

# Resistivitet- och IP- mätningar vid Äspö Hard Rock Laboratory

***Erik Fennvik***

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,  
kandidatarbete, nr 438  
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2015



# **Resistivitet- och IP-mätningar vid Äspö Hard Rock Laboratory**

Kandidatarbete  
Erik Fennvik

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2015

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Introduktion .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Bakgrund. ....</b>	<b>7</b>
2.1	Studieområdet	8
2.2	Geologi	8
2.3	Introduktion till metoder	8
2.3.1	Resistivitetsmätningar	8
2.3.2	IP-mätningar	10
<b>3</b>	<b>Metoder .....</b>	<b>11</b>
3.1	Resistivitet I vattnet	11
3.2	Mätning av topografi	11
3.3	Resistivitet	12
3.4	IP-mätningar	12
3.5	Antaganden	12
<b>4</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>14</b>
4.1	Topografi	14
4.2	Vattenresistivitet	14
4.3	Resistivitet	14
4.4	IP-mätningar	15
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>15</b>
5.1	Protokoll A	15
5.2	Protokoll B	15
5.3	Felkällor	15
<b>6</b>	<b>Slutsatser.....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Tackord.....</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Referenser.....</b>	<b>16</b>

Foto av profilen över vattnet. Taget på Äspö sidan av sundet.

# Resistivitet- och IP-mätningar vid Äspö Hard Rock Laboratory

ERIK FENNVIK

Fennvik, E., 2015: Resistivitet- och IP-mätningar vid Äspö Hard Rock Laboratory *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 438, 16 sid. 15 hp.

## Sammanfattning

Utrymmet på jordytan håller på att ta slut, vi blir fler och fler och våra städer blir större och större. Istället för att expandera våra städer utåt borde det fokuseras på att göra mer plats i städerna. I en vanlig svensk stad utgörs idag nästan 50 % av vägar och annan transport. Om det mesta av all transport hade kunnat förflyttas ned under marken istället, hade den frigjorda platsen kunnat bli bostäder, parker och andra mänskliga nödvändigheter.

Av denna anledning startades projektet *Geoinfra-TRUST* år 2013 finansierat av svenska staten. Projektet syftar till att göra det billigare, miljövänligare och snabbare att bygga infrastruktur under marken genom att utveckla nya geofysiska metoder eller att förbättra de nuvarande. Geofysiska metoder är ett sätt att undersöka marken utan att behöva borra eller gräva.

I projektet ingår det att utveckla resistivitets- och IP-mätningar (inducerad polarisation). Vilket är mål 2.1. och 4.2. inom *Geoinfra-TRUST*. En fältstudie utfördes nära Oskarhamns kärnkraftverk vid *Äspö Hard Rock Laboratory* mellan och på öarna Äspö och Hålö. Målet för undersökningen var att lokalisera en sprickzon (NE1) så bra som möjligt och se om det var något som kunde förbättrats för att få bättre resultat. Mätningarna genomfördes och resultatet för resistiviteten blev bra men IP-mätningarna hade mycket störningar. Bearbetning av den brusiga IP-datan kan komma att göra att datan blir användbar men det kommer att ta tid. I resistiviteten syntes sprickzonen NE1 tydligt.

På grund av de stora skillnaderna i resistivitet mellan vatten och berg så blev ”*mean residual*” högre än vad den hade blivit om hela profilen låg i vatten eller på land. Slutsatsen av projektet är att programvaror och instrument kan avsevärt förbättras inom resistivitetsmätningar och IP-mätningar. Resistivitets- och IP-mätningarna har sina egna begränsningar som metod.

**Nyckelord:** Geofysiska undersökningar, Resistivitetsmätningar, IP-mätningar, Geoinfra-TRUST, Äspö Hard Rock Laboratory

**Handledare:** Helena Filipsson och Torleif Dahlin (LTH)

**Ämnesinriktning:** Berggrundsgeologi (Geofysiska undersökningar, Geoelektrik)

Erik Fennvik, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: Nat12efe@student.lu.se

# Resistivity– and IP-measurements at Äspö Hard Rock laboratory

ERIK FENNVIK

Fennvik, E., 2015: Resistivity– and IP-measurements at Äspö Hard Rock Laboratory. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 438, 16 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

## Abstract

The room for the human race on earth is dwindling. The population is increasing and our cities are expanding every day. Instead of expanding our cities we could focus on creating more room inside our cities. Today close to 50% of the total area of a normal Swedish city consist of transport infrastructure. What if we could move most of that 50% down below ground? Imagine all the space it would create and what we could do with it. We could fit nearly twice the amount of people in the same area - or have nearly twice the space per citizen.

That is the reason why the project Geoinfra-TRUST started in 2013. The project's purpose is to make it cheaper, more environmentally compatible and faster to build infrastructure underground. By developing already known geophysical measurements or creating new ones this goal can be accomplished. Geophysical measurements are a way to gain knowledge about the ground without drilling or digging.

The assignment the 2.1. and 4.2. projectgroup were given was to develop resistivity and induced polarisation measurement (IP) and also to correlate different geophysical measurements with each other.

A field study was done close to *Oskarhamns* nuclear power plant at *Äspö* Hard Rock Laboratory between and on *Äspö* and *Hälö*. The goal was to locate a fracture zone at the southern end of *Äspö*. The measurements were completed and the results for the resistivity were satisfying but the results for the IP-measurements had a lot of disturbance. The disturbance could probably be filtered but it requires time. The resistivity measurements found the fracture zone but the IP did not.

It was hard to obtain low differences between the measured data and the calculated data because of the huge difference in resistivity over tiny distances. Which meant that the mean residual became larger than it should have been. The results would have been better if whole measurement were in water or on land, even though the results were acceptable they would have turned out better that way.

**Keywords:** Geophysics, Resistivity, IP-measurements, Geoinfra-TRUST, Aspo Hard Rock Laboratory

**Supervisors:** Torleif Dahlin (LTH) and Helena Filipsson

**Subject:** Bedrock geology (Geophysics, Geoelektricity)

*Erik Fennvik, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: nat12efe@student.lu.se*

# 1. Introduktion

Jordens yta börjar ta slut. Vi blir fler och fler och våra städer blir större och större. Idag finns det städer som har nästan 50 % av sin totala yta ägnad till transport. Om stora delar av all transport kunde flyttats ner under marken kunde våra städer ha dubbelt så många invånare på samma yta eller mer öppna ytor i städerna. Alternativt hade våra städer kunnat bli hälften så stora (Harmansson & Ekström 2014)

Forskningsprojektet som heter Geoinfra-TRUST startades år 2013. Målet med projektet är att utveckla nya metoder inom geofysik och att förbättra existerande metoderna. Det här ska leda till att det blir billigare, enklare och säkrare att kunna konstruera infrastruktur under mark i urbana miljöer. Den här rapporten fokuserar på mål 2,1 och 4,2 inom Geoinfra-TRUST vilket är resistivitet- och IP-mätningar och att binda ihop dessa med andra metoder inom geofysik. Det är en del av målet om hållbar utveckling i Sverige (Geoinfra-TRUST, 2015b).

Det är viktigt att minska felmarginerna för geofysiska undersökningar eftersom dessa kan få väldigt stora ekonomiska eller miljömässiga konsekvenser och kan också dra ut på tiden inom exempelvis byggbranschen. Det skulle kunna kosta liv om något gick riktigt fel. (Geoinfra-TRUST, 2015a).

Arbetet har haft följande frågeställning.

- Hur kan geofysiska undersökningar förbättras?
- Varför behöver geofysiska undersökningar för-

bättras?

- Vad krävs för att uppnå ett bra resultat inom resistivitet och IP-mätningar?

Syftet med arbetet är att på längre sikt genom hållbar utveckling göra att det blir billigare och enklare att göra mätningar av marken och få fram trovärdiga resultat. Det ska leda till att konstruktion av infrastruktur under marken i urbana miljöer ska bli mer ekonomiskt hållbart och att fler byggprojekt ska bli klara i tid. Målen för att göra det här möjligt är att hitta sätt att förbättra trovärdigheten på resultaten från resistivitets-, refraktionsseismik- och IP-mätningar. Ett mål är att förstå hur stora fel mätningarna det blir i mätningarna och hur felen kan rättas till eller förminska. Ett annat är att se om det går att få ut bra modelleringsresultat från mätningar som går över land och i vatten.

## 2. Bakgrund

Undersökningen som vi utförde fokuserade på att utveckla redan existerande metoder. Profilen som skapades under fältstudien sträcker sig både över land och i vatten. Refraktionsseismiken kommer det att skrivas om i en annan rapport.

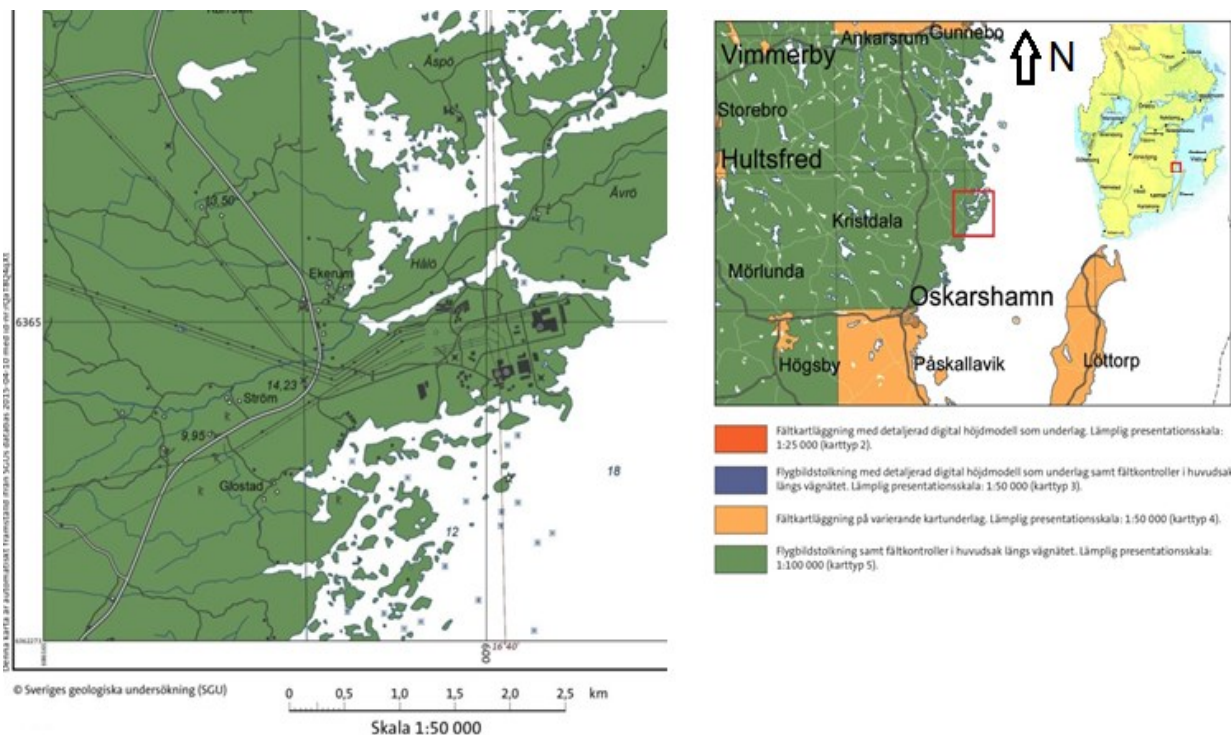


Figure 1. Karta över studieområdet. Till vänster visas en detaljerad bild över studieområdet och till höger visas en lite mer övergripande bild över var i Sverige området ligger samt längst upp i högra hörnet finns en karta över södra Sverige, den röda fyrkanten visar var området ligger. Byggnaderna i bilden till vänster är Oskarshamns kärnkraftverk. Bilderna är tagna från Kartgeneratorm, SGU.



## 2.1 Studieområdet:

Studieområdet ligger vid Oskarhamns kärnkraftverk, vilket ligger nordöst om Oskarshamn och öst om Laxemar i sydöstra Sverige (se figur 1).

Några hundra meter norr om kärnkraftverket ligger två små öar, Äspö och Hålö (se figur 1). Det är mellan och på dessa två öar som undersökningarna utfördes. Det går en sprickzon mellan Hålö och Äspö som ligger precis vid Äspös sydligaste del. Målet med undersökningen var att kartlägga sprickzonen NE1 så precist som möjligt.

Äspö Hard Rock Laboratory är en forskningsanläggning för kärnbränslehantering som ägs av SKB (Svensk kärnbränslehantering). Hit kommer forskare från hela världen och provar sina nya idéer. Målet med Äspö Hard Rock Laboratory är att det ska fungera som forskningsplats fram tills att Forsmark kärnbränsledeponi ska byggas. Det är där som Sverige ska deponera sitt kärnbränsle i framtiden efter det är det oklart vad som händer med Äspö Hard Rock Laboratory (SKB 2013).

## 2.2 Geologi:

Jordarterna på Hålö och Äspö är framför allt kalt berg med tunna jordlager men även tjockare lager av sediment minst 0,5 m. Sedimentlagren kan bestå av lera, silt, sand och grus. Sediment lagren är utspridda i topografiska lågpunkter över båda öarna (se figur 2).

Berggrunden i området består framförallt av olika graniter och dioriter (granodiorit) men även av myloniter, kvartsmonzoniter samt grönsten. Kvartsmonzoniterna återfinns framförallt på Simpevarp (vid kärnkraftverket). På ytan hittas mest Oskarshamns granit samt Smålands granit men även granodiorit. Dessa bergarter är typiska för det transskandinaviska magmatiska bältet som sträcker sig från Oskarshamnregionen genom Dalarna och upp i Norge. Detta bälte har en ålder ca 1800 miljoner år (se figur 3).

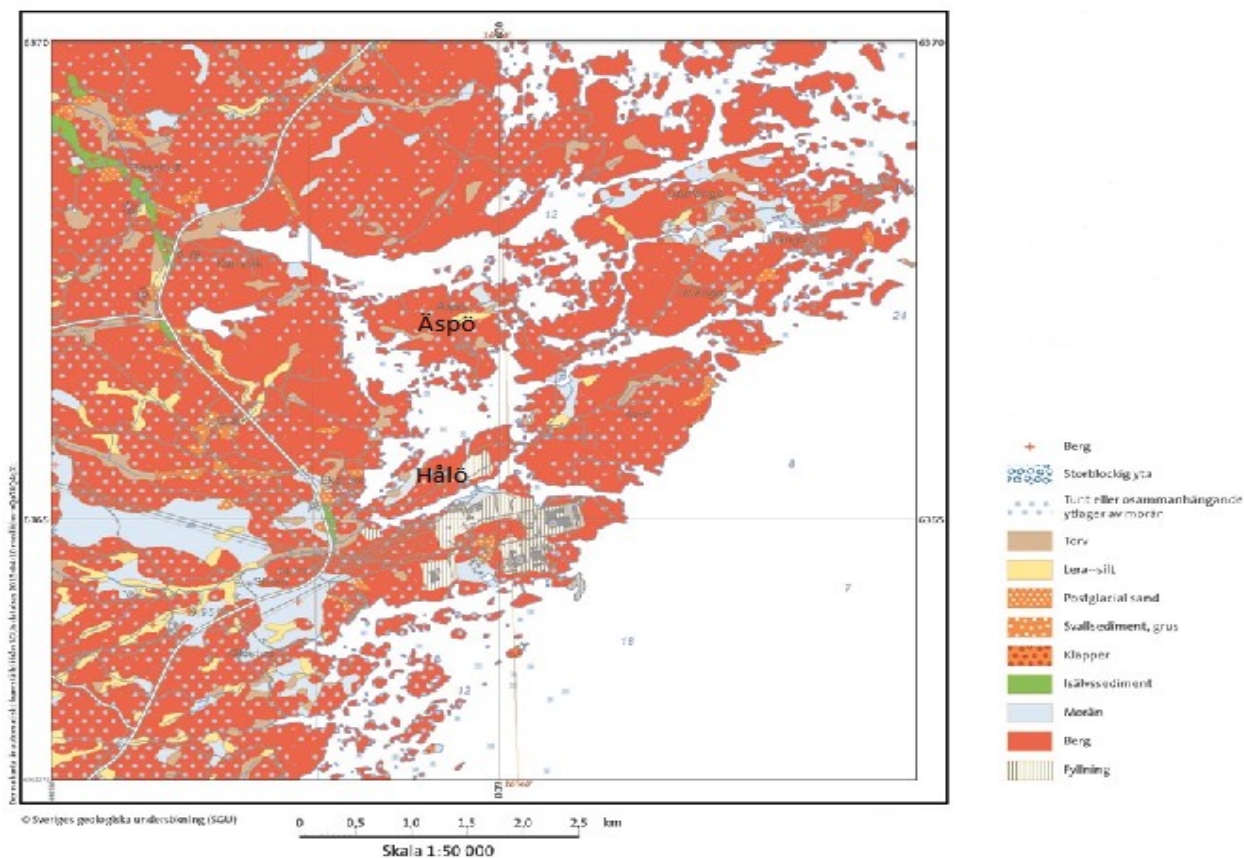
Äspö samt Hålö ligger i en tektonisk lins med väldigt låg uppsprickningsgrad (Bergman et al. 1998). Flera borrhningar har gjorts i Äspö och i Hålö innan Äspö HRL började byggas. De visar på att myloniterna och grönsten inte finns på ytan utan på djupet. Sammansättning och lagerföljden varierar mycket från de olika borrhningarna men det varierar mest mellan Hålö borrhålet och Äspö borrhningarna (Stanfors et al. 1991).

## 2.3 Introduktion till Metoder

### 2.3.1 Resistivitetmätningar

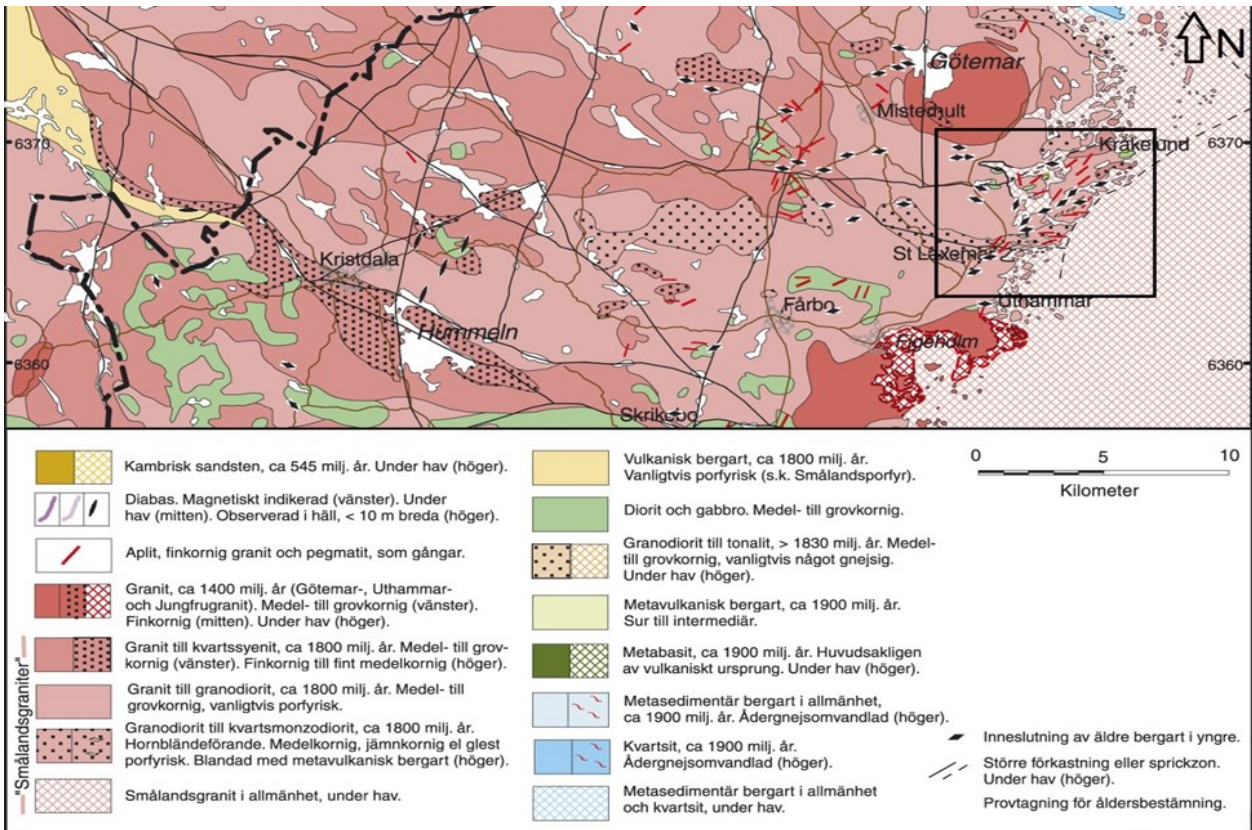
Resistivitetmätningar mäter markens spänningsskillnader. Resistivitetmätningar utförs med hjälp av två potentialelektroder och två strömelektroder. Strömmen fördelar sig på olika djup i marken mellan strömelektroderna. Beroende på fördelningen av resistivitet kommer olika stora spänningar mätas upp mellan potentialelektroderna (se figur 4).

Resistivitetmätningarna för projektet utfördes med



Figur 2. Jordartskarta över området. Äspö och Hålö ligger i de centrala delarna av figuren. Taget från SGUs kartgenerator.



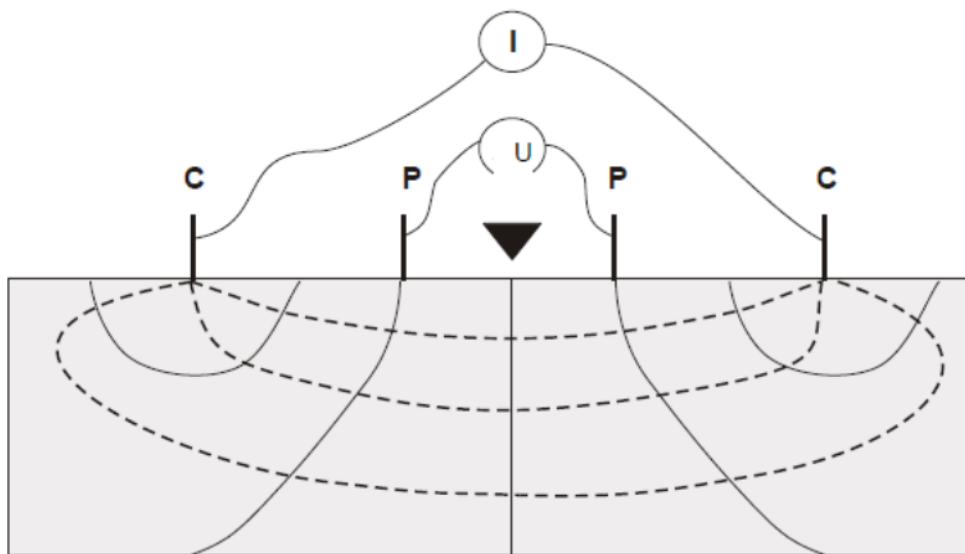


**Figur 3.** Berggrundskarta över Oskarshamn. Modifierad från (Bergman et al. 1998). Delen av kartan som är intressant finns inom den svarta fyrkanten.

hjälp av ett multielektrodsystem (CVES). Det innebär att elektroder placeras ut i en profil kan vara allt från 4 till hundra tals elektroder. Sedan kan vilken elektrod som helst agera som ström - eller potenzialelektrod. Mätinstrumentet reglerar då vilka elektroder som är strömelektroder och vilka som är potenzialelektroder. Instrumentet mäter sedan ett stort antal variationer. Instrumentet lägger ihop samtliga mätningar för mät-

profilen till en enda datafil.

Tolkningsprogramvaran som användes i denna undersökning var Res2dinvx64. När Res2dinvx64 modellerat framställs tre olika figurer över mätsträckan där man kan se variationerna i resistivitet i en 2D-profil över mätsträckan. Den översta är den uppmätta skenbara resistiviteten eller pseudosektionen, den i mitten är den beräknade skenbara resistiviteten och



**Figur 4.** Ett exempel på den enklaste versionen av resistivitmätning. Observera hur strömmen rör sig i marken. Taget från (Jeppsson & Dahlin 2015).

den sista är den inverterade modellen, dvs. resultatet av modelltolkningen (se figur 9).

Ett problem med modelleringsresultat av resistivitet mätningar är att den inverterade modellen innehåller osäkerheter, på grund av ekvivalensproblem, begränsad upplösning mot djupet och 3D-effekter. Ekvivalensproblemen innebär att olika fördelningar av resistivitet i marken kan ge upphov till nästan identiska mätresultat så att det blir omöjligt att avgöra vilken modell som är den riktiga utan kompletterande data från andra metoder. Vidare fördelar sig strömmen i 3D-form i marken runt elektroderna vilket gör att variation i resistivitet vid sidan av linjen kan misstolkas som en förändring mot djupet. Om den inverterade modellen exempelvis ökar drastiskt på fem meter kan det indikera på att berggrundsytan ligger på fem meters djup, men berggrundsytan kan vara placerad på fyra eller sex meters djup (Jeppsson & Dahlin 2015).

Undervattenresistivitet mätningarna sker på samma sätt som ovan utan skillnaden att en annan typ av elektrod måste användas och några inställningar i Res2dinvx64 måste ändras. I rådata textfilen behöver topografi och vattnets utbredning samt vattnets resistivitet läggas till. Innan resultaten kan köras genom Res2dinvx64 måste mätningar göras för att se hur låg resistiviteten i vattnet är och hur topografin och batymetrin ser ut. Resistiviteten minskar oftast med djupet på grund av att vatten med högre densitet sjunker och densiteten ökar med ökad salthalt. Ökande salinitet

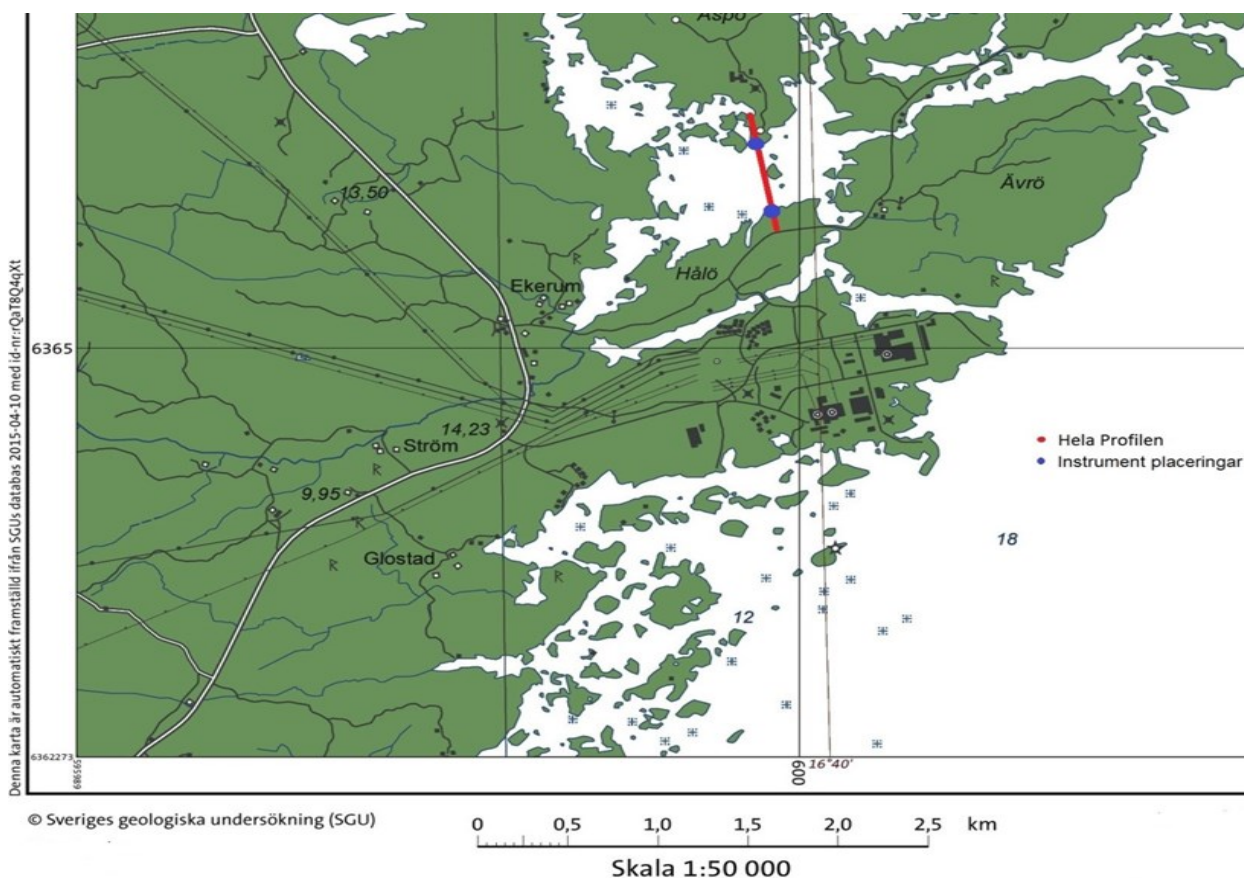
innebär att jonkoncentrationen ökar med djupet och högre jonkoncentration ger en bättre ledningsförmåga vilket i sin tur ger lägre resistivitet.

För att en precis inverterad modell ska kunna framställas är det mycket viktigt mäta batymetrin samt hur berggrundsytan ser ut. Om topografi eller batymetri mätningarna inte är tillräckligt precisa och en liten vattenrymd missas kan det göra att ett felaktigt resultat framställs. När både batymetrin, berggrunden och vattnets resistivitet på olika djup är inprogrammerat i modellen kan den inverterade modellen framställas (Dahlin et al. 2014).

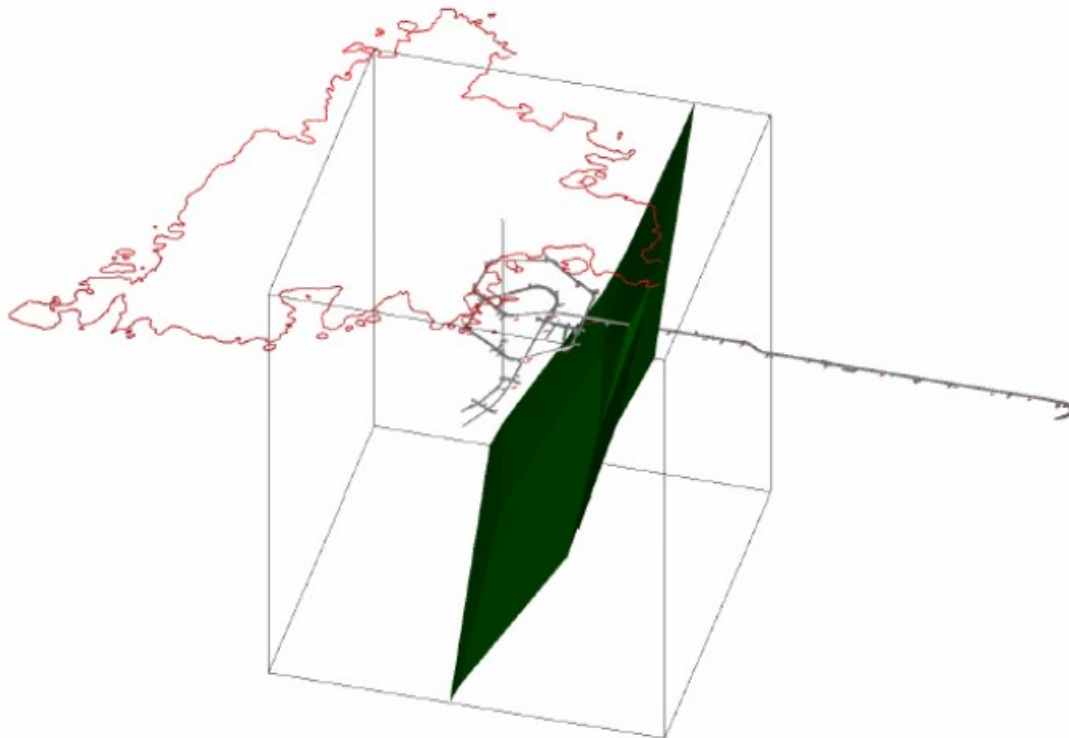
### 2.3.2 IP-mätningar

IP-mätningar eller inducerad polarisations mätningar fungerar på ett liknade sätt som resistivitet mätningar. Instrumentet som används för resistivitet mätningar används också för IP-mätningar. Två potentialelektroder och två strömelektroder används för IP-mätningar. IP-mätningar nyttja multielektrodsystem precis som resistiviteten.

Elektroderna laddar upp marken genom att föra ström genom den. Jonerna i marken vandrar mot strömriktningen vilket bildar en polarisation i marken. Strömmen av stängs av och avklingningen på polarisationen mäts. Normalt görs det minst tre mätningar för att få fram ett representativt medelvärde. Resultatet bearbetas i samma program som resistiviteten, Res2dinvx64. En inverterad modell bildas av ett



**Figur 5.** Karta över studieområdet när profilen är markerad i rött och var instrumentet var placerat. Den totala längden på profilen är 780m. Taget från SGUs kartgenerator.



**Figur 6.** I figuren ovan ses Sprickzonen NE1 som ska kartläggas under undersökningen. NE1 stupar in mot Äspö, och den ligger precis utanför Äspö. Äspö observeras väster ifrån i bilden. Figuren är tagen från (Berglund et al. 2003).

datorprogram och denna kan tolkas av en expert. (Jeppsson & Dahlin 2015)

### **3. Metod**

Vi utförde mätningarna mellan den 20-24 april 2015 i havet mellan Hälös nordöstra del till Äspös sydligaste del och även på land, på Hälö och Äspö. Mätningarna placerades precis väster om ön som ligger mittemellan de två öarna (se figur 5).

NE1 går i vattnet vid Äspös sydligaste del. Det var NE1 som skulle detekteras och kartläggas så precist som möjligt (se figur 6).

#### **3.1 Resistivitet i vattnet**

Resistiviteten i vattnet mättes med 4 elektroder med 10 cm mellanrum. Instrumentet som användes var en ABEM Terrameter SAS 4000. Mätningen av vattnets resistivitet genomfördes två gånger för varje meter för att dokumentera skillnader i resistiviteten. Ett medelvärde räknades sedan ut för varje meter. Mätningen gjordes över den djupaste delen mellan de två öarna.

#### **3.2 Mätning av topografin**

Batymetrin mättes från båten med en typ av ekolod som kallas *multibeam echosounder*. Elektroddpositionerna lades sedan in med 5 meters mellanrum på havsbotten. Positionen för varje elektrod som låg över vattenytan bestämdes med hjälp av en differential GPS/RTK/GNSS, vilket är en typ av positionsbestämningssystem som använder flertalet satellitsy-

stem istället för att bara använda GPS. Systemet använder sig av alla tillgängliga navigationssystem som den får kontakt med för att bestämma sin position mer korrekt än vad bara ett system kan, vilket kallas GNSS. Differential GPS:en mäter även höjd över havet vilket gör att man får de exakta koordinaterna i x-, y- och z-led. Koordinaterna som vi fick ut var i SWEREF99 1690 vilket är ett etablerat koordinatsystem i Sverige.



**Figur 7.** Bild på en ABEM Terrameter LS. Bilden är tagen under tiden som mätningar pågår. Bild tagen av Erik Fennvik



### 3.3 Resistivetsmätningar

Tre resistivets mätningar utfördes totalt. Instrumentet som användes för att utföra mätningarna var en ABEM Terrameter LS (se figur 7).

Tre stycken mätningar utfördes när instrumentet stod på norra sidan av sundet på Äspö (se figur 5). Ett protokoll är en serie av inställningar som säger till instrumentet hur mätningarna ska utföras. Två av mätningarna använde protokoll A vilket är programmerat av Torleif Dahlin, Lunds Universitet. Den sista mätningen använde ett optimerat protokoll, protokoll B.

För alla mätningarna användes en gradient uppställning, vilket innebär att det ena utlägget från instrumentet har fler elektroder än det andra utlägget.

För Protokoll B användes en uppställning med 32 elektroder som gick norr ut och 96 elektroder som gick söder ut. Denna profil var ca 635 meter lång och det var 128 elektroder med 5 meters elektrodavstånd. Instrumentet stod norr om sundet vid denna mätning.

För den första mätningen med Protokoll A användes samma uppställning som för protokoll B. För att protokoll A skulle täcka hela profilen med 157 elektroder totalt behövdes instrumentet flyttas till den sydliga instrument positionen (se figur 5). Vid denna mätning var det 96 elektroder norr ut och 29 elektroder söder ut. Anledningen till att 29 elektroder användes och inte 32 på den sista mätningen var att de tre sista elektroderna hade behövts placeras på en bilväg. Denna mätning tillsammans med mätningen med protokoll A från norra sidan av sundet skapade en 780 meter lång profil (se fig 9,10,11).

För alla mätningar i vattnet låg kabeln i direkt kontakt med vattnet och då behövdes inga externa elektroder. På land krävs det dock något som gör att strömmen når marken då luft inte leder ström. Elektroderna som användes var uppbyggda av en vajer kopplad till en metall platta som var ca 10cm x 10cm. För att dessa elektroder skulle ha bra kontakt med marken användes Johnson Revert, vilket är ett vattenlösligt pulver som

gör att elektroderna får bra kontakt med marken. Normalt används Johnson Revert som borrhingsvätska.

Datorprogramvaran Erigraph användes efter att modellerna framställts för att rita upp den inverterade resistivets sektion.

### 3.4 IP-mätningar

IP-mätningarna utfördes samtidigt som en av resistivetsmätningarna genomfördes på Äspös sydligaste del. Samma elektroduppställning och protokoll som för de första två mätningarna av resistiviteten.

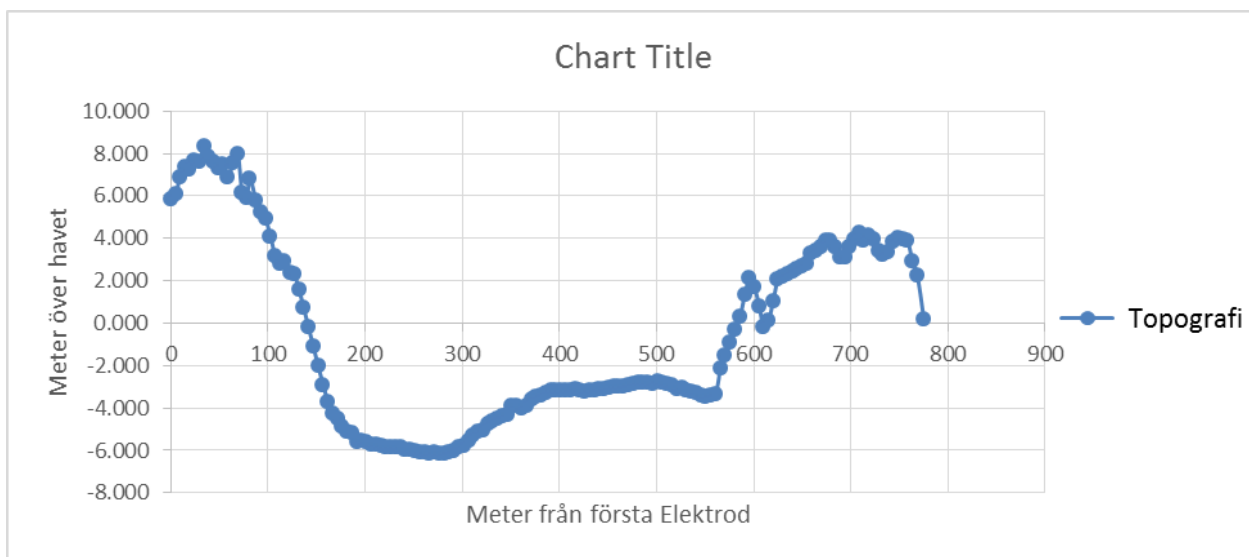
**Tabell 1.** Resultaten från mätningarna av vattnets resistivitet mellan Hälö och Äspö på olika djup. Mätningarna gjordes där det var som djupast på mellan öarna.

Mätning	Djup (m)	Resistivitet ( $\Omega$ m)
1	1,0	1,48
2	2,0	1,48
3	3,0	1,49
4	4,0	1,37
5	5,0	1,29
6	6,0	1,28

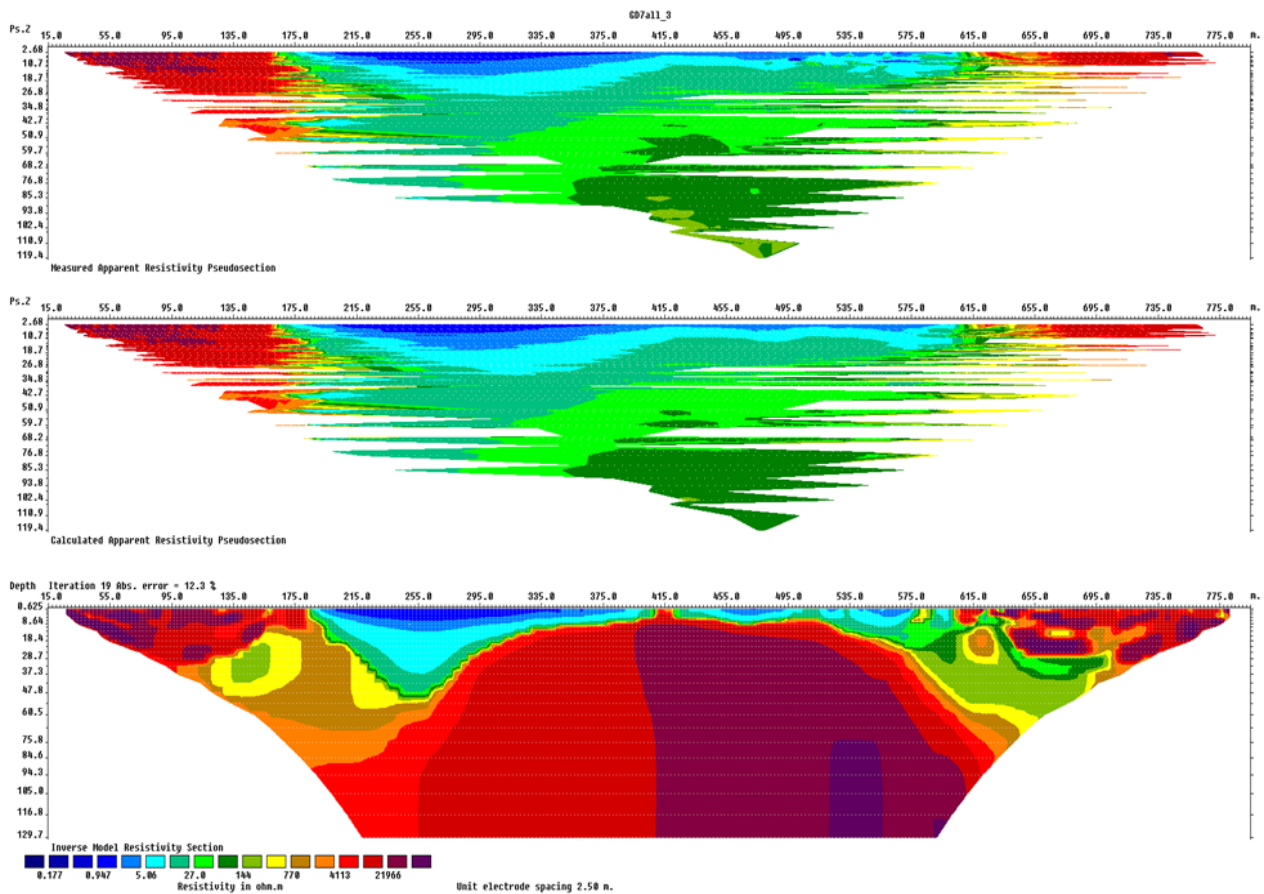
### 3.5 Antaganden

Vi antar:

- Modelleringsprogrammet modellerar vattnet som om det består av olika nivåer med olika resistivitet, istället för att vattnets resistivitet minskar med djupet.
- Instrumentet mäter marken som en homogen massa och därför kan den tolka en plötslig övergång från vatten till berg som en gradvis övergång till högre resistivitet istället för en knivskarp övergång.

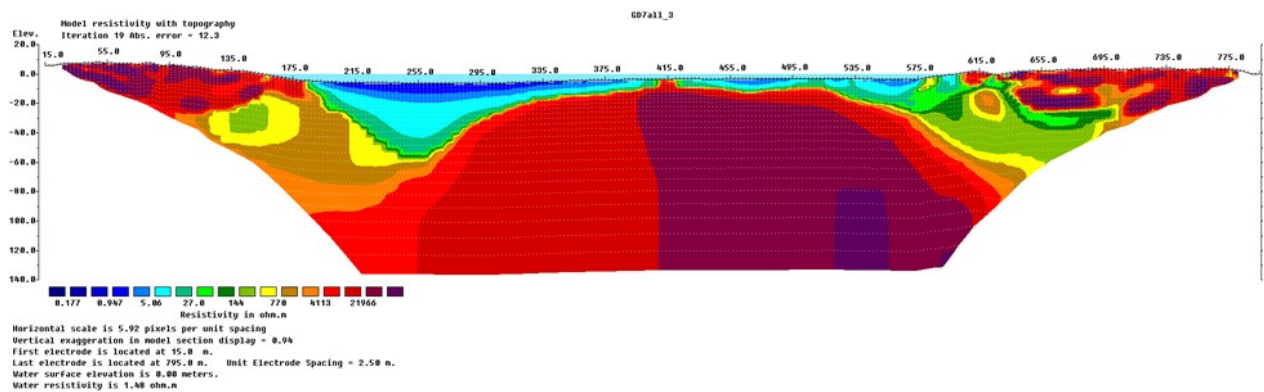


**Figur 8.** Diagrammet visar topografin för hur elektroderna låg. Varje punkt är en elektrod och den vänstra sidan av diagrammet är den sydligaste delen av profilen

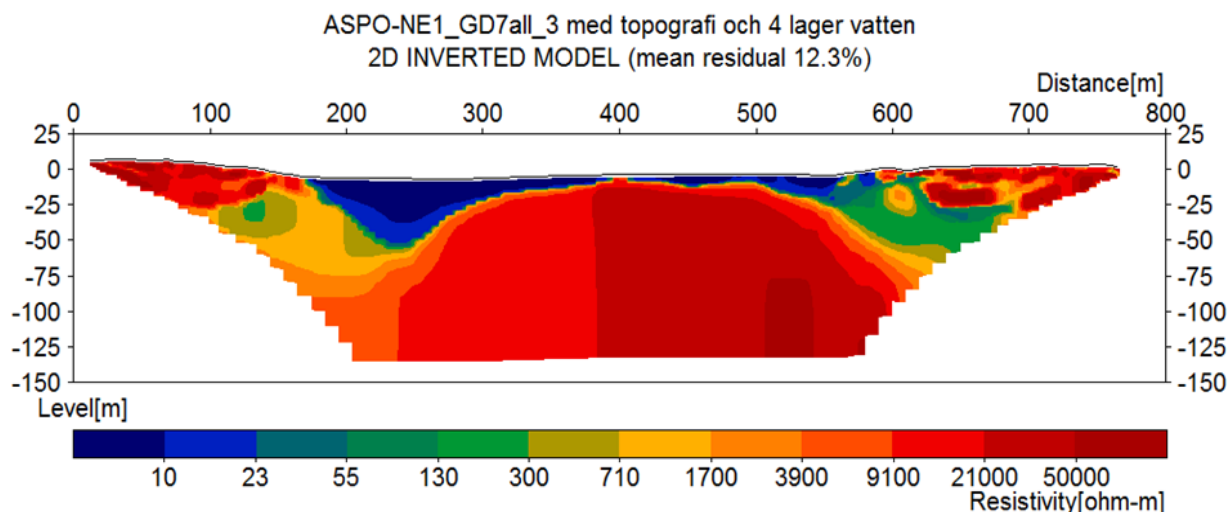


**Figur 9.** Resultatet för den längre profilen med protokoll A. Högst upp i figuren är pseudosektionen, i mitten är beräknad resistivitet och längst ned är den inverterade resistivitetsmodellen. På y-axeln syns det beräknade djupet och på x-axeln visas längden på profilen. Längst ned är färgskalan för hur hög resistiviteten är för de olika färgerna. Det är ingen topografi, batymetri eller vattendjup utsatt i figuren. Sprickzonen ligger mellan 550 m och 650 m på x-axeln med den gröna, gula och bruna färgen.

- Instrumentet filtrerar bort allt brus från jordningen av Oskarshamns kärnkraftverk.
- Multibeam Echosoundern tar fram exakt djup.
- Vi lade kabeln exakt rakt, såväl på land som på havsbotten.
- Interpolationer av de elektrodpositioner som inte gick att mäta med differential-GPS:en är lika bra som de verkliga positionerna hade varit.
- Interpolationen gjordes genom att en tangent drogs genom de elektrodpositioner som var närmast där det saknades mätningar.
- Pulvret Johnson Revert inte stör mätningarna



**Figur 10.** Bilden visar endast den inverterade resistivitetsmodellen från figur 9 här syns topografien, batymetrin och vattnet. Vattnet har en ljusblå färg som ligger ovanpå batymetrin. Topografien markeras av ett svart streck med markeringar som markerar var 2,5: e meter. Notera att topografien är svår att se på grund av att den varierar så lite i höjd jämfört med hur lång profilen är. Sprickzonen ligger mellan 550 m och 650 m på x-axeln med den gröna, gula och bruna färgen.



**Figur 11.** Resultatet av den inverterade resistivitetsmodellen i figur 11 och 12 som har ritats i Erigraph. Topografin visas i figuren men inte vattnet. Det är samma inverterade modell som i figur 11 och 12. Sprickzonen ligger mellan 550 m och 650 m på x-axeln med den gröna och gula färgen.

## 4. Resultat

### 4.1 Topografin

Topografiresultatet kan observeras i figur 8.

### 4.2 Vattenresistiviteten

Vattenresistiviteten för vattnet kan ses i tabell 1. Varje mätning i tabellen är två mätningar i verkligheten så ett medelvärde av dessa två mätningar visas i tabellen. Dessa värden har blivit avrundade från åtta värdesiffror till två.

### 4.3 Resistivitet

Två resultat från resistivitetmätningarna presenteras - ett från protokoll A och ett från protokoll B.

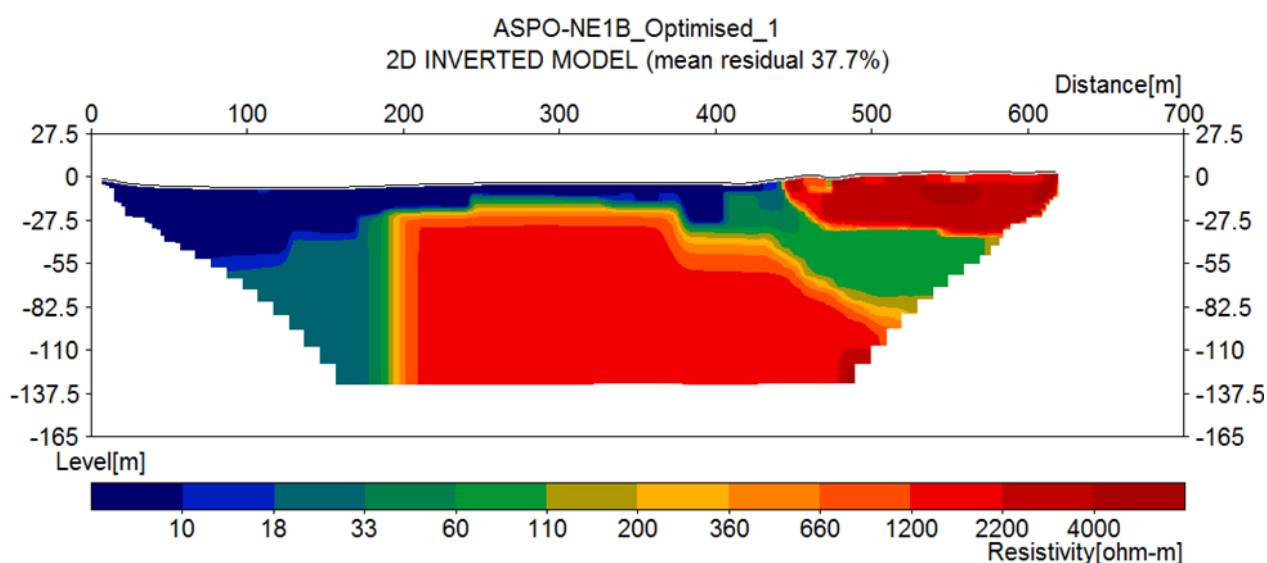
I Figur 9 och det viktigaste att notera bilden längst ned. Det är resultatet för protokoll A utan topografi,

batymetri eller vatten ilagt i bilden.

I figur 10 kan man se nästa samma sak som i figur 9 men här ska uppmärksamheten riktas till toppen på bilden där topografin och batymetrien finns utmärkt som en svart linje samt det tunna ljusblåa lagret längst upp vilket är vattnets utbredning

Figur 11 visar samma figur som i figur 9 och 10 bara att färgskalan har ändrats för att få se hur det ser ut men en annan färgskala. I denna figur finns topografin och batymetrien men inte vattenlagret med. Figuren har bearbetats i Erigraph för att kunna ändra färgskalan.

För att framställa figur 10,11 och 12 användes tre vattenlager för vattnet - ett från 0 till 4 meter med 1,48  $\Omega$ m, ett från 4 till 5 meter med 1,37  $\Omega$ m och ett



**Figur 12.** Modellsektionen som visas är från det Protokoll B. Den inverterade modellen har bearbetats i Res2dinvx64 och sedan i Erigraph. Den här mätningen slogs inte ihop med värden från södra sidan. 0 m på x-axeln här ligger på 160 m i figur 9,10,11. Vattnet visas inte i figuren men topografin visas. Sprickzonen ligger mellan 550 m och 650 m på x-axeln med den gröna och gula färgen.

från 5 meter och nedåt på 1,28  $\Omega\text{m}$ .

Figur 12 är framställd från resultaten från protokoll B det optimerade protokollet. Den inverterade modellen framställdes i res2dinvx64 och sedan ändrades färgskalan i Erigraph. Topografin och batymetrin visas i figuren men inte vattnet.

Sprickzonen kan observeras mellan 550 m på x-axeln och 650 på x-axeln. Den utgörs av den gröna och den gula färgen samt att den startar vid södra Äspö.

#### 4.4 IP-mätningar:

Resultatet för IP-mätningarna blev väldigt brusigt och mätningen tog lång tid så beslut togs att avbryta mätningen innan den var klar. Det material som framtogs innan mätningen avbröts kan troligtvis användas men kommer kräva mycket bearbetning. Bruset kan delvis filtreras bort och icke representativa datapunkter kan rensas bort. Tillräckligt med tid fanns dock inte för att hinna genomföras inom ramen för mitt kandidatarbete.

### 5. Diskussion

Resultaten som visas i figur 9-11 alltså protokoll A blev precisa och såg ut nästan som det vi förväntat oss. Trovärdigheten för protokoll B blev ganska lågt då resistiviteterna inte såg ut som förväntat. Resultatet för Protokoll B fick en större *mean residual* än förväntat och den södra delen av havet i profilen ser annorlunda ut än förväntat.

I den södra delen av havet trodde vi att det skulle vara berggrund här men resistiviteten är alldeles för låg för att det skulle kunna vara berg. Så vi tror att det finns en ca 50 meter mäktigt sedimentlager sju meter undervattenytan vid 255 m på x-axeln som har låg resistivitet (se figur 10).

Sprickzonen som vi skulle lokalisera återfanns där vi förväntade oss att hitta den för båda protokollen (se figur 10 och 12). Resistivitetmätningarna visar dock en helt annan stupning på sprickzonen än förväntat. Det kan vara på grund av 3D-effekterna eller att profilen inte skär NE1 vinkelrätt. Vi förväntade oss en sprickzon som var mycket mer vertikal än vad modellen visar. Enligt modellen så stupar den cirka 40° men enligt modeller i (Berglund et al. 2003) ska den stupa ca 70-80°. 40° kan inte heller stämma för annars skulle man inte återfinna NE1 i tunneln till Äspö HRL.

För de två resultaten har vi fått en ganska stor *mean residual* vilket är skillnaden mellan pseudosektionen och den beräknade resistiviteten. Detta beror delvis på att vi har väldigt stora skillnader i resistivitet på väldigt små avstånd och 3D effekter. Från vatten till berg ökar resistiviteten ca 6000 gånger. Men att ha en *mean residual* över 20 är inte bra, vilket är fallet för protokoll B. Bearbetning kan oftast minska skillnaden mellan beräknad resistivitet och pseudosektion.

#### 5.1 Protokoll A

För att få ett bättre resultat för vattnets resistivitet hade det varit bra att ha fler vattenresistivitetmätningar. Att mäta på en plats är inte tillräckligt när havet sträcker sig 450 m. Resistiviteten kan variera mycket på den sträckan.

På x-axeln mellan 110-175 meter och 25-50 meter i y-led finns det några väldigt låga värden (se figur 11). Dessa värden vet vi inte var de kommer ifrån. Det kan röra sig om något som vi än så länge inte vet vad det är eller att det är företeelse som modellen tolkat dit, men som egentligen inte finns. Det skulle kunna vara relaterat till sedimentlagret med låg resistivitet och övergången till berg med hög resistivitet. Vilket kan göra att Res2dinvx64 tolkar det som en gradvis övergång till hög resistivitet istället för en knivskarp övergång. Om det här sker är det troligtvis på grund av 3D effekter och ekvivalensproblem, men det kan också vara att det ser ut så. Det är inte geologiskt omöjligt men det är väldigt osannolikt. Det är fortfarande osäkert vad som orsakar dessa låga resistiviteter. Det hade därför varit mycket intressant att borra där.

Ön i mitten av den inverterade modellen ser ut som om den ligger i profilen, men vi lade profilen ca 20 meter väster om ön.

#### 5.2 Protokoll B

Den optimerade profilen har en väldigt stor *mean residual* på 37.7 % men det fanns inte tillräckligt mycket tid att tillgå för att hinna bearbeta materialet tillräckligt för att få fram ett bättre resultat.

Man kan se sprickzonen precis som i profilen från protokoll A men resistiviteten för hela den inverterade modellen är lägre (se figur 12). Den ligger på max 4000  $\Omega\text{m}$  istället för 50000  $\Omega\text{m}$  som i profilen från protokoll A.

Bergskanten blir horisontell i protokoll B vilket det aldrig blir i det protokoll A. Om det beror på skillnaden i den beräknade och den uppmätta resistiviteten eller något annat är svårt att avgöra.

Resistiviteten för där det ska vara berg är enligt figur 12 är ca 33  $\Omega\text{m}$  i protokoll B, ca 150m på x-axeln och 82,5m på y-axeln, vilket indikerar på att det borde vara sediment där. Det säger emot det mer troliga resultatet från protokoll A.

#### 5.3 Felkällor

Det finns många möjliga felkällor men inga av dem som påverkar resultaten mycket. Nedan följer några av dem.

- Den inverterade modellen har sina begränsningar så som på grund av 3D effekter och ekvivalensproblem.
- Elektroavståndet varierade lite för vissa elektroder. På några få platser fanns det ingen bra elektrodkontakt inom de närmaste decimetrarna så några var tvungna att flyttas på för att få bra kontakt.
- Vissa elektroder gick inte att mäta in på grund



av störningar mellan GPS:en och satelliterna den mäter mot. Dessa punkter interpolerades vilket är en felkälla. Totalt femelektroder interpolerades.

- Alla koordinater var inte helt korrekt utplacerade när mina modeller skapades. Båda koordinaterna precis vid vatten brynet på båda sidor korrigerades i efterhand när modellerna var klara. Detta ger en liten felmarginal men borde inte påverka resultatet mycket.
- Kabeln är inte helt rak, utan den viker av vid vissa tillfällen på grund av att det inte kan läggas genom träd och liknande hinder.
- Jordningen av Oskarshamns kärnkraftverk stör mätningarna
- Mänskliga faktorer så som att glömma inställningar och annat är möjligt men inte troligt

## 6. Slutsats

Det finns fortfarande möjlighet att utveckla de geologiska metoderna för att de ska fungera optimalt. Både instrument och modelleringsprogram kan förbättras.

Modelleringsprogrammen ger en bra överblick över hur marken är uppbyggd men detaljerna är fortfarande osäkra. Hur mätningarna utförs i fält kan förbättra undersökningsresultatet avsevärt. Men man måste komma ihåg att alla typer av geofysiska mätningar har sina egna begränsningar och kommer därför att behöva korreleras med andra geofysiska mätningar.

Det krävs mycket väl utfört fältarbete för att kunna få fram trovärdiga och precisa resultat.

Mycket mer tid krävs för att bearbeta data som har stora variationer i resistivitet på väldigt små avstånd än data som inte har det. Det krävs också mycket mer tid att bearbeta dålig fältdata än bra fältdata!

Elektroder ska inte placeras rakt på berg utan där det finns sprickor. Om elektroder placeras rakt på berg utan sprickor kommer berget isolera så bra att det knappt kommer ned ström i marken, vilket ger väldigt osäkra resultat, om ens ett resultat erhålls.

Res2dinvx64 är inte alltid den bästa programvaran att bearbeta resultaten med, då den har en tendens att dra ut resultaten i vertikala led. Men det är en av de bästa programvarorna på marknaden och den mest väl etablerade.

Differential-GPS:en är ett väldigt bra instrument för att få ut bra elektrodpositioner. Multibeam echosoundern fick fram bra data över topografin i vatt-net.

Johnsons Revert är bra på att skapa elektrodkontakt med marken.

## 7. Tackord

Jag vill framförallt tacka Torlief Dahlin för att han lät mig följa med och skriva mitt kandidatarbete om hans projekt och för all hjälp jag har fått från honom med mitt arbete och bearbetning av resultaten.

Jag vill också tacka Marcus Wennermark, Roger Wisén, Per-Ivar Olsson, Sara Johansson och Nayeli

Lasheras Maas för ett bra utfört jobb under fältveckan.

Jag vill tacka Marcus Wennermark och Sara Johansson för hjälpen under resultat framställningen. Jag vill slutligen också tacka Helena Filipsson för hjälpen av rättning av arbetet och ett bra jobb som handledare.

## 8. Referenser

- Berglund, J., Curtis, P., Eliasson, T., Olsson, T., Starzec, P. & Tullborg, E.-L., 2003: Update of the geological model 2002: *SKB publikationer IPR-03-34*, 1-130.
- Bergman, T., Rune Johansson, Lindén, A. H., Jonas Lindgren, Rudmark, L., Wahlgren, C.-H., Isaksson, H. & Lindroos, H., 1998: Förstudie Oskarshamn: *SKB publikationer R-98-56*, 1-111.
- Dahlin, T., Loke, M., Siikanen, J. & Höök, M., 2014: Underwater ERT Survey for Site Investigation for a New Line for Stockholm Metro, 1-5.
- Harmansson, A. & Ekström, M. 2014. *Ytor för trafik i staden*. (Master Thesis), Chalmers Tekniska Högskola.
- Jeppsson, H. & Dahlin, T., 2015: Geoelektriska metoder: *Introduktion för Geoelektriska metoder*, 1-70.
- Skb, 2013: Annual Report 2012: *Svensk kärnbränslehantering AB TR-13-10*, 1-184.
- Stanfors, R., Erlström, M. & Markström, I., 1991: Äspö Hard Rock Laboratory. Overview of the investigations, 1986-1990: *TR 91-20*, 1-71.
- Trust-Geoinfra, 2015a: 2.1 Geoelektrisk kartläggning för förundersökning av underjordisk infrastruktur i urban miljö. Hämtad, från <http://trust-geoinfra.se/delprojekt/2-1.html>.
- Trust-Geoinfra, 2015b: Startside Geoinfra-TRUST. Hämtad, från <http://www.trust-geoinfra.se/>.

## Tidigare skrifter i serien

### ”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

391. Svahn, Fredrika, 2014: Traces of impact in crystalline rock – A summary of processes and products of shock metamorphism in crystalline rock with focus on planar deformation features in feldspars. (15 hp)
392. Järvin, Sara, 2014: Studie av faktorer som påverkar skredutbredningen vid Norsälven, Värmland. (15 hp)
393. Åberg, Gisela, 2014: Stratigrafin i Hanöbukten under senaste glaciationen: en studie av borrhävar från IODP's expedition nr 347. (15 hp)
394. Westlund, Kristian, 2014: Geomorphological evidence for an ongoing transgression on northwestern Svalbard. (15 hp)
395. Rooth, Richard, 2014: Uppföljning av utlastningsgrad vid Dannemora gruva; april 2012 - april 2014. (15 hp)
396. Persson, Daniel, 2014: Miljögeologisk undersökning av deponin vid Getabjär, Sölvesborg. (15 hp)
397. Jennerheim, Jessica, 2014: Undersökning av långsiktiga effekter på mark och grundvatten vid infiltration av lakvatten – fältundersökning och utvärdering av förhållanden vid Kejsarkullens avfallsanläggning, Hultsfred. (15 hp)
398. Särman, Kim, 2014: Utvärdering av befintliga vattenskyddsområden i Sverige. (15 hp)
399. Tuveson, Henrik, 2014: Från hav till land – en beskrivning av geologin i Skrylle. (15 hp)
400. Nilsson Brunlid, Anette, 2014: Paleoeologisk och kemisk-fysikalisk undersökning av ett avvikande sedimentlager i Barsebäcks mosse, sydvästra Skåne, bil dat för ca 13 000 år sedan. (15 hp)
401. Falkenhaus, Jorunn, 2014: Vattnets kretslopp i området vid Lilla Klåveröd: ett kunskapsprojekt med vatten i fokus. (15 hp)
402. Heingård, Miriam, 2014: Long bone and vertebral microanatomy and osteohistology of 'Platecarpus' ptychodon (Reptilia, Mosasauridae) – implications for marine adaptations. (15 hp)
403. Kall, Christoffer, 2014: Microscopic echinoderm remains from the Darriwilian (Middle Ordovician) of Västergötland, Sweden – faunal composition and applicability as environmental proxies. (15 hp)
404. Preis Bergdahl, Daniel, 2014: Geoenergi för växthusjordbruk – Möjlig anläggning av värme och kyla i Västskåne. (15 hp)
405. Jakobsson, Mikael, 2014: Geophysical characterization and petrographic analysis of cap and reservoir rocks within the Lund Sandstone in Kyrkheddinge. (15 hp)
406. Björnfors, Oliver, 2014: A comparison of size fractions in faunal assemblages of deep-water benthic foraminifera—A case study from the coast of SW-Africa.. (15 hp)
407. Rådman, Johan, 2014: U-Pb baddeleyite geochronology and geochemistry of the White Mfolozi Dyke Swarm: unravelling the complexities of 2.70-2.66 Ga dyke swarms on the eastern Kaapvaal Craton, South Africa. (45 hp)
408. Andersson, Monica, 2014: Drumliner vid moderna glaciärer — hur vanliga är de? (15 hp)
409. Olsenius, Björn, 2014: Vinderosion, sanddrift och markanvändning på Kristianstadssläätten. (15 hp)
410. Bokhari Friberg, Yasmin, 2014: Oxygen isotopes in corals and their use as proxies for El Niño. (15 hp)
411. Fullerton, Wayne, 2014: REE mineralisation and metasomatic alteration in the Olserum metasediments. (45 hp)
412. Mekhaldi, Florian, 2014: The cosmic-ray events around AD 775 and AD 993 - Assessing their causes and possible effects on climate. (45 hp)
413. Timms Eliasson, Isabelle, 2014: Is it possible to reconstruct local presence of pine on bogs during the Holocene based on pollen data? A study based on surface and stratigraphical samples from three bogs in southern Sweden. (45 hp)
414. Hjulström, Joakim, 2014: Bortforsling av kaxblandat vatten från borrhinar via dagvattenledning: Riskanalys, karaktärisering av kaxvatten och reningsmetoder. (45 hp)
415. Fredrich, Birgit, 2014: Metadolerites as quantitative P-T markers for Sveconorwegian metamorphism, SW Sweden. (45 hp)
416. Alebouyeh Semami, Farnaz, 2014: U-Pb geochronology of the Tsineng dyke swarm and paleomagnetism of the Hartley Basalt, South Africa – evidence for two separate magmatic events at 1.93-1.92 and 1.88-1.84 Ga in the Kalahari craton. (45 hp)

- hp)
417. Reiche, Sophie, 2014: Ascertaining the lithological boundaries of the Yoldia Sea of the Baltic Sea – a geochemical approach. (45 hp)
  418. Mroczek, Robert, 2014: Microscopic shock-metamorphic features in crystalline bedrock: A comparison between shocked and unshocked granite from the Siljan impact structure. (15 hp)
  419. Balijs, Fisnik, 2014: Radon ett samhällsproblem - En litteraturstudie om geologiskt sammanhang, hälsoeffekter och möjliga lösningar. (15 hp)
  420. Andersson, Sandra, 2014: Undersökning av kalciumkarbonatförekomsten i infiltrationsområdet i Sydvattens vattenverk, Vombverket. (15 hp)
  421. Martin, Ellinor, 2014: Chrome spinel grains from the Komstad Limestone Formation, Killeröd, southern Sweden: A high-resolution study of an increased meteorite flux in the Middle Ordovician. (45 hp)
  422. Gabrielsson, Johan, 2014: A study over Mg/Ca in benthic foraminifera sampled across a large salinity gradient. (45 hp)
  423. Ingvaldson, Ola, 2015: Ansvarsutredningar av tre potentiellt förorenade fastigheter i Helsingborgs stad. (15 hp)
  424. Robygd, Joakim, 2015: Geochemical and palaeomagnetic characteristics of a Swedish Holocene sediment sequence from Lake Storsjön, Jämtland. (45 hp)
  425. Larsson, Måns, 2015: Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem. (15 hp)
  426. Hertzman, Hanna, 2015: Pharmaceuticals in groundwater - a literature review. (15 hp)
  427. Thulin Olander, Henric, 2015: A contribution to the knowledge of Fårö's hydrogeology. (45 hp)
  428. Peterffy, Olof, 2015: Sedimentology and carbon isotope stratigraphy of Lower-Middle Ordovician successions of Slemestad (Oslo-Asker, Norway) and Brunflo (Jämtland, Sweden). (45 hp)
  429. Sjunnesson, Alexandra, 2015: Spårämnesförsök med nitrat för bedömning av spridning och uppehållstid vid återinfiltration av grundvatten. (15 hp)
  430. Henao, Victor, 2015: A palaeoenvironmental study of a peat sequence from Iles Kerguelen (49° S, Indian Ocean) for the Last Deglaciation based on pollen analysis. (45 hp)
  431. Landgren, Susanne, 2015: Using calcine-filled osmotic pumps to study the calcification response of benthic foraminifera to induced hypoxia under *in situ* conditions: An experimental approach. (45 hp)
  432. von Knorring, Robert, 2015: Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet. (30 hp)
  433. Rezvani, Azadeh, 2015: Spectral Time Domain Induced Polarization - Factors Affecting Spectral Data Information Content and Applicability to Geological Characterization. (45 hp)
  434. Vasilica, Alexander, 2015: Geofysisk karaktärisering av de ordoviciska kalkstensheterna på södra Gotland. (15 hp)
  435. Olsson, Sofia, 2015: Naturlig nedbrytning av klorerade lösningsmedel: en modellering i Biochlor baserat på en fallstudie. (15 hp)
  436. Huitema, Moa, 2015: Inventering av föroreningar vid en brandövningsplats i Linköpings kommun. (15 hp)
  437. Nordlander, Lina, 2015: Borrningsteknikens påverkan vid provtagning inför dimensionering av formationsfilter. (15 hp)
  438. Fennvik, Erik, 2015: Resistivitet och IP-mätningar vid Äspö Hard Rock Laboratory. (15 hp)



# LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
Sölvegatan 12, 223 62 Lund