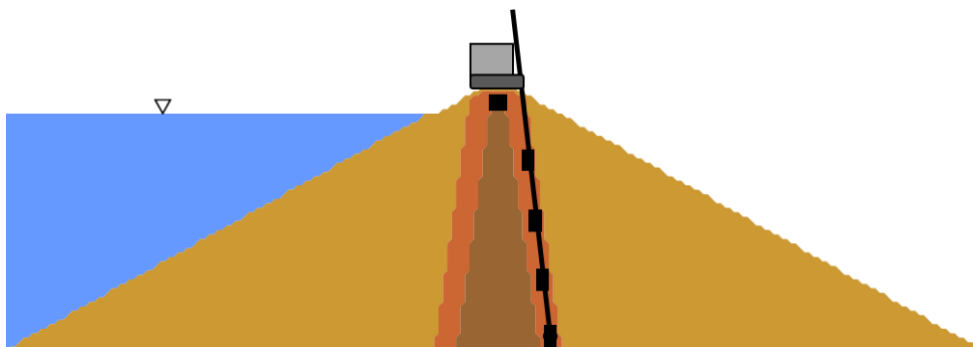
Elektrodablarna måste vara tillräckligt robusta för att inte ta skada av att grävas ner och bäddas in i ett friktionsmaterial, som dock inte bör vara grövre än grov sand till fint grus. I annat fall behöver kabeln läggas i ett skyddsrör, där till exempel 50 mm gult plaströr kan vara lämpligt. Kabeln måste också tåla att förläggas under vatten permanent om det finns möjlighet att vattenmättade förhållanden uppstår. Kabeln måste också vara dimensionerad för att tåla de spänningar och strömmar som utrustningen sänder utan att ta skada, i annat fall kan det uppstå kortslutning inuti kabeln mellan ledare som sänder ström respektive mäter spänningar med katastrofala följder för datakvaliteten. Ett exempel på teknisk specifikation av elektrod kabel som kan ingå i ett upphandlingsunderlag finns i Bilaga A.

Rostfritt syrafast stål är fördelaktigt som elektrodmaterial, och utvärdering av långtidsinstallationer med rostfria elektroder har visat att de kan bibehålla goda mätegenskaper i över två decennier (Dahlin et al. 2023). Plattelektroder har generellt en fördel jämfört med elektroder i form av cylindriska stavar som följd av större kontaktyta, och det faktum att gravitationen som verkar på materialet ovanför elektroderna hjälper till att upprätthålla god kontakt på horisontellt utplacerade plattor. Att bädda in permanent installerade elektroder i en massa av konduktivt material (t.ex. lokalt tillgängligt finkornt jordmaterial, bentonit eller Marconite®) kan bidra till att upprätthålla låga kontaktresistanser under långtidsövervakning (Kuras et al. 2016). Cylindriska elektroder inbyggda i elektrodkablar kan vara lämpliga för placering under vatten eller i mättade förhållanden (Sjödahl et al. 2008).

För låga och långsträckta fyllningsdammar kan det vara tillräckligt att installera elektroder längs ovankant av tätkärnan, vilket har fördelen att fokusera känsligheten till denna såsom har nämnts i avsnitt 3.1.2 (Figur 14). För högre dammar uppstår problem med upplösningen som avtar motdjupet. För att bibehålla upplösningen är det nödvändigt att installera elektroder på djupet också. Detta har visats fungera väl på testdammen i Älvkarleby (Norooz et al. 2024) där elektroder installerades på olika nivåer i finfiltren i samband med att dammen byggdes, men det är inte ett alternativ för befintliga fyllningsdammar. För vissa dammar finns det terrasser på en eller flera nivåer som skulle kunna användas för elektrodinstallationer, dock befinner sig dessa på för stort avstånd från tätkärnan med tanke på upplösningen. Detsamma gäller elektroder i magasinet och hur de kan bidra till bättre upplösning av de nedre delarna av tätkärnan. Elektrodutlägg längs uppströms- och nedströmstån av dammen kan dock vara värdefullt för att spåra onormala läckage och inre erosion under grundläggningsnivån.

En metod som har föreslagits för att installera elektroder i filtren på fyllningsdammar är styrd borrhning, där man installerar en elektrodskabel med inbyggda elektroder som får kontakt med formationen via borrhullen som används vid borrhningen. Detta ställer mycket höga krav på elektrodskabelns utförande med avseende på vattentålighet och mekanisk styrka. Det ställer också höga krav på precision och verifiering av styrningen av borrhningen, vilket behöver verifieras på en testlokal där man inte riskerar att skada en fyllningsdamm som är i drift. Vidare måste borrhningen ha tillräcklig styrka för att kunna ta sig igenom materialet, vilket visade sig inte vara fallet i ett försök att testa tekniken i en geologisk miljö med liknande materialegenskaper som i dammfilter (García Cañas 2022).

En annan möjlighet är gradad borrhning från krönet (Figur 38) på motsvarande sätt som görs för att installera grundvattenrör (Figur 39). Elektroderna kan till exempel bestå av band av rostfri stålplåt som är monterad på utsidan av ett grundvattenrör av PEH, med kablagen draget inuti röret.



Figur 38. Skiss av en tänkbar metod för installation av elektroder på olika djup i ett dammfilter.



Figur 39. Exempel på grundvattenobservationsrör som har installerats i dammfilter, där röret som används för mätningarna är placerat inuti det synliga skyddsröret. Elektroder för ERT/DCIP torde kunna installeras med en teknik som bygger på samma typ av borrhning.

## 5.2 INSTRUMENTERING

### 5.2.1 Allmänt

#### Behov

Mätsystem och instrument som är designade specifikt för övervakningsinstallationer är önskvärt, där det är viktigt att systemen är modulära och skalbara för att kunna anpassas för olika behov. Systemen måste vara robusta i den mening att de fungerar stabilt och har inbyggda funktioner för automatiserad funktionskontroll och datakvalitet, men larmfunktion i händelse av driftsavbrott eller problem med datakvalitet. De mätsystem som finns tillgängliga på marknaden idag når inte upp till dessa krav, vilket är ett av motiven för detta projekt.

#### Existerande instrumentering

Instrumentering har i FoU-sammanhang i flera fall baserats på kombinationer av kommersiella komponenter som är designade för mobila mätningar, med diverse

kompletteringar och anpassningar, till exempel ABEM Lund Imaging System (Sjödahl et al. 2008) och Zonge (Giese et al. 2009). Flera studier har publicerats för olika tillämpningar där fast installerade system baserade på kommersiella instrument använts, t.ex. IRIS Syscal (Auken et al. 2014), ABEM Terrameter LS[2] (Norooz et al. 2024; Nivorlis et al. 2022; Doetsch et al. 2015), AGI Sting (Ikard et al. 2023), MPT (Johnson et al. 2006). Eftersom dessa system främst är designade för manuella mätningar under tuffa fältförhållanden, är de i allmänhet inte optimerade för övervakningsinstallationer och de kräver ytterligare utrustning som kan inkludera en dator, reläomkopplare, åsskydd, etc. vilket gör att kostnaden för sådana system tenderar att bli hög. Figur 40 visar ett exempel på ett sådant system som är baserat på ABEM Terrameter LS2, det som användes för långtidsövervakning under mer än 4,5 år i testdammen i Älvkarleby. Reläväxeln med inbyggt transientskydd har kapacitet för 256 elektroder uppdelat i två grupper om 4 x 32 elektroder, där 32 från respektive grupp kan anslutas till instrumentet vilket gör det möjligt att ansluta de olika utläggen i kombinationer med vissa begränsningar.

Reläväxel med ⇒  
transientskydd

Industri-PC & ⇒  
nätverksrouter

ERT / DCIP ⇒  
instrument

Ström- ⇒  
försörjning



Figur 40. Mätssystem för ERT / DCIP som användes för långtidsövervakning i testdammen i Älvkarleby.

Det finns ett par icke-kommersiella instrumentsystem som har utvecklats specifikt för ERT-övervakning. Systemet PRIME (Proactive Infrastructure Monitoring and Evaluation) är ett exempel, utvecklat av British Geological Survey (BGS) med fokus på tillämpningar av infrastruktur i form av geokonstruktioner, men är allmänt tillämpligt för grunda tillämpningar (Chambers et al. 2022; Huntley et al. 2019). Systemet är utformat för att tillhandahålla högupplösta avbildningar av geologin nära ytan till låg kostnad och låg effekt för geologiska, miljömässiga och tekniska tillämpningar, och baseras på deras erfarenheter med den tidigare ALERT (Automated Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography) system (Ogilvy et al 2009; Kuras et al 2009; Wilkinson et al 2010; Kuras et al 2016). Ett annat exempel är GeoMon4D som utvecklats av Geological Survey of Austria (GBA) för kontinuerlig övervakning av geologiska och miljömässiga processer (Ottowitz et al. 2022; Supper et al. 2014). Förutom att mäta ERT kan olika andra sensorer integreras med den. Dessa system är, förutom helautomatiska mätningar enligt fördefinierade

scheman och mätsekvenser, integrerade med automatiserade dataöverförings- och hanteringsprocesser och infrastruktur.

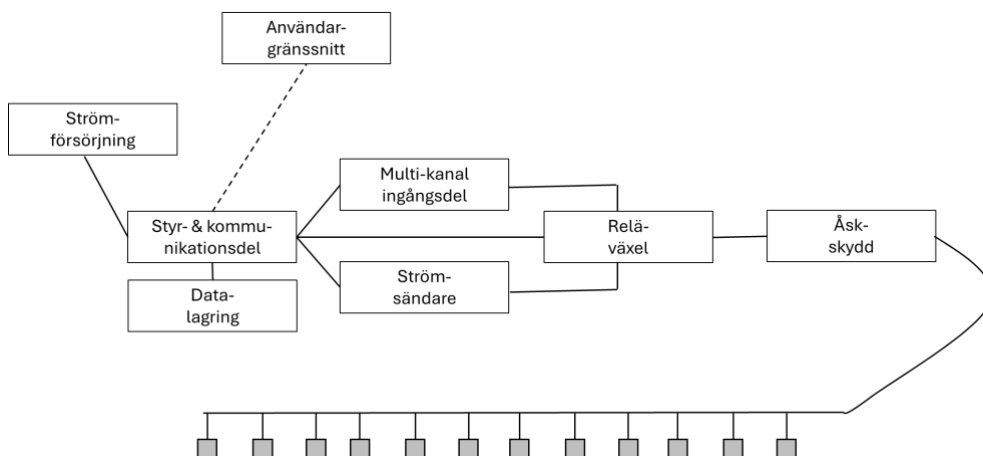
Ett kommersiellt tillgängligt system som är designat specifikt för geoelektrisk övervakning är LSI G.Re.T.A. (GeoResistivimeter for Time lapse Analysis), baserat på prototyp beskriven av Tresoli et al. (2019) och Arosio et al. (2017). Instrumentet som kan mäta resistivitet och kontaktresistans, men inte IP-effekt, har en mätkanal och är designat för maximalt 48 elektroder. Det finns färdiga lösningar för off-grid drift via solceller och batterier.

Vissa kommersiella företag erbjuder resistivitetsövervakningslösningar med egenutvecklade instrument- och mjukvarusystem, till exempel Subsurface Insights (Versteeg och Johnson 2013) och HGI (Rucker et al. 2013) i USA.

### 5.2.2 Egenskaper och krav på system för ERT / DCIP-tomografi

Ett komplett systemkoncept för långtidsövervakning av fyllningsdammar med ERT och DCIP består av flera delar (Figur 41):

- Strömsändare
- Mätbel
- Reläomkopplare
- Styr-/kontroll- och kommunikationsdel
- Datalagring
- Åskskydd
- Strömförsörjning
- Kapsling
- Användargränssnitt



Figur 41. Principskiss över delarna i ett mätsystem för ERT / DCIP.

Kraven på utförande och prestanda för de olika delarna är höga om de ska kunna leverera mätdata av hög kvalitet på ett tillförlitligt sätt under långtidsövervakning, och här följer en summering av de viktigaste kraven. Det ska vara modulärt för att kunna anpassas och konfigureras för olika storlekar på dammar med olika storlek på elektrodotläggningen.

Det är centralt med inbyggd funktionalitet för självtest och verifiering av funktionen, med automatisk felrapportering. I annat fall riskerar man att oanvändbara data samlas in under långa perioder utan att det upptäcks. Det är också svårt eller omöjligt att felsöka utrustningen via fjärruppkoppling om det inte finns inbyggda funktioner för det, och det blir tidsödande och kostsamt om kvalificerad personal behöver resa för att felsöka på plats. Det kan också vara svårt att felsöka på plats på grund av olämplig arbetsmiljö och brist på felsökningsutrustning. Alternativet att skicka utrustningen för felsökning och service blir också tidsödande och kostsamt med risk för långa driftstopp.

### **Strömsändare**

Strömsändaren ska kunna sända ut kontrollerade strömpulser med omväxlande polaritet. För enbart resistivitetsmätning är kraven på prestanda lägre än för IP-mätning, eftersom det är mindre tidskritiskt och signal-brusförhållandena är bättre. Det är önskvärt med konstant-strömsändare eftersom man inte får en konstant ström om sändaren bara lägger ut en konstant spänning, detta på grund av att markens / mätobjektets impedans förändras. Det är därför nödvändigt att reglera utspänningen från sändaren under hela mätförloppet för att erhålla en konstant ström. En konstant-strömsändare består av flera delar, en omvandlare som skapar en likström på önskad nivå med tillräcklig marginal, en strömgenerator som reglerar utspänningen så att det genereras en konstant ström, samt en polaritetsväxlare.

Generellt sett är den maximala utspänningen den begränsande faktorn eftersom kontaktresistansen mellan elektrod och mätobjekt styr hur hög ström sändaren kan skapa. I praktiken är 600 V den högsta spänning man designar sändaren för eftersom det går att hitta standardkomponenter i form av reläer, kablar, omkopplare, etc. i hanterbar storlek och till rimlig kostnad om man inte går över den spänningsnivån, medan utrustningen skulle bli ohanterlig och alltför dyr annars. Maximal utsänd ström kan av samma skäl ligga i storleksordningen 2-3 A, men begränsas i praktiken i fyllningsdammar till betydligt mindre på grund av begränsningar från maximal utspänning och effekt, där effekten kan ligga runt 200-300 W som mest.

Det är ett krav att strömsändarens utgångar och dess kraftförsörjning är galvaniskt isolerade från varandra, med hänsyn till personsäkerhet och elektriska störningar. Vidare måste sändaren vara försedd med nödstopp som är konstruerat så att det inte är möjligt att skicka ström när det är aktiverat, även om någon komponent i sändaren är trasig.

### **Mät-/ingångsdel**

Mät delen kan vara försedd med en eller flera parallella mätkanaler. För mindre installationer och om enbart resistivitet är av intresse kan en mätkanal vara tillfyllest. Tidsvariationerna i fyllningsdammar är relativt långsamma och det räcker normalt om man hinner mäta alla önskade elektrodkombinationer inom ett dygn. För större elektrodinstallationer och om det bedöms att IP-effekterna kan vara intressanta kan det vara nödvändigt med flerkanalig mätning, vilket ger

möjlighet att samla in flerdubbelt mera data under samma tid genom att mäta på flera elektrodpar parallellt vid varje strömsändning.

Mätdelen måste ha tillräckligt hög dynamisk upplösning för att den inducerade mätsignalen från den utsända strömmen ska kunna extraheras genom lämplig signalbehandling. Den nyttiga mätsignalen överlagras av spänningar från elektrodpolarisation, harmoniska störningar från kraftverk, elnät och spår bunden trafik, transienter och bakgrundsvariation från telluriska strömmar, atmosfäriska störningar, etc. I synnerhet spektral IP ställer stora krav på signalbehandling och filtrering av mätdata. Det är också viktigt att mätdelen har linjära frekvens- och faseegenskaper för att man ska kunna erhålla korrekta IP-data, och alla mätkanaler måste vara helt synkroniserade tidsmässigt för att undvika problem i samband med signalbehandling och tolkning av data.

Mätkanalerna ska vidare vara galvaniskt isolerade från varandra, förutom från strömförsörjningen, för undvikande av 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. Skydd mot att överspänning kan förstöra ingången är också nödvändigt.

### **Reläomkopplare**

Reläomkopplaren behövs för att kunna ansluta de aktuella elektroderna för en mätning till strömsändare respektive mät del. Komplexiteten och storleken på reläomkopplaren beror förutom det maximala antalet elektroder på antalet mätkanaler, där antalet reläer växer så kraftigt med antalet mätkanaler att det är nödvändigt att införa begränsningar i kombinationsmöjligheterna för att relämatrisen inte ska bli orimligt stor. Som exempel kan nämnas att en fullständig relämatris för 1-kanalsmätning på ett utlägg med 64 elektroder kräver 256 reläer, medan 8 mätkanaler skulle kräva 1152 reläer. Det är uppenbart att en genomtänkt design som reducerar antalet reläer utan att i onödan begränsa vilka mätkombinationer som kan göras är nödvändig.

Eftersom trasiga reläer kan leda till väldigt svår diagnostiserade fel är det essentiellt med inbyggd funktion för självtest, vilken bör ske fortlöpande med automatisk felrapportering.

### **Styr-, kontroll- och kommunikationsdel**

Styr-/kontroll delen kommunicerar med de olika delarna av instrumentet och synkroniserar strömsändare och mätkanaler, och ombesörjer att rätt reläer aktiveras, att rätt sorts och antal strömpulser skickas, att mätdata lagras, etc. Kommunikationsdelen tar också emot instruktioner och lämnar information via användargränssnittet.

### Användargränssnitt

Användargränssnitt kan styras via inbyggd skärm och tangentbord eller motsvarande, eller via nätverk och en dator, pekplatta eller smarttelefon. I samband med långtidövervakning är det essentiellt att kunna styra systemet via nätverk, och det är endast i samband med installation och konfiguration, samt felsökning, som man kan ha någon nytta av att kunna styra systemet på plats.

### Datalagring

Datalagring av det som mäts under en eller några dagar finns normalt inbyggt i mätinstrumentet, men inte för längre perioder. Mätdata behöver därför kunna flyttas från instrumentet till en lokal lagringsdisk för att ge plats för nya mätningar. Data behöver också kopieras till en server på annan plats för backup, arkivering, bearbetning, tolkning, etc.

### Åskskydd

Åskskydd är viktigt för installationer på fyllningsdammar eftersom de i många fall genom sitt terrängläge löper risk att utsättas för höga spänningsgradienter i samband med åskväder. Det kan också finnas risk för transienter från elproduktionsanläggningen och i samband med entreprenad- eller servicearbeten i anslutning till denna.

### Strömförsörjning

Strömförsörjning av ERT/DCIP utrustning sker oftast med batterier vid mobila mätningar. Det medför att instrumenten oftast är designade för att strömförsörjas via 12 V DC eftersom går att få tag på bilbatterier eller liknande i alla delar av världen. För fasta installationer på fyllningsdammar finns det normalt tillgång till 230 V AC, vilket enkelt görs om till 12 V DC eller annan lämplig spänning. Det är viktigt att det kan leverera tillräckligt med ström eftersom strömsändaren kan dra uppåt 40 A vid full uteffekt.

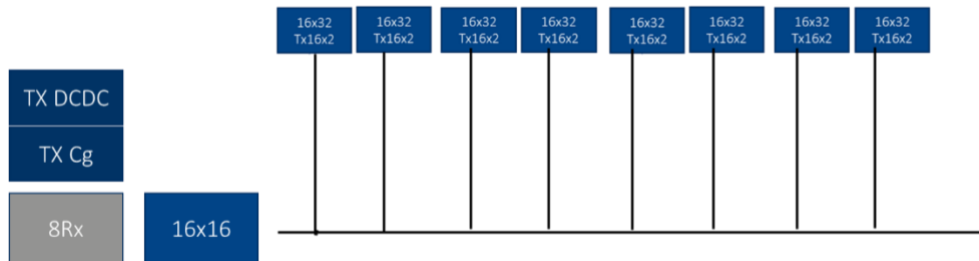
### Kapsling

ERT/DCIP instrument för mobila mätningar ställer stora krav på kapslingen eftersom det ska kunna fungera i alla tänkbara typer av miljöer och i alla väder. Det medför att utförandet på kapslingen ofta utför i klass IP68 vilket blir kostsamt. För fasta installationer för övervakning kan mätsystemet däremot ofta placeras inomhus eller i en mätcontainer, vilket medför att kravet på en klimattät inkapsling inte finns. Ofta är det praktiskt att samla alla delar i ett mindre 19" rackskåp.

### 5.2.3 Prototypsystem för ERT / DCIP-tomografi

En design av en flexibel instrument-plattform för ett mångkanaligt ERT / DCIP - instrument har anpassats för övervakning av fyllningsdammar enligt principskiss i Figur 42. Instrumentprototypen består av alla delar enligt föregående avsnitt vilka integreras i en 19" apparatlåda. 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

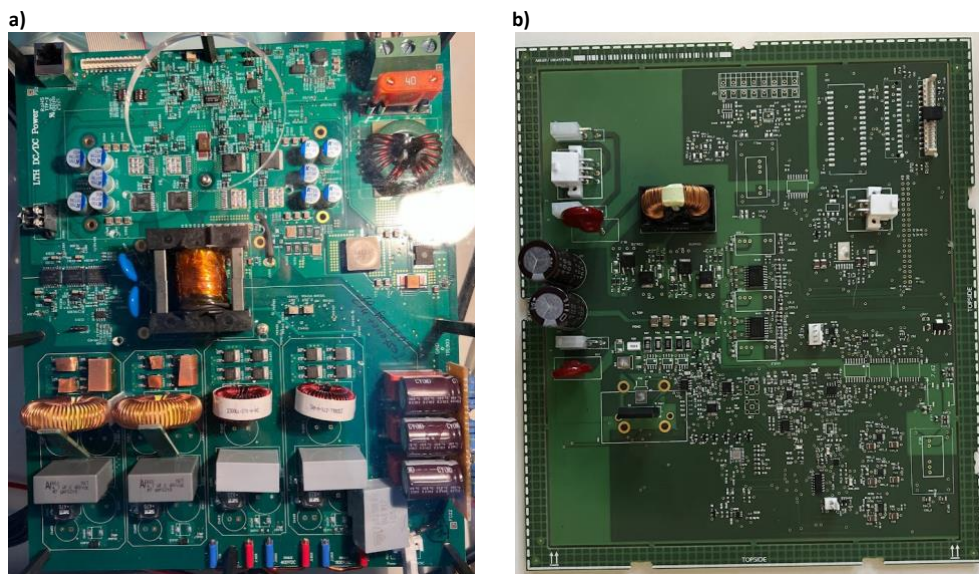
standard av dagens mätsystem. Instrumentprogramvaran har utformats så att den kan fjärrstyras via nätverksuppkoppling från en dator, pekplatta eller mobiltelefon.



**Figur 42.** Principiell uppbyggnad för modult och skalbart mätinstrument som i exemplet i principskissen är försett med 8 parallella mätkanaler (RX), strömsändare och reläväxel med stöd för 8 x 32 elektroder.

### Strömsändare

Strömsändaren består av en DCDC-omvandlare, strömregulator och polväxlare. Den drivs av 12 V DC nominellt, för att den ska vara generellt användbar och kunna drivas med konventionella blybatterier för bilar som normalt finns att tillgå oavsett var i världen man befinner sig. Konstruktionen är galvaniskt isolerad vad gäller styrsignaler 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. Två olika prototyper till DC/DC-omvandlare har utvecklats, vilka båda är dimensionerade för maximalt 600 V utspänning. Maximal utsänd ström ligger på 50 mA respektive 3 A, dock med en effektbegränsning på 30 W respektive 300 W. Figur 43a visar prototypkortet till 300 W DC/DC-omvandlaren, för vilken det dock var nödvändigt med många så kallade patchningar för att få den att fungera vilket gör att den inte lämpar sig för att tillverka fler exemplar. Figur 43b visar prototypen till strömregulator och polväxlare. Det pågår revidering av konstruktionen för den större DC/DC-omvandlaren för att göra den produktionsmässig, effektivare och kompaktare med målsättningen att få plats med alla delarna på ett kort.



Figur 43. Prototyp till strömsändare, a) 300 W DC/DC-omvandlare, b) strömregulator och polväxlare.

### Ingångs-, styr- och kontrolldel

Ingångssteget (mät delen) är modulärt uppbyggt med 8 stycken AD-omvandlare med 24 bitars upplösning per modul, plus olika mätområden inom intervallet  $\pm 2,5$  V till  $\pm 1000$  V. Ingångssteget innehåller även 2 stycken AD-omvandlare för att kunna mäta utsänd ström (via shunt) och spänning (Figur 44).

Konstruktionen är designad för att leverera 4000 mätvärden per sekund utan att påverkas i amplitud eller fas av något lågpassfilter, vilket uppnås genom 16 gångers översampling och digital filtrering. De olika delarna i ingångssteget styrs av en datormodul med en ARM-processor och en FPGA (Field-Programmable Gate Array) som tar emot data synkront från samtliga AD-omvandlare. Alla mätkanaler är galvaniskt skilda från varandra och från övriga delar av konstruktionen för att undvika så kallad common-modeproblematik.

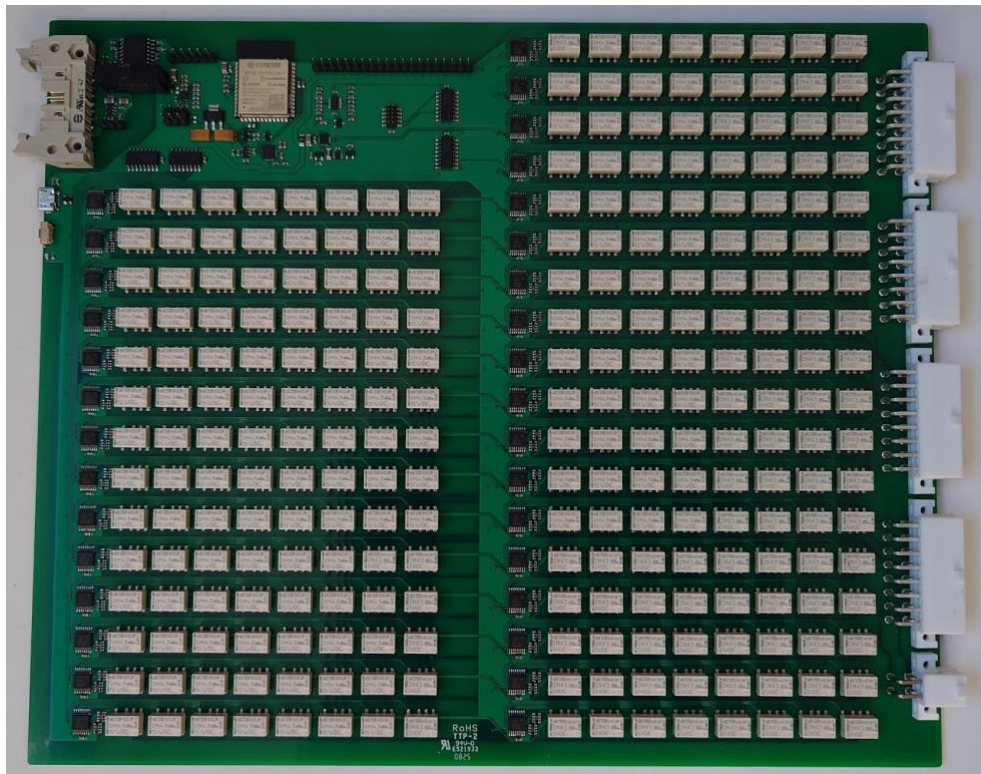


**Figur 44.** Ingångsprototypkort med 8 ingångskanaler, plus två mätkanaler för mätning av ström och spänning för sändaren, samt datormodul med FPGA och ARM-processor.

### Reläväxel

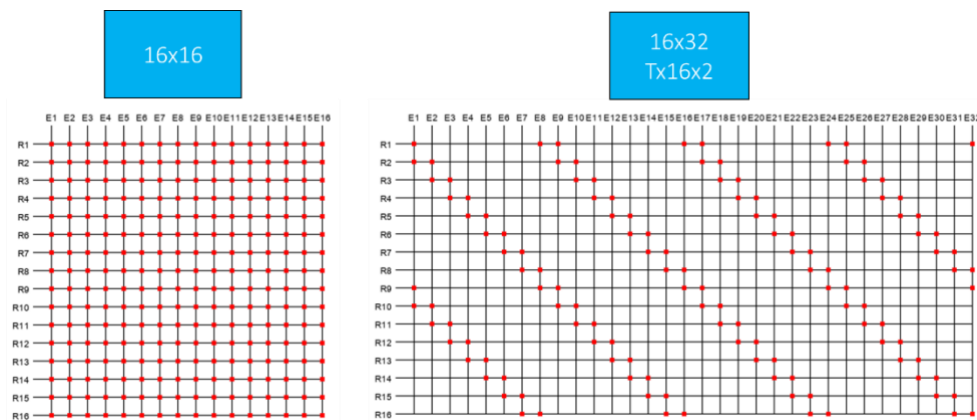
Reläväxeln (Figur 45) har designats så att den är modulärt expanderbar för att vara flexibel så att den kan konfigureras på olika sätt för olika behov. Den baserad på ett kort som kan bestyckas med upp till 256 reläer som kan koppas ihop på olika vis beroende på behoven, såsom antal mätkanaler i mätinstrument och antal elektroder i utlägg.

Ett fullt bestyckat kort kan konfigureras som en 16x16-matris som ansluts till ett ingångskort med 8 mätkanaler (Figur 46), vilket i sin tur kan kopplas till ett godtyckligt antal kort som är konfigurerade som 16x32-matriser som inte är fullbestyckade. Varje reläkort med 16x32-matris är avsett att hantera 32 elektroder, så att det ska vara möjligt att anpassa instrument till att ha stöd för det antal elektrodkablar som finns i ett mätsystem.



Figur 45. Flexibelt reläkort som kan konfigureras på olika sätt beroende på behov (reviderad design baserad på test av en första prototypversion).

Reläkorten är designade så att alla reläväxlingar kan övervakas för att verifiera funktionen så att reläfel upptäcks och felrapporteras genast.

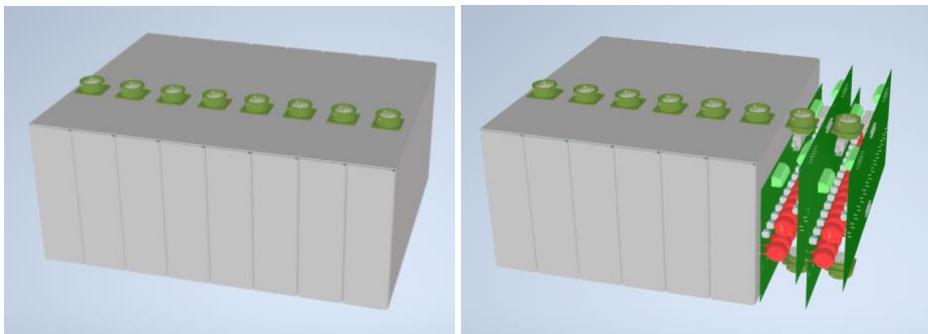


Figur 46. Principuppbyggnad för modulärt expanderbar reläväxel.

### Åskskydd

En design för modulärt transientskydd (åskskydd) har tagits fram som bygger på gasurladdningsrör, eventuellt kompletterat med varistorer. Ett gasurladdningsrör är en elektronisk komponent som normalt sett är elektriskt isolerande, men så snart spänningen över den ligger under dess dimensionerade spänning kortsluts den momentant. Det krävs individuellt transientskydd för varje enskild elektrod i ett utlägg, och eftersom standardkontaktdonet som används för ERT och DCIP har

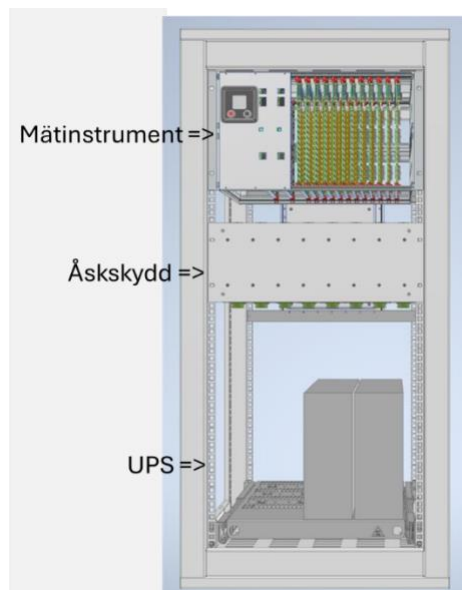
plats för 32 elektroder har transientskyddet designats med 32 kanaler på varje kretskort för att passa till den typ av kontaktdon som används som standard för ERT/DCIP. Transientskyddet monteras i en egen isolerad låda för att separera skadliga signaler från mät delen i instrumentet, det skulle dock vara möjligt att bygga in den som en isolerad del av en större apparatlåda om det är motiverat.



Figur 47. Modulerat transientskydd (åskskydd) med 32 elektroder per modul.

### Kapsling

Mätinstrumentet inklusive reläväxel byggs ihop i en apparatlåda för 19" rack (Figur 48), och kan monteras i exempelvis ett golvskåp av lägre modell eller ett mindre väggskåp.



Figur 48. Koncept för mätsystem för övervakningsinstallationer (täckplåt för botten och högra delen av instrumentlådan borttagna för att visa uppbyggnaden).

### 5.2.4 Sensor för vattenresistivitet och temperatur

Det är viktigt att mäta vattnets resistivitet och temperatur i uppströmsmagasinet för att kunna förstå vilken inverkan som variation i joninnehåll respektive temperatur kan ha på årstidsvariationerna i resistivitet inne i dammen. Det är också avgörande om det ska vara möjligt att göra mera avancerad modellering och

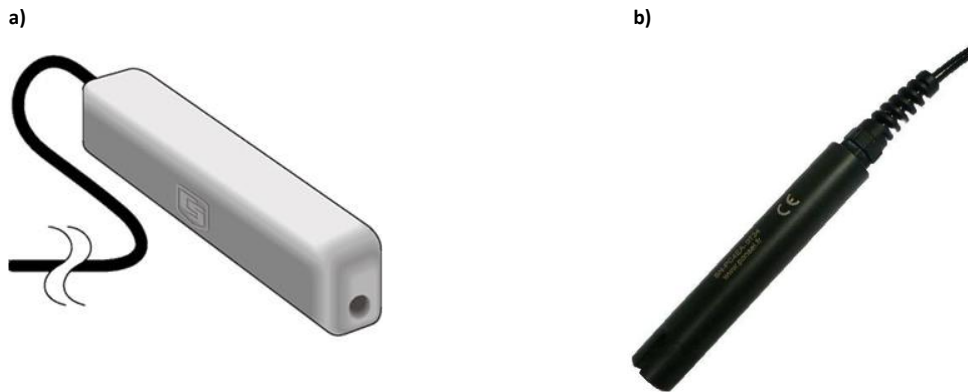
tolkning av årstidsvariationerna och hur de kopplar till fyllningsdammens tillstånd.

Det finns veterligen inga kommersiellt tillgängliga sensorer som explicit är avsedda för att mäta vattnets resistivitet, men genom att mäta konduktivitet kan den enkelt beräknas. Eftersom konduktiviteten är temperaturberoende anges den nästan alltid med temperaturkompensation, vanligen motsvarande 25°C. Alla konduktivitetssensorer mäter temperatur, vilket också är en viktig parameter i denna tillämpning där det är viktigt att veta vattnets konduktivitet (resistivitet) utan temperaturkompensation. Det är också viktigt att vara uppmärksam på att konduktiviteten sparas med tillräcklig numerisk upplösning. Tyvärr är standardinställningen för vanligt förekommande dataloggrar ett fast antal decimaler, som ger undermålig upplösning när den låga konduktiviteten som är typisk i svenska kraftverksmagasin konverteras till resistivitet. Detta löses enkelt genom att spara mätvärdena som flyttal med exponent och ett fast antal värdesiffror.

#### Existerande sensorer

Många av konduktivitetssensorerna på marknaden bygger på 2-elektrodmätning där samma elektroder används för att skicka ström och mäta spänning, och de använder typiskt en mätsignal på hundratals Hz. Den typen av sensorer är känsliga för längd på kabeln och beläggningar på elektroderna, vilket kan leda till ökande fel med tiden som är svåra eller omöjliga att identifiera enbart genom att analysera mätdata. Det finns risk att mätvärdenas absolutnivåer avviker från vad man skulle få vid mätning med fyra elektroder vid DC eller enstaka Hz, varför 2-elektrodmätning bör undvikas.

Det finns ett par olika kommersiellt tillgängliga sensorer med 4-elektrodmätning, vilka egentligen mäter resistans även om det inte uttrycks så i datablad. Modell CS546A (Figur 49a) har rostfria ringelektroder som sitter skyddade inuti sensorn som ska monteras så att det kan bli cirkulation av vatten genom den. Den använder systemjord som den ena strömelektroden vilket beroende på hur jordningen är utförd kan påverka absolutnivån på den uppmätta konduktiviteten. Kalibreringsosäkerheten i det mätintervall som är representativt för vatten i svenska fyllningsdammar anges till 10% vilket framstår som högt. Modell C4E (Figur 49b) har två grafitelektroder för strömsändning och två platinaelektroder för spänningsmätning, där noggrannheten anges vara 1% av maximal konduktivitet vilket borde betyda  $\pm 0,5 \Omega\text{m}$  i typiska vatten i svenska kraftverksmagasin. Båda sensorerna bör monteras så att de enkelt kan tas upp för rengöring, hur ofta det behöver göras torde bero på vattenkvalitet, biologisk aktivitet, etc. Det framgår inte vilken frekvens för mätsignalen som någondera av sensorerna använder.



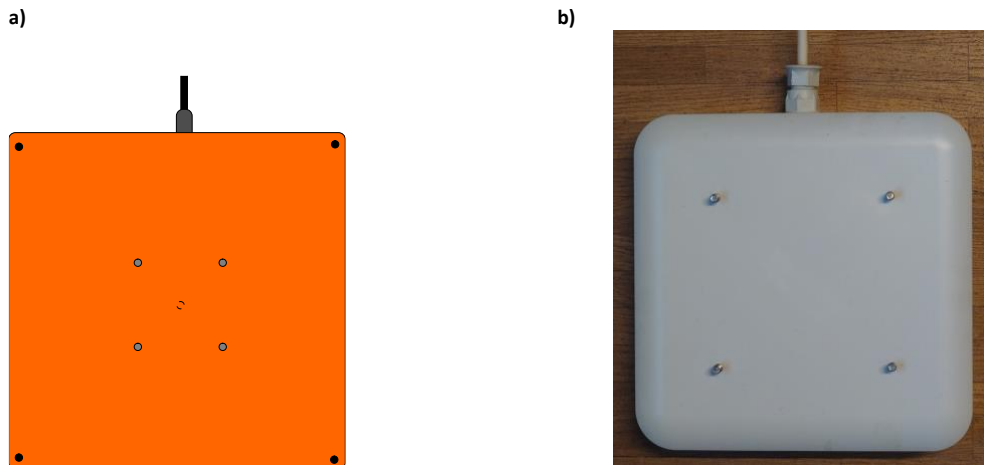
Figur 49. Kommerciellt tillgängliga sensorer för vattenkonduktivitet och -temperatur; a) Campbell Scientific CS547A, och b) Ponsel C4E.

### Prototypsensor

Inom ramen för detta projekt har vi skissat på tänkbar design för en "square array" sensor för vattenresistivitet och -temperatur (Figur 50a). Den bygger på:

- Platta av PUR (polyuretan) med egenskaper som gör den styv, flexibel & slagtålig.
- Hål för skruv i hörnen.
- Elektroder av rostfritt stål alternativt grafit.
- Pt1000-givare för temperatur.
- Kopplas via kabel till mätinstrument för ERT / DCIP eller datalogger med datasändning.

En fördel med denna design är att den kan förväntas vara mera robust vad gäller påväxt än vad sensorer med mindre elektroder är. Vidare möjliggör den mätning av reciproka data så att det går att beräkna mätfelens storlek. Dock kan det vara svårare att montera den så att man kan ta upp den för rengöring på ett enkelt sätt om det trots allt skulle behövas, så att det kan behöva utföras när dykare är på plats. Vi har byggt och testat en prototyp baserad på en platt apparatlåda av plast som fylldes med gjutmassa av PUR efter inkoppling av de rostfria elektroderna och Pt1000-givaren (Figur 50b).



Figur 50. a) Tankbar design av "square array" sensor med inbyggd Pt1000-givare gjord av en flexibel platta gjuten av PUR (polyuretan), och b) prototypsensor med elektroder av rostfritt stål och inbyggd Pt1000-givare för temperaturmätning, där plasthöljet efter montering av anslutningar fylldes med gjutmassa av PUR och utfyllnadsmaterial.

### 5.3 PROGRAMVARA

#### 5.3.1 Allmänt

Ett komplett automatiserat övervakningssystem måste vara tillförlitligt och stabilt, så att det inte hänger sig så att man förlorar mätdata i ett kritiskt skede av ett experiment som har varit tidsödande och dyrt att förbereda och som kanske inte är möjligt att upprepa. Det kräver flera programvarukomponenter för att kunna fungera hela vägen, där det först och främst måste det finnas en pålitlig datainsamlingsprogramvara för kontinuerliga mätningar, som ska fungera stabilt och utan avbrott i datainsamlingssystem. Helst ska den kunna användas av icke-expertter så att datainsamlingen konfigureras utan detaljerad kunskap om programmeringsspråk och kommandon som krävs för att styra mätinstrument och kringkomponenter. Vidare krävs rutiner för att hantera erhållna data, d.v.s. för att överföra dem från "fältet" till "kontoret" och för att ge varningar när data saknas, är otillräckliga eller av otillfredsställande kvalitet.

#### 5.3.2 Instrumentprogramvara

För att kunna använda och testa delarna i instrumentprototypen, d.v.s. styr- och kommunikationsdel, ingångssteg, strömsändare och reläväxel, har det varit nödvändigt att skriva programvara som styr hårdvaran och läser ut data ur den. Detta 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 för 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 applikation från en dator, pekplatta eller smarttelefon, vilket också medför att den enkelt kan fjärrstyras.

### 5.3.3 Programvarusvit för datainsamling och databearbetning

Vi har utvecklat metodik och prototypprogramvara som hanterar hela processen för automatiserad övervakning med ERT / DCIP. Utveckling, testning och verifiering av processen som helhet och de olika delstegen har gjorts med fasta installationer av mätsystem för ERT / DCIP i testdammen i Älvkarleby och Damm 4 (avsnitt 4.2.5, sida 35) som testbänk. Resultat från dessa har presenterats av Norooz et al. (2024) och Dahlin et al. (2023), och ytterligare resultat från testdammen i Älvkarleby kommer att publiceras framöver. Utvecklingsarbetet bygger på metodik, erfarenheter och algoritmer som har tagits fram i tidigare projekt (t.ex. Nivorlis et al. 2022; Johansson et al. 2005), vilka har reviderats genomgripande för utökad funktionalitet och stabilitet.

Följande steg ingår (Nivorlis et al. in review):

- Schemastyrd mätning (vanligen varje dygn)
- Lokal lagring av data
- Dataöverföring till server
- Dataprocessering / filtrering (nätstörningar, transienter, etc.)
- Datakvalitetskontroll (t.ex. mätfelsanalys m.h.a. reciproka data) med visualisering av mätdata
- Integration av koordinater med data
- Export till dataformat för inversmodellering
- Inversmodellering inklusive "time-lapse"-inversion
- Export av modeller till lämpligt format för vidare bearbetning
- Visualisering av geofysiska modeller och variation / förändring i tiden

Slutligen vore det önskvärt med ytterligare ett steg som dock ligger utanför ramarna för detta projekt:

- Automatiserad tolkning av de geofysiska modellerna i termer av dammsäkerhetstekniskt relevanta parametrar

Databearbetningen sker huvudsakligen i Python, som har bred användning i forskarvärlden och blir allt populärare inom industrin. Det finns en rik tillgång till programbibliotek med öppen källkod utan kostnad, vilket är bra för möjlighet till anpassning för olika behov samt att fler kan bidra till utveckling av ny funktionalitet.

Programkoden för automatiserad mätning och dataöverföring till en server finns tillgänglig här: <https://github.com/anivorlis/GeMeasPy>

Programkoden för datahantering, -filtrering och kvalitetskontroll av tidserier finns tillgänglig här: <https://github.com/anivorlis/GeMonPy>

De olika stegen beskrivs summariskt nedan.

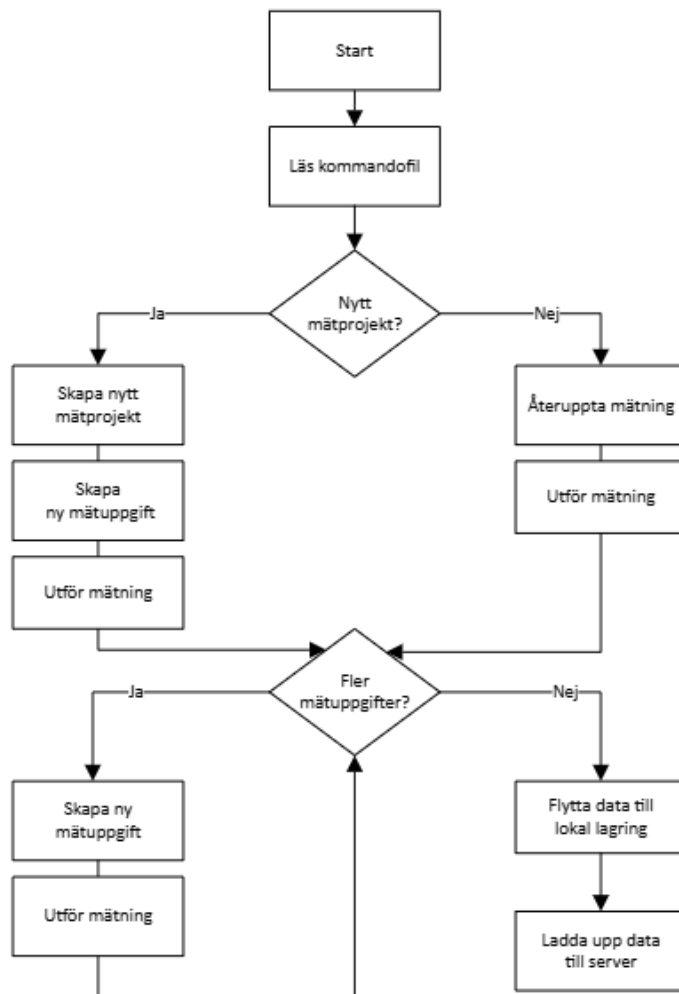
### **Schemastyrd mätning och databearbetning etc.**

Mätningen initieras automatiskt med hjälp av skript med instruktioner till mätinstrumentet / mätkontrolldelen att starta mätning med en specificerad utläggsdefinition (spread file), mätsekvens (protocol file) och uppsättning mätinställningar. Filerna med utlägg och mätsekvens skrivs i XML-format och utgår från definitionerna som används av det kommersiellt tillgängliga instrumentet ABEM Terrameter LS2 (Guideline Geo 2024), med olika tillägg.

Om mätningen styrs från operativsystemet Linux används cron för att schema-lägga när den ska ske, vilket motsvarar Windows Scheduler. Mätning upprepas vanligen en gång per dygn för fyllningsdammar, eftersom variationerna i en fyllningsdamm förväntas vara relativt långsamma. Samtidigt är det en fördel att mäta tillräckligt ofta för att kunna filtrera mätdata med antagandet att det ska vara små förändringar från en dag till en annan.

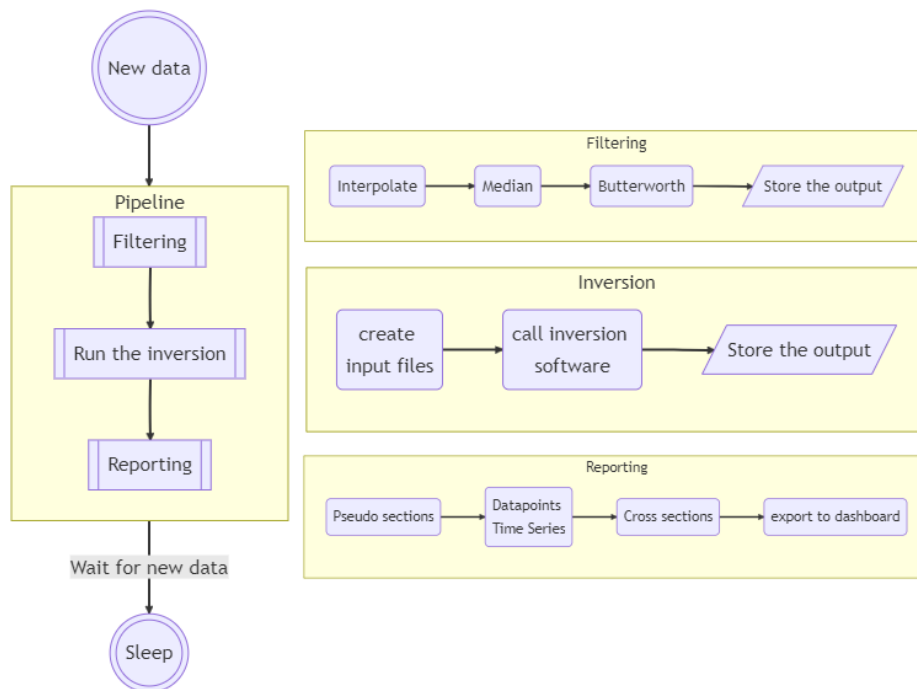
Data från ett mättillfälle (en dag i detta fall) samlas som ett projekt ("project"). Ofta delas mätningarna i flera delar som kan kallas uppgifter ("tasks"), till exempel för varje mätutlägg eller delsträcka av mätutlägg. Samtliga mätdata knutna till ett projekt, i form av medelvärdesbildade mätdata, lagras i en projektdatabasstruktur tillsammans med komplett dokumentation av mätinställningar, elektrodkoordinater, typ och version för alla ingående delar i mätsystemet med serienummer, programvaruversioner, etc. (se Bilaga B). Utöver detta sparas de enskilda mätvärdena med en datahastighet på 4 kHz, rådata i form av "full waveform data" (FWD), i separata binärfiler för varje strömsändning eftersom datafilerna annars skulle blir ohanterliga.

Mätprocessen (Figur 51) innehåller hantering av det kompletta mätprogrammet för ett mättillfälle (en dag) med funktionalitet för att starta från början eller återuppta mätning efter ett eventuellt avbrott på grund av en oförutsedd händelse (exempelvis strömavbrott).



**Figur 51.** Flödesdiagram för processen som utförs vid varje mättillfälle, t.ex. en gång per dygn. All data som genereras i ett projekt sparas i en databas, med undantag för full waveform data (FWD) som sparas i separata binärfiler för varje strömsändning eftersom filerna annars skulle bli ohanterligt stora.

Ett komplett flöde för automatiserad hantering av övervakningsdata (Figur 52) har utvecklats och tillämpats på data från data som mäts med hjälp av processen i Figur 51, vilket kommer att publiceras med öppen källkod (Nivorlis et al. in review).



Figur 52. Flödesdiagram för databearbetning (Nivorlis et al. in review).

### Lokal lagring av data

Mätdata från en kortare period, som några dagar eller mer, får normalt plats lokalt i mätinstrumentet. Eftersom FWD med ca 4 kHz datahastighet sparas för samtliga mätkanaler genereras relativt stora mängder data, där mängden beror på storleken på elektrodutlägggen, mätprotokoll och mätinställningar. Som exempel kan nämnas att det under långtidsövervakningen av testdammen i Älvkarleby genererades över 3 GB data varje dag, sammanlagt 1,2 TB per år, med de mätprotokoll och mätinställningar som användes mot slutet av perioden. Det blir därför nödvändigt att flytta data till ett annat lokalt lagringsmedium som till exempel en hårddisk eller SSD.

### Dataöverföring till server

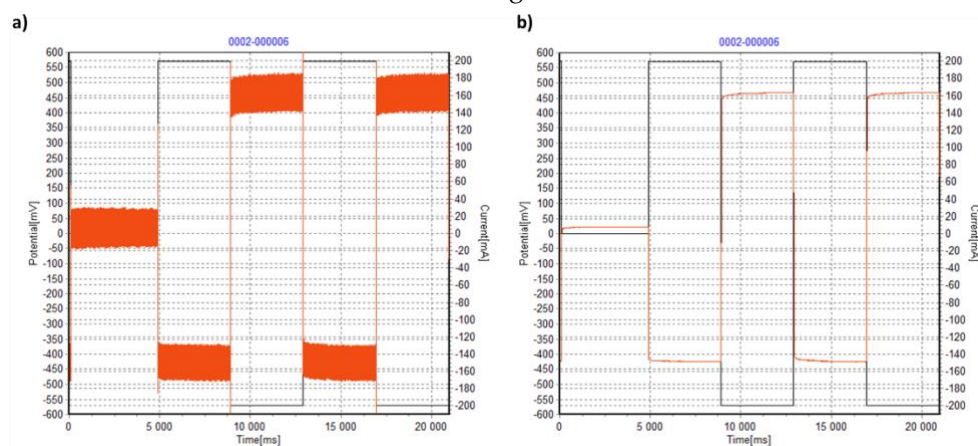
Dataöverföring till en server sker med SFTP som dagligen kopplar upp sig mot en dataserver och för över nya mätdata. Dataöverföringsrutinen inkluderar kontroll av att data har förts över i sin helhet med kvittering från servern när så har skett. Ifall dataöverföringen misslyckas eller blir ofullständig görs ett nytt försök följande dag(ar) tills kvittering på att den är komplett har erhållits. De stora datamängder som genereras när FWD sparas ställer krav på bandbredden i nätverksuppkopplingen, och ifall det inte finns möjlighet till annat än mobilt nätverk med begränsad bandbredd kan ett alternativ vara att enbart föra över projektdatabaserna. FWD får då sparas lokalt för manuell kopiering till lämpligt lagringsmedium och skickas av personal på plats.

### Databearbetning och filtrering

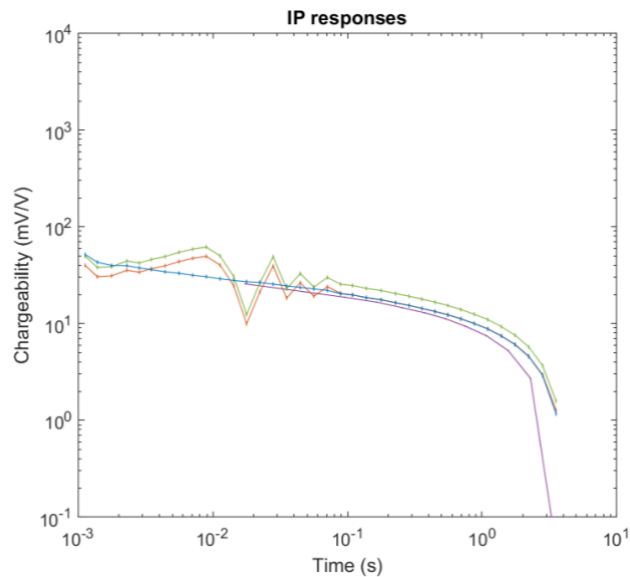
Bearbetning av uppmätta rådata är nödvändig för att beräkna skenbar resistivitet och IP-effekter. Bearbetningen kan ske på olika nivåer och ambitionsnivåer

beroende syfte, mätmiljö, etc., där den mest grundläggande är att medelvärdesbilda över ett helt antal cykler av elnätsfrekvensen för mätningar med ett antal strömpulser med omvänd polaritet. För att extrahera mätdata med bästa möjliga kvalitet och för att extrahera data med brett spektralt informationsinnehåll krävs mera avancerad databearbetning och filtrering, till exempel med en kombination av olika metoder enligt Olsson et al. (2016).

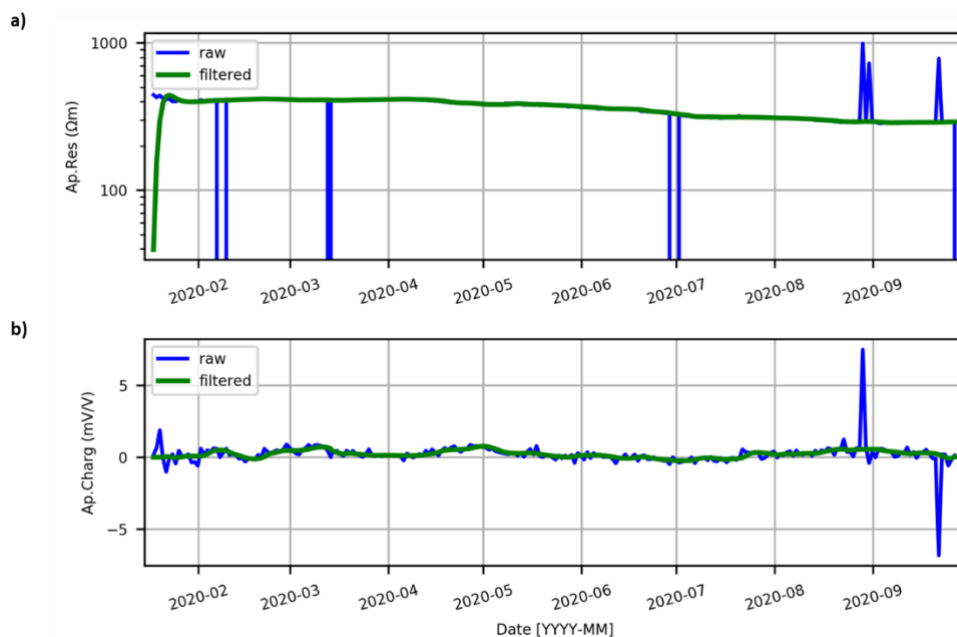
Ett exempel på FWD visas i Figur 53. Tack vare att FWD sparas är det möjligt att göra avancerad signalbehandling och filtrering av data för att ta bort harmoniska signalstörningar från elnät och spårbunden trafik, transienter från elstaket, atmosfäriska störningar, etc. baserat på Olsson et al. (2016). Denna filtrering reducerar mätstörningarna och utökar det spektrala signalinnehållet i data. Figur 54 visar ett exempel på resulterande IP-avklingning för en mätdatapunkt från Damm 4, där lila kurva är data från instrumentets projektdatabas medan blå visar filtrering baserat på Cole-Colemodell med en storleksordning kortare avklingningstider. De andra två kurvorna (linjär respektive exponentiell modell) visar att kraftiga harmoniska störningar påverkar data och ger taggiga avklingningskurvor. Den kan exekveras på nya data efterhand som de förs över till servern, varvid de filtrerade mätvärdena lagras i en extra tabell i databasen.



Figur 53. Exempel på full waveform data från Damm 4, där svart kurva är utsänd ström och orange kurva visar mätvärden för en 4-elektrodkombination; a) uppmätta data, b) medelvärdesbildade över perioder på 20 ms (50 Hz).



Figur 54. Exempel på utökat spektralt signalinnehåll med hjälp av signalbehandling och filtrering av rådata (lila = data från instrumentet projektdatabas, filtrering med; grön = linjär, röd = exponentiell, blå = Cole-Cole modell).



Figur 55. Exempel på filtrering av data baserat på tidsserie för en elektrodkombination; a) skenbar resistivitet, b) skenbar uppladdningsförmåga.

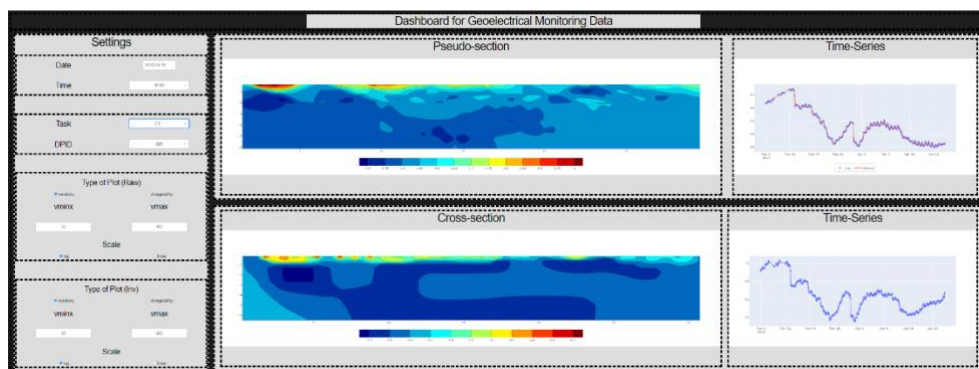
En annan typ av filtrering av data som har implementerats och testats är tidbasfiltrering, vilket bygger på att alltför stora förändringar i mätdata från en dag till en annan är osannolika. Här skapas en tidsserie av mätdata från en viss fyrelektrodkombination vilken filtreras i två steg. Det första steget är avlägsnande av transienter ("despiking") där enstaka kraftigt avvikande mätvärden tas bort, som i exemplet med skenbar resistivitet i Figur 55a. Nästa steg är lågpasfiltrering för att undertrycka brus som kan orsakas av låga signalnivåer i förhållande till

olika störkällor, som illustreras av integrerad IP-effekt i Figur 55b, och som anpassas efter signalseriernas utseende och vad som är möjlig förändring i tiden med utgångspunkt från de fysikaliska förutsättningarna.

### Datakvalitetskontroll

Datakvalitetskontroll kan göras genom beräkning av mätfel från reciproka datapar, men eftersom det är tidskrävande att mäta reciproka data görs detta vanligen endast för en mindre del av data (t.ex. 10%). Detta kan göras helt automatiserat och ligga till grund för att utlösa ett alarm ifall felen överstiger vissa kriterier. Det kan appliceras på såväl resistivitetsdata som IP-effekter.

Visualisering av mätdata i form av exempelvis pseudosektioner eller "multi-profile plot" är användbart för kvalitativ granskning av personer involverade i övervakningen, men är inte omedelbart tillämpligt för automatiserade larm avseende datakvalitetsproblem.



**Figur 56.** Prototypgränssnitt till interaktiv geoelektrisk kontrollpanel som körs på en webbserver där användare kan logga in. Det är möjligt att visualisera data genom att välja datum, tid, uppgift och mät-id. Resultaten som visas i exemplet är från ett testexperiment där data samlades in var tredje timme, där resultaten bearbetats genom den datapipeline som presenteras här och visualiserats genom kontrollpanel. Ytterligare visualiseringsalternativ är möjliga men kräver att källkoden byggs ut (Nivorlis et al. in review).

### Integration av koordinater med data

Mätningen för varje "task" sker av praktiska skäl med ett för utlägget eller delutlägget lokalt koordinatsystem, och data behöver därför paras ihop med de verkliga koordinaterna för elektrodernas positioner med hjälp av en koordinattabell. För mätningar av data som har gjorts i flera delar som ska inverteras tillsammans, behöver data kombineras ihop efter att de har parats ihop men sina respektive koordinater.

### Export till dataformat för inversmodellering

För att skapa en modell av de elektriska egenskapernas fördelning i den undersökta volymen utifrån mätdata, i denna tillämpning fyllningsdammen, exporteras data i ett format som inversionsprogrammet kan läsa. Olika inversionsprogram (t.ex. Res2dinv, Res3dinv, pyGIMLi) använder olika dataformat, och det kan vara olika för samma programvara beroende på om det är

avsett för 2D- eller 3D-modeller, om olika tidssteg ska kombineras, samt om det bara avser resistivitet eller också IP-effekter.

### **Inversmodellering**

Inversmodelleringen startas med batch-anrop där namn på indatafil och inställningsfil anges. Inversionen kan utföras på enskilda dataset eller som så kallad "time-lapse"-inversion med mjukhetsband mellan de olika tidsstegen. De skapade modellerna sparas i ett format som är unikt för inversionsprogrammet.

### **Export av skapade modeller**

Modellerna exporteras i ett format som är lämpligt för vidare bearbetning, t.ex. generellt textformat eller VTK-format (för ParaView). Exporten kan avse egenskaperna vid ett visst tidssteg eller förändring i förhållande till data från en referenstidpunkt (bakgrundsdata).

### **Visualisering**

Inverterade geofysiska modeller kan visualiseras i form av vertikala sektioner (), medan 3D-visualisering inte har implementerats. Ytterligare typer av visualisering som vore intressanta att implementera är tidsseriediagram för utvalda modellceller för analys av variation / förändring i tiden. Vidare exempelvis relativ variation eller förändring i sektioner eller volymer.

### **Automatiserad tolkning**

I slutändan vore det önskvärt med verktyg för att tolka inversionsresultaten i termer av dammsäkerhetstekniskt relevanta parametrar, genom att analysera de skapade geofysiska tvärsnitten eller volymmodellerna och hur de varierar i tiden. Ett intressant tillvägagångssätt kan vara att tillämpa maskininlärningsmetoder, såsom neurala nätverk som kan hjälpa till att identifiera potentiella svaghetszoner, men detta ligger utanför detta projekts ramar. Ett föreslaget arbetsflöde som presenteras i detta dokument fokuserar på automatisering av datainsamling, bearbetning och visualisering av resultaten.

### **Datalagring och backup**

För att säkerställa att man inte förlorar mätdata måste det finnas backup genom att kopior av data lagras på olika fysiska platser. Detta kan inkludera:

- Lokalt lagrade data på mätplatsen (om tillräcklig kapacitet finns och byggs ut vid behov).
- Dataserver med RAID (förslagsvis RAID 6 som medger att två diskar går sönder utan att data förloras).
- Backup på dataserver på annan plats.

## **5.4 MÄTFÖRSÖK MED PROTOTYPINSTRUMENT**

Ett mätförsök med prototypinstrument och -programvara har genomförts på ett fast installerat elektrodlägg med 32 elektroder i form av nergrävda rostfria

stålplåtar, med c/c 1 m, där såväl elektrod kabel som elektroder är av samma typ som använts till installationer för dammövervakning. Elektrodutlägget är installerat på ca. 3 dm djup under en gräsmatta i ett område med moränlera, i anslutning till borrhålet LTH-1 bakom V-huset på LTHs campus, vilket är relevant för fyllningsdammar eftersom tätkärnan normalt består av finkornig morän. Kombinationen av elektrodplåtar och finkornig jord ger låga kontaktmotstånd kring i medeltal 100  $\Omega$ .

#### 5.4.1 Mätförsök i begränsad skala

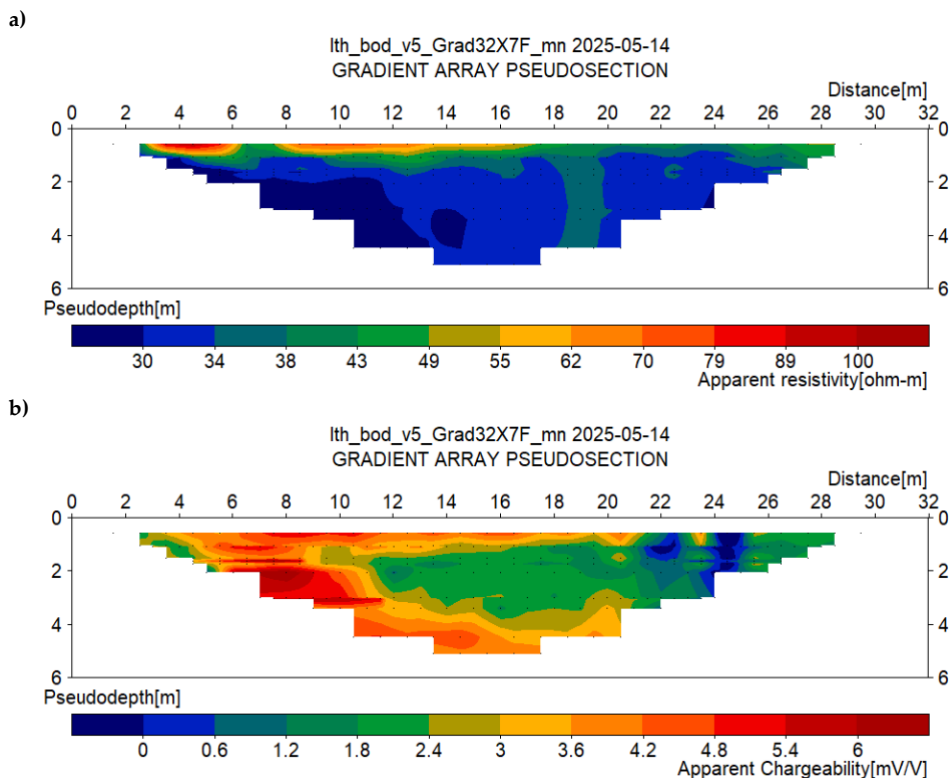
Vid mätförsöket användes ett prototypinstrument med 8 mätkanaler och en 30 W strömsändare. På grund av att designen av reläkorten har reviderats, men systemintegreringen inte blivit färdig, användes en befintlig äldre reläväxel (ABEM Electrode Selector ES10-64C) vilket begränsade mätningen till 7 parallella mätkanaler. Mätningarna gjordes i 100 % IP duty cycle mode. Utsänd ström var 20 mA och strömpulsens längd 1 s, med 2 stackningar (upprepningar av mätcykeln). Rådata samlades in med 32 kHz datahastighet vilket medelvärdesbildats till skenbar resistivitet respektive skenbar uppladdningsförmåga/IP-effekt över ett antal hela multipler av perioden för elnätsfrekvensen 50 Hz. Variationerna i bakgrunds nivåer filtrerades bort med linjär approximation.

Mätegenskaper och mätmetodiken har testats och utvärderats genom att göra reciproka mätningar för att ge möjlighet att kvantifiera mätdatakvaliteten för såväl resistivitets- som IP-data. Data har tyvärr inte kunnat bearbetats med signalprocessering enligt Olsson et al. (2016) som följd av att den programkoden inte hunnit anpassas till den aktuella versionen av rådataformatet, vilket begränsar möjligheterna att utvärdera mätegenskaperna fullt ut.

#### 5.4.2 Resultat

##### Resistivitet och IP-effekt

Pseudosektionerna för resistivitet från mätning med multipel gradientkonfiguration visas i Figur 57a, medan motsvarande för uppladdningsförmåga/IP-effekt visas i Figur 57b. Pseudosektionernas sammanhängande utseende vittnar om god datakvalitet.



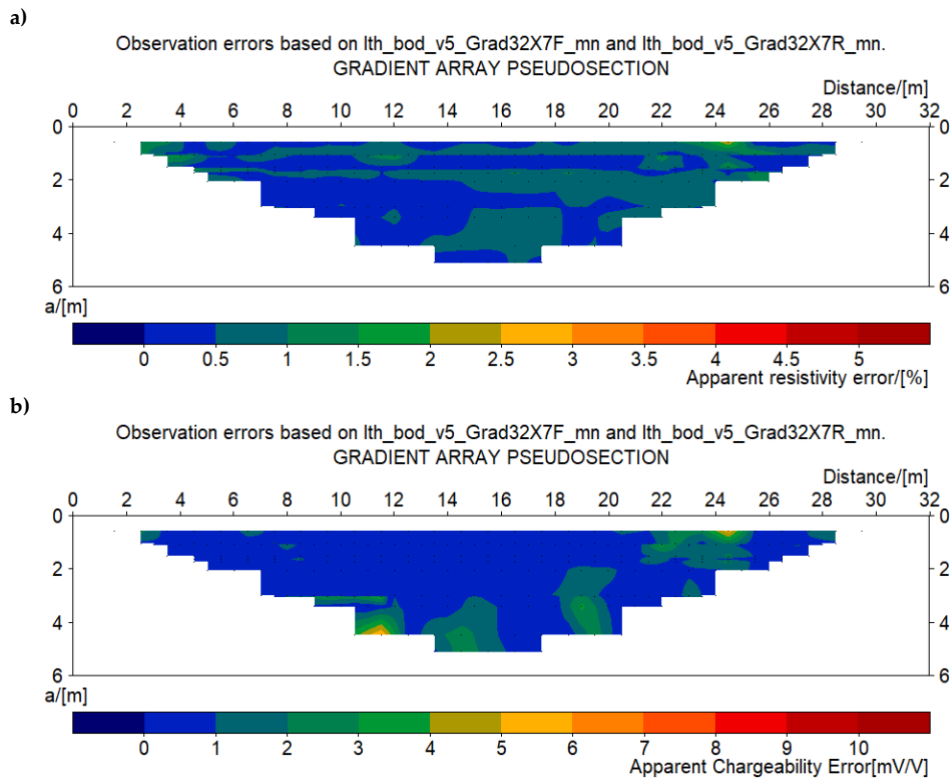
Figur 57. Pseudosektioner från mätning med multipel gradientkonfiguration med DCIP prototyp; a) resistivitet, b) uppladdningsförmåga/IP-effekt.

### Kvantifiering av mätfel

Mätfelen för uppmätta data har beräknats från de reciproka dataparen. Resultatet för skenbar resistivitet, i form av en pseudosektion i Figur 58a, visar att mätfelen till övervägande del ligger under 1 % och som mest uppgår till ett par procent. Medelfelet ligger på 0,54 %, med median 0,45 % och standardavvikelse 0,42 %.

Mätfelen för uppmätt skenbar uppladdningsförmåga (Figur 58b) ligger omkring 1-2 mV/V med ett medelvärde på 0,72 mV/V. D.v.s. det uppskattade mätfelet ligger under 1 ‰ av den spänning som genereras av den utsända strömmen, med medianfel 0,43 mV/V och standardavvikelse 0,83 mV/V. Det bör påpekas att det är mycket låga värden på uppladdningsförmågan som har mätts upp i detta fall.

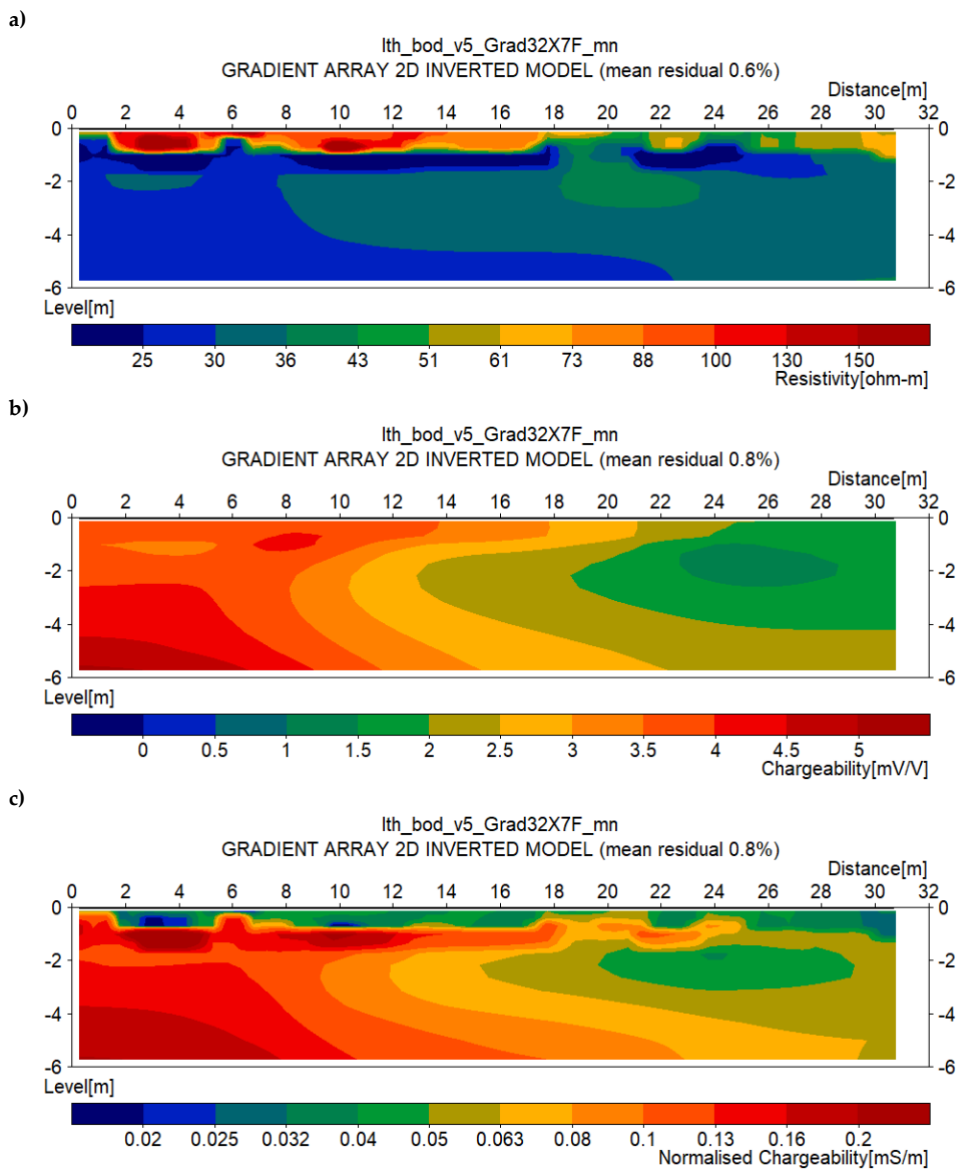
Feluppskattningar som görs med hjälp av reciproka data ger en överskattning av felen för de "normala" mätningarna för multipel gradientkonfiguration. Det beror på att de reciproka mätningarna görs med mycket längre avstånd mellan potential-elektrodena vilket i sin tur gör att de har lättare att plocka upp mätstörningar. Vidare kan det påpekas att felanalysen har gjorts på data som inte har bearbetats med signalprocessering som följd av att den programkoden inte hunnit anpassas till den senaste versionen av rådataformatet, det finns således utrymme för ytterligare förbättring av



**Figur 58. Observation error pseudosektion för DCIP prototyp;**  
 a) resistivitet (medelvärde 0.54 %, median 0.45 %, standardavvikelse 0.42 %)  
 b) IP-effekt (medelvärde 0.72 mV/V, median 0.43 mV/V, standardavvikelse 0.83 mV/V).

### Inverterade modeller

Mätdata har inverterats med hjälp av Res2dinvx64 ver. 4.08 med så kallad robust inversion (L1-norm), och en V/H-faktor på 0,25 som premierar horisontella strukturer vilket förväntas här. De inverterade modellerna (Figur 59) har residualer som i medeltal ligger under 1 %, d.v.s. genomsnittlig skillnad mellan uppmätta data och modellrespons, vilket är mycket bra och vittnar om utmärkt datakvalitet. De inverterade sektionerna stämmer väl överens med resultat från andra mätinstrument som har gjorts på samma mätutlägg.



Figur 59. Modellsektioner från invertering av data från mät försök med multipel gradientkonfiguration med DCIP prototyp; a) resistivitet, b) uppladdningsförmåga/IP-effekt, c) normaliserad uppladdningsförmåga/IP-effekt.

## 5.5 DISKUSSION

Elektroinstallationerna är kritiska för kvalitet och upplösning för ERT/DCIP, och för högre dammar kan det vara nödvändigt att elektroder inte bara installeras längs krönet där det är relativt enkelt, utan också på större djup inne i dammen för att uppnå tillräcklig upplösning. Konceptet med elektroder på olika nivåer i finfiltren har visats fungera väl i testdammen i Älvkarleby, men för att tillämpa det på existerande dammar behöver teknik för elektroinstallation utvecklas och testas.

Det saknas idag färdiga kommersiellt tillgängliga lösningar som är anpassade för långtidsövervakning av fyllningsdammar. Vi har utvecklat ett prototypsystem för övervakning som är flexibelt uppbyggt för att det ska kunna anpassas för olika storlekar på elektrodlägg. Detta innebär bland annat att det är designat för att enkelt kunna anpassas till olika antal och storlekar på elektrodlägg beroende på mätobjektets förutsättningar, likaså kan antalet mätkanaler varieras efter mätbehov. De olika delarna i instrumenthårdvaran har testats och verifierats var för sig, men det har visat sig behövas revidering av konstruktionen för strömsändare och reläväxel för att uppnå önskade egenskaper vilket har tagit tid att genomföra. Det återstår att göra olika varianter av reläkorten för att optimera konstruktionen för att bli riktigt flexibel för övervakningstillämpning. Det kommer vidare att behövas ytterligare integrering av hur de olika delarna samverkar för att uppnå full funktionalitet.

Den prototypprogramvara som har utvecklats inom ramen för detta projekt hanterar hela dataflödet från daglig mätning över samtliga steg fram till visualiserade modeller. Programvaran har använts för övervakningsmätning på två fyllningsdammar och i samband med det har den gradvis förbättrats och stabiliserats. Genom att göra den tillgänglig med öppen källkod är förhoppningen att den ska kunna användas för olika tillämpningar och av andra aktörer som därigenom kan bidra till att lägga in ny funktionalitet. Genom att fler använder den kan buggar och svagheter upptäckas och åtgärdas så att stabiliteten förbättras.

Mätförsök med prototypinstrumentet resulterade i data med mycket god datakvalitet trots att det inte var möjligt att använda avancerad signalprocessering än. Det senare medför dock att det bara har varit möjligt att analysera IP-effekt integrerad över hela multipler av elnätsfrekvensen men inte kortare tidsfönster. Det korta mätutlägget med 32 elektroder med c/c 1 medför tillsammans med de låga kontaktmotstånden gynnsamma mättekniska förhållanden, även om de gjorts i en urban miljö med de signalstörningar från elnätet som det medför. Signalstörningsförhållanden var kanske gynnsammare än i en kraftverksmiljö, men det beror förstås på vilket kraftverk, elektrodläggets storlek, elektrodkontakt, etc. Eftersom mätningarna utfördes med relativt liten utsänd ström från sändaren, och då man vid mätningar på en kraftverksdamm troligen hade eftersträvat att ligga en tiopotens högre med motsvarande förbättring av signal-till-brusförhållandet, bedöms resultaten vara relevanta för åtskilliga mätmiljöer på dammar. Det är dock önskvärt med mättester i full skala på fyllningsdammar i anslutning till vattenkraftverk.

## 6 Slutsatser och rekommendationer

Övervakning med elektrisk resistivitetstomografi (ERT) kan vara ett kraftfullt verktyg för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar. Resultaten av mätning vid ett enstaka tillfälle kan dock vara missvisande på grund av årstidsvariationer i resistivitet, medan utvärdering av tidsserier är mera kraftfullt eftersom man kan utnyttja variationerna som naturligt spårämne. Den komplexa geometriska uppbyggnaden av zonerade fyllningsdammar medför att det ofta kan vara nödvändigt med 3D-undersökning, för att 2D-teknik som är dominerande i praktisk tillämpning riskerar att ge otillräcklig upplösning och missvisande resultat. Projektet visar att installationer av elektroder och kablar kan göras så att det ger stabila långtidsegenskaper, men det måste göras på rätt sätt för att säkerställa detta. Det behövs strömlinjeformade och automatiserade rutiner för datahantering, bearbetning, visualisering och tolkning för rutinmässig användning av metoden. ERT kombinerat med mätning av inducerad polarisation (IP) har potential att förbättra upplösning och detekteringsförmåga men kräver ytterligare FoU innan rutinmässig praktisk tillämpning.

### 6.1 SLUTSATSER

Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) har i flera publicerade studier visats vara mycket användbart för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar, med möjlighet att detektera avvikande zoner, inre erosion och onormala läckage. Detta stöds av resultaten från testdammen i Älvkarleby. Resultaten är dock årstidsberoende eftersom resistiviteten varierar med bland annat temperaturen, vilket medför att avvikande zoner med inre erosion och onormala läckage får större, mindre eller ingen kontrast mot omgivande normala delar beroende på när mätningen utförs. Det finns därför en risk för att resultat från ett enstaka mättillfälle kan vara missvisande och inte detektera skadade zoner, medan upprepade mätningar på samma elektrodutlägg följt av analys av variationen över tid kan utnyttja variationen som ett spårämne. Analys av hur resistiviteten varierar i tiden har använts för att kvantifiera läckageflöden vilket det finns utvecklingspotential i.

En fördel med ERT är att metoden kan känna av variationer i rum och tid inuti en volym via elektroder utanför densamma, till exempel årstidsvariation och förändringar inne i en tät kärna. Typiska zonerade fyllningsdammar är dock generellt så komplexa geometriskt i förhållande till konventionell resistivitetsundersökning att det är nödvändigt att mäta så att data kan tolkas med hjälp av 3D inversion. Det ställer dock i sin tur krav på mätkonfigurationer och placering av elektroder. Det är ofta relativt enkelt att installera elektroder i ovankant av tatkärnan, men undantaget låga långsträckta dammar torde det ge för dålig upplösning av den nedre delen av tatkärnan. Det kan hanteras med hjälp av

elektroder installerade på olika nivåer i finfiltren på ömse sidor om tät kärnan, som har demonstrerats för testdammen i Älvkarleby. Tillämpning av detta för existerande dammar skulle dock kräva att teknik för installation av elektroder i filtren utvecklas, vilket skulle kunna tänkas ske med hjälp av styrd borrhning. Ett annat alternativ skulle kunna vara gradad borrhning från krönet, på liknande sätt som när grundvattenrör installeras. Elektrodlägg längs dammtån på upp- och nerströmssidan skulle kunna användas för övervakning av läckage och eventuell inre erosion i grundläggningen under dammen.

Genom att utvidga metoden till att även inkludera inducerad polarisation (IP) finns det potential för att förbättra upplösning och detekteringsförmåga. Det krävs dock ytterligare forskning för att utvärdera nyttan i den aktuella typen av mätmiljö, vilket initierats genom analys av data från testdammen i Älvkarleby i ett pågående SVC-projekt.

Elektrodinginstallationer i fyllningsdammar har stabila långtidsegenskaper under förutsättning att material av rätt kvalitet används för såväl elektroder som elektrodkablar, där elektroder i form av plåtar av rostfritt syrafast stål fungerar bra. Det är av största vikt att elektrodkablar är tillräckligt mekaniskt robusta och vattentåliga så att de tål att ligga nergrävda under vattenmättade förhållanden under lång tid, vilket kan uppnås med kabel med extra kraftig polyuretanmantel och så kallad "water block". Kablarna måste också vara dimensionerade för att tåla de spänningar och strömstyrkor som mätinstrumenten sänder ut, det vill säga likström med spänning 600 V och strömstyrka ett par ampere med marginal.

Mätinstrument och datainsamlingssystem behöver vara anpassade för mätobjekt och mätmiljö. Eftersom alla fyllningsdammar är unika ställer detta stora krav på flexibilitet vad gäller systemkonfiguration och skalbarhet. Automatiserad drift av systemet för övervakningsmätning kräver att systemet är mycket stabilt, och det behöver vara skyddat mot transienter från elproduktionsanläggning, åskväder, atmosfäriska störningar, etc. Det finns såvitt känt inget system på marknaden som uppfyller dessa krav, utan de system som är designade för övervakningsmätning har begränsningar vad gäller prestanda och skalbarhet. Det går att sätta ihop system med en kombination av tillgängliga kommersiella produkter och speciallösningar men det blir dyrt och komplicerat, och kräver omfattande insatser från kvalificerad personal. Det systemkoncept och prototypinstrument som utvecklats i detta projekt är avsett för övervakningsmätning och skalbart, men kommer att kräva ytterligare integration, test och verifiering innan det kan användas i rutintillämpningar.

Ett komplett automatiserat övervakningssystem kräver en rad programvarukomponenter för att kunna fungera hela vägen, där datainsamlingen ska fungera stabilt och utan avbrott. Det krävs rutiner för att hantera erhållna data i alla steg från rådata till visualiserade koordinatriktiga modeller, vilket hittills har krävts många manuella handgrepp. Den programvarusvit som har utvecklats i projektet täcker hela kedjan från mätning, hantering, överföring, kvalitetskontroll, filtrering, bearbetning, inversmodellering, visualisering av data. Genom att den publiceras med öppen källkod kommer den att vara tillgänglig för alla som är intresserade,

och där tanken att den ska kunna få en bredare användning där olika användare har möjlighet att integrera utökad funktionalitet. För närvarande har den version som publiceras stöd för det kommersiella instrument som har använts bland annat på testdammen i Älvkarleby, medan den programkod som används för kommunikation med prototypinstrumentet inte har bedömts vara mogen att publicera än.

## 6.2 REKOMMENDATIONER

Följande rekommenderas för fortsatt forskning och utveckling för att förbättra metoden och öka dess tillämpbarhet:

- Testa långtidsövervakning med kombinerad ERT och IP i fullskaliga dammar.
- Utveckla och testa teknik för installation av elektroder på olika djup i befintliga fyllningsdammarna, för att öka upplösningen mot djupet och möjliggöra inversion med 3D-modeller.
- Testa att skapa 3D-modeller med en uppbyggnad av den inre elementstrukturen som baseras på materialfördelningen i den zonerade fyllningsdammen, och invertera data med modeller med brutna mjukhetsband i de kända materialgränserna.
- Testa AI/maskininlärning för tolkning av tidsserier av geoelektriska modeller från fyllningsdammarna tillsammans med andra relevanta data, till exempel grundvattennivåer, läckagemätningar, temperaturdata, etc.

## 7 Referenslista

- Bernstone C., Lagerlund J., Toromanovic J. & Juhlin C. (2021). *Deformationer och portryck i en experimentell fyllningsdamm*, Report 2021:772, Energiforsk, Stockholm, ISBN 978-91-7673-772-9, 52p.
- Bièvre G., Oxarango L., Günther T., Goutaland D. & Massardi M. (2018) Improvement of 2D ERT measurements conducted along a small earth-filled dyke using 3D topographic data and 3D computation of geometric factors. *Journal of Applied Geophysics*, **153**, 100-112.
- Binley A. & Slater L. (2020) *Resistivity and Induced Polarization: Theory and Applications to the Near-Surface Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 978-1-108-49274-4, 388p.
- Cho I.K., Ha I.S., Kim K.S., Ahn H.Y., Lee S. & Kang H.J. (2014) 3D effects on 2D resistivity monitoring in earth-fill dams. *Near Surface Geophysics*, **12**, 73–81
- Dahlin T., Johansson S., Norooz R. & Sjö Dahl P. (2023) *Detektering av inre skador i fyllningsdamm genom geoelektrisk övervakning*, Rapportprojekt P48411-1, Energimyndigheten, 60p.
- Dahlin T., Sjö Dahl P. and Johansson S. (2008) *A Guide to Resistivity Investigation and Monitoring of Embankment Dams*, Report No. T992100-0205B/4, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal, 84p.
- Dahlin T., Sjö Dahl P., Friberg, J. & Johansson S. (2001) Resistivity and SP Surveying and Monitoring at the Sädva Embankment Dam, Sweden, in *Dams in a European Context*, ed. G.H. Mistømm, B. Honningsvåg, K. Repp, K.A. Vaskinn & T. Westeren, ISBN 90 5809 196 1, Balkema, Lisse, p.107-113.
- Fargier Y., Palma Lopes S., Fauchard C., Francois D. & Cote P. (2014) DC-Electrical Resistivity Imaging for embankment dike investigation: A 3D extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics*, **103**, 245–256.
- García Cañas E. (2022) *Installation of cables for monitoring purposes in the ground by using Horizontal Directional Drilling*. MSc thesis, Engineering Geology, Lund University, ISRN LUTVDG(TVTG 5176 )/1-70 /(2022), 70p + appendices.
- Guideline Geo (2024) *ABEM Terrameter LS 2 User Guide*. Guideline Geo AB, version 2024-09-23 based on release 2.9.0, 134p. Accessed 2024-09-27 <https://www.guidelinegeoc.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2023/08/Terrameter-LS-2-User-Manual-UI-v2.9.0.pdf>
- Ingeman-Nielsen T., Tomaškovičová S. & Dahlin T. (2016) Effect of electrode shape on grounding resistances - Part 1: The focus-one protocol, *Geophysics*, **81**(1), WA159-WA167.
- Johansson S., Friberg J., Dahlin T. & Sjö Dahl P. (2005) *Long Term Resistivity and Self Potential Monitoring of Embankment Dams – Experiences from Hällby and Sädva Dams, Sweden*, Report 05:15, Elforsk, Stockholm, 123p.
- Johansson S. & Dahlin T. (1996) Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements, *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, **1**(3), 229-247.
- Kuras O., Wilkinson P.B., Meldrum P.I., Oxby L.S., Uhlemann S., Chambers J.E., Binley A., Graham J., Smith N.T. & Atherton N. (2016) Geoelectrical monitoring of simulated subsurface leakage to support high-hazard nuclear decommissioning at the Sellafield Site, UK, *Science of the Total Environment*, **566–567**, 350–359.

- Lin C.-H., Lin C.-P., Hung Y.-C., Chung C.-C., Wu P.-L. & Liu H.-C. (2018) Application of geophysical methods in a dam project: Life cycle perspective and Taiwan experience. *Journal of Applied Geophysics*, **158**, 82-92.
- Maurya P.K., Balbarini N., Møller I., Rønde V., Christiansen A.V., Bjerg P.L., Auken E. & Fiandaca G. (2018) Subsurface imaging of water electrical conductivity, hydraulic permeability and lithology at contaminated sites by induced polarization. *Geophysical Journal International*, **213**(2), 770–785.
- Nivorlis A., Dahlin T. & Hedblom P. (in review). Advancements in geoelectrical monitoring; an open-source suite for deployment of automated geoelectrical monitoring systems aiming for real-time monitoring applications. *Computers & Geosciences*.
- Nivorlis A., Rossi M. and Dahlin T. (2022) Temporal filtering and time-lapse inversion of geoelectrical data for long-term monitoring with application to a chlorinated hydrocarbon contaminated site, *Geophysical Journal International*, **228**, 1648–1664.
- Norooz R., Nivorlis A., Olsson P.-I., Günther T., Bernstone C. & Dahlin T. (2024) Monitoring of Älvkarleby test embankment dam using 3D electrical resistivity tomography for detection of internal defects, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **14**, 1275-1294.
- Olsson P.-I., Dahlin T., Fiandaca G. & 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
- 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.
- Reynolds J.M. (2011) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd Edition, Wiley, ISBN: 978-0-471-48535-3, 710p.
- 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.
- 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.
- Sjödahl P., Johansson S. & Dahlin T. (2019) *Geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet - En kunskapssammanställning*, Rapport 2019:571, Energiforsk, Stockholm, ISBN 978-91-7673-571-8, 93p.
- Sjödahl P., Dahlin T. & Johansson S. (2009) Estimating seepage flow from resistivity monitoring data at the Sädva embankment dam, *Near Surface Geophysics*, **7**, 463-474.
- Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S. & Loke M.H. (2008) Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam, *Journal of Applied Geophysics*, **65**, 155–164.
- Sjödahl P., Dahlin T. & Zhou B. (2006) 2.5D Modelling to Assess 3D Effects in Resistivity Imaging on Embankment Dams, *Geophysics*, **71**(5), G107-G114.

## Bilaga A. Specifikation för upphandling av elektrod kabel

Eftersom utförande och kvalitet på elektrodablarna är extremt viktig för långtidsegenskaperna för en övervakningsinstallation för ERT / DCIP inkluderas ett exempel på specifikation för upphandling och inköp.

### Electrode cable specification for long-term ERT monitoring

Electrode cable for electrical resistivity tomography (ERT) monitoring installation where the cable will be buried in the ground in sand or fine gravel, under conditions that may be water saturated. The cables will be left in place for many years, so it is essential that they are designed to withstand sufficient mechanical stress in connection with the burial. It must also be suited for permanent deployment under water, as the ground can be water saturated.

The electrode cable shall meet the following specification:

- Electrode cable with multi-stranded conductors and pigtail outlets<sup>1</sup> at exactly 2 metre<sup>2</sup> separation.
- SD-1 take-outs with 0.75 m<sup>3</sup> in length and stainless steel ring terminals with watertight sealed connection.
- 50 metre<sup>4</sup> lead-in and termination with KPT18-32P standard connector with moulded / sealed back and dust cap in one end.
- Other end of cable dead-ended and sealed.
- Cables with heavier polyurethane jacket and water block for long term installation in water saturated conditions under ground.<sup>5</sup>
- Voltage rating better than 600 V DC continuous.
- Current rating at least 2 A continuous.

Please specify cable quality details including jacket material, jacket thickness, cable diameter, voltage rating, current rating, etc.

We need price and time for delivery.

<sup>1</sup> Alternativt "stainless steel ring electrodes integrated in the cable" istället för "pigtail outlets" ifall kabeln ska läggas ut under vatten på uppströms- eller nerströmssidan.

<sup>2</sup> Avstånd mellan elektroduttagen anpassas efter projektets förutsättningar, där det ibland kan vara en fördel med en aning längre avstånd mellan uttagen än planerat elektrodavstånd.

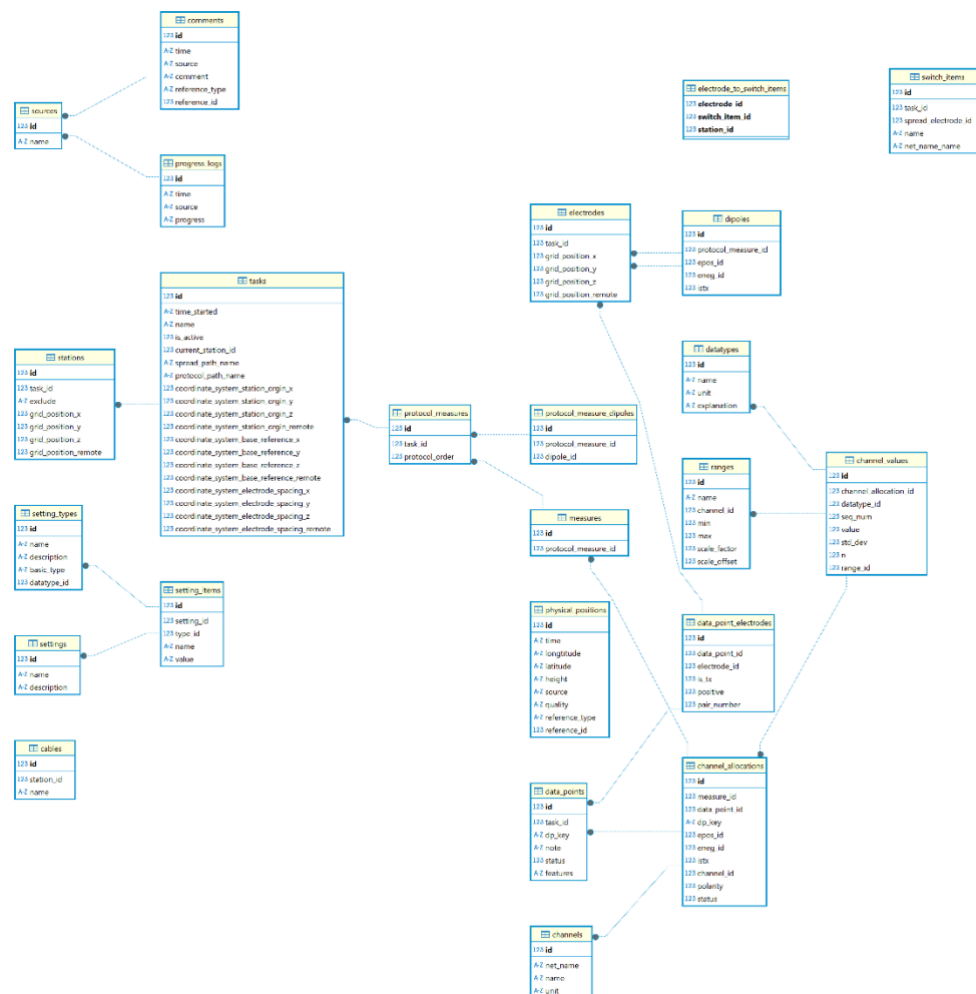
<sup>3</sup> Längd på anslutningskabel till elektrod kan behöva justeras beroende på förutsättningarna.

<sup>4</sup> Längd på lead-in anpassas efter projektets behov.

<sup>5</sup> Ifall kabeln ska läggas ut under vatten kan det beroende på metod för att lägga ut den vara lämpligt att efterfråga "kevlar stress member" inbyggt i kabeln.

## Bilaga B. Databasstruktur för prototyp-instrument för ERT/DCIP

Föreslagen projektdatabasstruktur för mätdata inklusive komplett dokumentation av mätinställningar, elektrodkoordinater, typ och version för alla delar i mätsystemet med serienummer, programvaruversioner, etc.





# GEOELEKTRISK TOMOGRAFI FÖR DAMMÖVERVAKNING

Övervakning med elektrisk resistivitetsstomografi (ERT) kan vara ett kraftfullt verktyg för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar. Resultaten av mätning vid ett enskilt tillfälle kan dock vara missvisande på grund av årstidsvariationer i resistivitet, medan utvärdering av tidsserier är mera kraftfullt eftersom man kan utnyttja variationerna som naturligt spårämne. Den komplexa geometriska uppbyggnaden av zonerade fyllningsdammar medför att det ofta kan vara nödvändigt med 3D-undersökning, för att 2D-teknik som är dominerande i praktisk tillämpning riskerar att ge otillräcklig upplösning och missvisande resultat.

Projektet visar att installationer av elektroder och kablar kan göras så att det ger stabila långtidsegenskaper under flera årtionden, men det måste göras på rätt sätt för att säkerställa detta och för att undvika allvarliga problem med datakvaliteten. För att möta behovet av 3D-teknik och upplösning på djupet för högre dammar behöver det utvecklas metoder för installation av elektroder på djupet i exempelvis finfiltren.

Mätinstrument och datainsamlingssystem behöver vara anpassade för mätobjekt och mätmiljö. Eftersom alla fyllningsdammar är unika ställer detta stora krav på flexibilitet vad gäller systemkonfiguration och skalbarhet.

Det behövs strömlinjeformade och automatiserade rutiner för datahantering, bearbetning, visualisering och tolkning för rutinmässig användning av metoden. Inom projektet har prototypprogramvara utvecklats som automatiserat hanterar hela dataflödet från daglig mätning över samtliga steg fram till visualiserade modeller. Programvaran som görs tillgänglig med öppen källkod har använts för övervakningsmätning på två fyllningsdammar och i samband med det har den gradvis förbättrats och stabiliserats.

*SVC - Svenskt centrum för hållbar vattenkraft, arbetar med forskning och utveckling av teknik, system och metoder för att stärka vattenkraftens roll i omställningen till ett hållbart energisystem. SVC drivs av Energiforsk i samarbete med Luleå tekniska universitet. Centret finansieras av Energimyndigheten, Svenska kraftnät, svensk vattenkraftindustri och flera av Sveriges främsta lärosäten. SVC omsätter cirka 280 miljoner kronor under programperioden 2022–2027.*