

MSc Thesis, VTG820
ISRN LUTVDG / (TVTG-5145) / 1-85 / (2016)

Kombinerad förundersökning för tunnlar med resistivitet och refraktionsseismik i urban undervattensmiljö

Elisabeth Lindvall
Erik Warberg Larsson
Teknisk geologi
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet



Väg- och vattenbyggnad, Examensarbete
VTG820

Kombinerad förundersökning för tunnlar med resistivitet och refraktionsseismik i urban undervattensmiljö

Combined tunneling site investigations with resistivity and refraction seismic in urban underwater environments

Elisabeth Lindvall och Erik Warberg Larsson

Teknisk Geologi/Engineering Geology
Lunds Tekniska Högskola/Faculty of Engineering
Lunds Universitet/Lund University

Lund 2016

Handledare/Supervisors:
Roger Wisén, Teknisk Geologi
Torleif Dahlin, Teknisk Geologi

Examinator/Examiner
Peter Ulriksen, Teknisk Geologi

Författare:

Elisabeth Lindvall

Erik Warberg Larsson

Titel:

Kombinerad förundersökning för tunnlar med resistivitet och refraktionsseismik i urban undervattensmiljö

Title:

Combined tunneling site investigations with resistivity and refraction seismic in urban underwater environments

85 sidor + 5 bilagor

58 figurer

7 tabeller

7 diagram

9 formler



Förord

Examensarbetet är ett avslutande arbete på Civilingenjörsutbildningen i Väg- och Vattenbyggnad och är utfört av två teknologer vid Lunds Tekniska Högskola för avdelningen Teknisk Geologi. Arbetet påbörjades i september, hösten 2015, och avslutades i februari 2016 och inkluderar ett fältarbete i Stockholm under september och oktober månad.

Utöver LTH har examensarbetet haft ett samarbete med TRUST (Transparent Underground Structure), Trafikverket och Rambøll.

BeFo (Stiftelsen Bergteknisk Forskning) och Trafikverket har finansierat examensarbetet.

Vi vill tacka alla som har varit inblandade i examensarbetet och speciellt våra handledare Roger Wisén och Torleif Dahlin.

Erik Warberg och Elisabeth Lindvall

Lund, februari 2016

Abstract

Due to expanding cities and increasing population infrastructure needs to expand in a safe and sustainable way with little effect on the environment and economy. Years of urbanization doesn't make it easy, no free spaces are available and culture marked buildings are protected. The only alternative left is to construct in layers. Roads and other kinds of infrastructure beneath ground level is therefore attractive and promotes sustainable development.

The master thesis is a cooperation with TRUST¹'s research and development project in sustainable development of urban underground infrastructure. The project is wide but this thesis will focus on pre-investigation with geophysical mapping and integration between these and geotechnical data, like probes and boreholes.

Stockholm is a good example of an expanding urban area with surroundings of water. The risk that new infrastructure will have to cross water passages is high. With the use of two different geophysical methods, resistivity (ERT) and refraction seismic, four different underwater areas has been investigated focusing on locating the hard rock surface and weakness zones. Knowing their locations are most important when constructing a tunnel. The areas of investigation are located both in fresh and saline water in Mälaren and Saltsjön. Investigations with combined resistivity and refraction seismic have been done several times before, on land. Underwater surveys, on the other hand, are not as common and has only been done a few times in Sweden.

The results from the four investigation lines show both similarities and differences when comparing potential weakness zones and the hard rock surface between the two methods. This was expected since resistivity and refraction seismic investigates different properties of the ground and therefore can observe different structures. Both methods show a good estimation of the hard rock surface. The seismic method generally show a deeper level due to the weathered condition of the hard rock and the presence of till. Noise from the urban area was a problem that easily could be reduced by measuring during night time. Some difficulties was found in surveying resistivity in saline water, since its high conductivity properties, and the presence of gas in the sediments for the seismic which complicated the analyzing process. The authors recommends using both methods when doing complicated surveys like those done in this thesis, both for verifying and supplementing each other's result.

The fieldwork was set in September/October 2015 in Stockholm.

¹ Transparent Underground Structure

Sammanfattning

Storstäder blir allt större och befolkningsmängden ökar. Samhällets infrastruktur behöver utökas utan att tumma på säkert, energisnålhet, miljövänlighet och underhåll. I en växande storstad blir kraven på infrastrukturen allt högre medan de fria utrymmena blir både färre och mindre, därför är alternativet med undermarksanläggningar mycket attraktivt och främjar hållbar utveckling.

Examensarbetet är en del av TRUST²'s arbete inom forsknings- och utvecklingsprojekt om hållbar utveckling av urban underjordisk infrastruktur. Stockholm är ett bra exempel på ett urbant område som expanderar. Genom att utveckla nya metoder och tekniker inom alla skeden i ett byggprojekt kan energi- och miljömål upprätthållas. TRUST's arbete är brett medan detta examensarbete fokuserar på förundersökningsskedet av byggprocessen med geofysisk kartläggning och en integrerad användning och tolkning av geofysisk och icke-geofysisk data.

De geofysiska metoderna som kommer att användas är resistivitet (ERT–Electrical Resistivity Tomography) och refraktionsseismik som tolkas och jämförs med befintliga borrhål och sonderingar.

Stockholm har ännu en utmaning, staden är byggd på öar vilket betyder att sannolikheten är stor att nya tunnlar måste korsa under vatten. Undersökningarna i detta examensarbete är därför fokuserade mot vattenpassagerna där svaghetszoner och bergnivåer kommer att kartläggas. Att göra kombinerade undersökningar av resistivitet och refraktionsseismik på land har gjorts många gånger tidigare men undervattensundersökningar är inte lika beprövat i Sverige. I Stockholm finns det områden med sötvatten och andra områden med bräckt vatten från Östersjön. För att kunna utvärdera de geofysiska metoderna grundligt utförs undersökningarna i de olika hydromiljöerna.

Fältarbetet med resistivitet och refraktionsseismik utfördes i september och oktober år 2015 i Stockholm. Examensarbetet riktar sig mot två undersökningslinjer i Mälaren och två i Saltsjön. Detta medförde att undersökningar blev möjliga i både sötvatten och bräckt vatten.

Resultaten från de fyra undersökningslinjerna visar både likheter och skillnader vid jämförelse av potentiella svaghetszoner och bergnivå från de olika metoderna. Skillnaderna var väntade då resistivitet och refraktionsseismik mäter olika egenskaper i marken. Den seismiska metoden tycks ha tendens att uppvisa ett större djup till berg på grund av den vittrade berggrunden eller närvaron av morän. Gentemot sonderingar i området gav båda metoder ett gott resultat. Störningar från tätorten var ett problem som lätt kunde minskas genom att mäta nattetid. På grund av saltvattnets höga ledningsförmåga påträffades svårigheter vid mätandet av resistivitet, medan seismikundersökningarna stördes av gas i sedimenten som komplicerade analysprocessen. Författarna rekommenderar användning av båda metoderna vid liknande undersökningar, både för att kontrollera och komplettera resultaten.

² Transparent Underground Structure – FoU-projekt inom undermarksbyggande.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Disposition	2
2	Geofysikens roll i infrastrukturprojekt.....	3
3	Metod	7
3.1	Positionering.....	7
3.1.1	Bakomliggande teori	7
3.1.2	Praktiskt genomförande	9
3.1.3	Analysering- och processeringsskede	11
3.2	Refraktionsseismik	11
3.2.1	Bakomliggande teori	11
3.2.2	Praktiskt genomförande	16
3.2.3	Analysering- och processeringsskede	17
3.3	Resistivitet	19
3.3.1	Bakomliggande teori	19
3.3.2	Praktiskt genomförande	23
3.3.3	Analysering- och processeringsskede	24
4	Undersökningsområden	28
4.1	Geologi	28
4.2	Lambarfjärden	30
4.3	Hägersten	32
4.4	Finnboda-Biskopsudden.....	34
4.5	Kvarnholmen–Blockhusudden	35
5	Störningar från området.....	38
6	Resultat och analys av respektive undersökningslinje.....	40
6.1	Lambarfjärden	40
6.1.1	Resistivitet.....	40
6.1.2	Referensdata	43
6.1.3	Jämförelse	45
6.2	Hägersten	46
6.2.1	Resistivitet.....	46
6.2.2	Seismik	49
6.2.3	Referensdata	50

6.2.4	Jämförelse	50
6.3	Finnboda-Biskopsudden.....	51
6.3.1	Resistivitet.....	51
6.3.2	Seismik	53
6.3.3	Referensdata	53
6.3.4	Jämförelse och diskussion	54
6.4	Kvarnholmen-Blockhusudden.....	56
6.4.1	Resistivitet.....	56
6.4.2	Seismik	60
6.4.3	Referensdata	62
6.4.4	Jämförelse	64
7	Diskussion	66
8	Slutsatser	72
9	Förslag för fortsatta studier.....	74
10	Referenser.....	76
11	Bilagor	80
11.1	Bilaga – Matlab-skript för uträkning av z-koordinat längs mätlinjen.....	81
11.2	Bilaga – Utrustning, inställningar samt programvara för seismikmätningarna	82
11.3	Bilaga - Inställningar ABEM Terrameter LS - multipel gradientmätning....	83
11.4	Bilaga – Inställningar ABEM Terrameter LS - pol-dipol-mätning	84
11.5	Bilaga – Sammanställningstabell över samtliga undersökningslinjer	85

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Examensarbetet är en del av projektet TRUSTs arbete att främja forskning om hållbar utveckling för underjordisk infrastruktur. TRUST (Transparent Underground Structure) är ett FoU-projekt som påbörjades år 2013 inom undermarksbyggande som ett samarbete mellan universitetsforskare, Trafikverket och specialister inom branschen. Projektet i sig består av nio delprojekt och detta examensarbete grundar sig på två av dem, TRUST 2.1 och 4.2.

- TRUST 2.1 - Geoelektrisk kartläggning för förundersökning av underjordisk infrastruktur
- TRUST 4.2 - Integrerad användning och tolkning av geofysiska och icke-geofysiska data för förundersökning till undermarksanläggning

Geofysiska mätningar har gjorts i fyra olika vattenpassager, i den urbana Stockholmsmiljön, med metoderna resistivitet och refraktionsseismik. De fyra olika passagera är alla kopplade till olika tunnelprojekt.

De tre undersökningsområdena är:

- Lambarfjärden, belägen norr om Lovön, som är en sträckning för projektet "Förbifart Stockholm"
- Hägersten som är gjord i vattenpassagen norr om Hägersten och riktad mot projektet "Framtidens avloppsrening" för Stockholm Vatten
- Finnboda-Biskopsudden och Kvarnholmen–Blockhusudden som är passager i Saltsjön och kopplade till projektet "Östlig Förbindelse"

Vid underjordiska byggnationer, som tunnlar, är det viktigt att ha koll på bergövertäckning och grundvatten. Detta medför ett behov av att kartlägga bergöveryta, svaghetszoner samt bergets hydrauliska egenskaper. Då svaghetszonerna och lågpunkter oftast är belägna kring eller i vatten är det av intresse att kunna utföra geofysiska mätningar i vattenpassager. Resistivitet och refraktionsseismik är två skilda geofysiska mätningar som beskriver mark och berg på olika sätt. Dessa två metoder kommer i examensarbetet att jämföras med borrhål och bergsonderingar som normalt anses ha en större säkerhet i sin tolkning. Jämförelsen görs okulärt mellan de framtagna resultaten.

I Sverige är det inte ovanligt att genomföra kombinerade mätningar med resistivitet och refraktionsseismik på land. Det är dock ett nytt koncept att utföra den typen av mätningar i vattenpassager. Framförallt är det intressant att utvärdera hur väl metoderna fungerar i en urban miljö som Stockholm, ett område med stora utmaningar på grund av det centrala läget och stora störningskällor.

1.2 Syfte

Syftet med undersökningarna är att testa och utvärdera resistivitets tomografi och refraktionsseismisk tomografi som verktyg för antagande av djup till berg och utvärdering av bergkvaliteten. Undersökningarna riktas mot förundersökningsskedet i tunnelbyggen i urbana undervattensmiljöer. Syftet är även att jämföra resultaten mellan de olika mätmetoderna och undersöka vilka likheter och skillnader som finns. Resultaten från de båda mätmetoderna jämförs med "verkligheten" som representeras av bland annat borrhål och jord-bergsonderingar. Jämförelse av bergnivå och svaghetszoner mellan de olika metoderna är en del av slutsatsen och diskussionen tillsammans med andra jämförelser och iakttagelser av de båda metoderna.

Följande punkter är av intresse men avgränsas och ingår inte som en del av examensarbetet:

- En integrerad tolkning av metoderna, så kallad "Joint Inversion"
- Detaljanalysering av störningar i urbana områden
- Utvärdering av "Induced Polarization"
- Utvärdering av undersökningsdjupet av resistivitets tomografi, så kallad "Depth of Investigation"

1.3 Disposition

Examensrapporten inleds med en beskrivning om geofysik för att senare övergå till hur de två geofysiska mätmetoderna fungerar teoretiskt, hur mätdata har samlats in i fält och hur den tolkas med olika mjukvaruprogram. Störningar från området utvärderas följt av geologi och förutsättningar för de olika undersökningsområdena. I resultatdelen redovisas insamlad data och referensinformation som tolkas och jämförs. Till sist diskuteras de framtagna resultaten.

2 Geofysikens roll i infrastrukturprojekt

I Stockholm ökar befolkningsmängden och högre krav ställs på infrastrukturen. Staden blir mer och mer tätbebyggd och det blir svårare att finna plats för utökning av väg- och järnvägsnät för en ökad framkomlighet. På grund av detta krävs nyproduktion under marken eller möjligtvis på höjden. Staden består även av flera öar vilket gör att nya vägsträckningar måste korsa vatten med krav på tunnel eller bro.

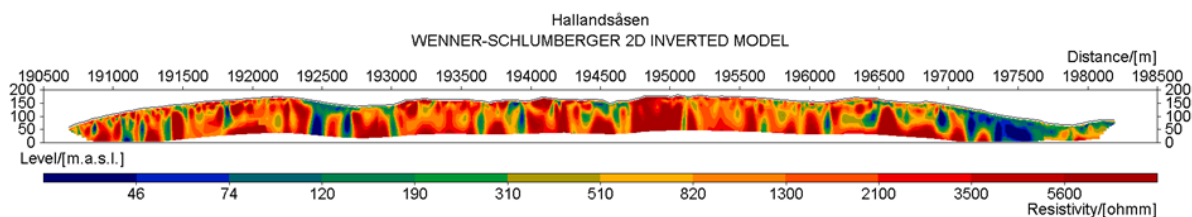


Figur 1 - Karta över Stockholm med Tunnelbaneplan, Stockholm år 1965 från Generalberedningens Tunnelbanekommitté

Vid större projekt, som till exempel byggande av tunnel, är det viktigt att ha kunskap om kvaliteten på berg och potentiella svaghetszoner för att minimera onödiga risker. Det är här som geofysik kommer in i bilden. De geofysiska metoderna kan ge kostnadseffektiv och övergripande information om marken. Metoderna mäter olika fysiska egenskaper och måste därför väljas för varje specifikt ändamål. Till skillnad från andra geologiska undersökningar som till exempel borrhövsningar är de geofysiska mätmetoderna icke-förstörande provningsmetoder och har därför minimal påverkan på området. I ett byggprojekt kan nästkommande steg optimeras om geofysiska undersökningar utförs i ett tidigt skede i processen. Efter undersökningarna kan borrhållspunkter anpassas till lokaliserade intressanta zoner som observerats och därmed öka chansen för en optimerad undersökning utan onödiga kostnader.

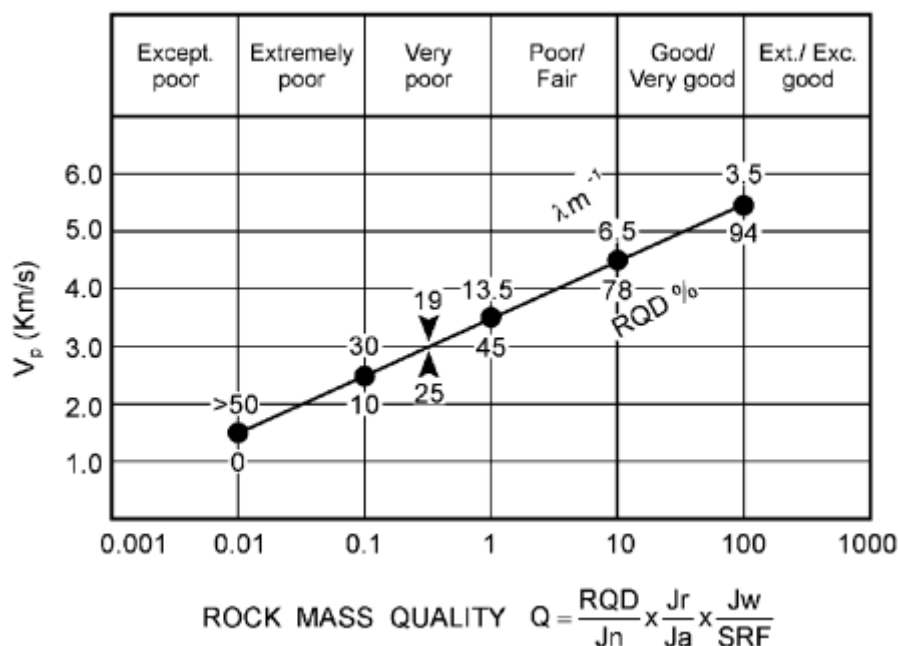
För undersökning av potentiella svaghetszoner och nivå till bergytan är resistivitet (ERT) och refraktionsseismik två geofysiska metoder som är passande för ändamålet. Undersökningar med resistivitet mäter markens elektriska ledningsförmåga och vid refraktionsseismik-undersökningar mäts istället i vilka hastigheter en ljudvåg kan röra sig i marken. Slutprodukten hos båda metoderna blir en sektion som kartlägger deras undersökningsegenskapers variation under en undersökningslinje. Olika ledningsförmågor och hastigheter kan sedan visa strukturer i marken som kan påvisa en potentiell svaghetszon eller till exempel en materialövergång mellan sediment och bergyta. De olika metoderna undersöker olika egenskaper i marken och slutresultatet kan därför bli olika vilket gör det fördelaktigt att utföra båda typer av mätningar.

Projektet att bygga en tågtunnel genom Hallandsåsen i nordvästra Skåne är ett bra exempel på hur geofysik kan vara ett användbart förundersökningsverktyg. Projektet har varit mycket omtalat från det att bygget påbörjades år 1992 till tunneln färdigställdes i december 2015. Mellan år 1997 och 2003 stod bygget stilla på grund av felaktig drivningsmetod av tunneln som inte passade de geologiska förutsättningarna. Geologin var undersökt och omfattande bergundersökningar och borrhovningar hade gjorts längs med hela tunneldragningen (Trafikverket, 2014). Fem parallella undersökningslinjer med resistivitet genomfördes där olika svaghetszoner i marken kartlades (Dahlin et al., 1998). Med hjälp av den översiktliga bilden över åsens resistivitet kunde projektet bättre förutsäga den kommande bergkvaliteten, vilket var till stor hjälp i det fortsatta arbetet med tunneln.



Figur 2 - Resistivitetssektion över Hallandsåsen

Även seismik kan hjälpa vid olika tunnelbyggen. Traditionellt är refraktionsseismiken den geofysiska metod som används mest vid förundersökning av tunnelbyggen. Detta då metodens resultat visar hur ljudhastigheten, som beror på materialets E-modul, varierar i marken. Denna modul kan direkt kopplas till bergets hållfasthet och är således användbart vid tunnelbyggnation. Enligt vissa studier kan ljudhastigheten grovt översättas till det traditionella värdet för bergets kvalitet, Q-värdet. Ett samband mellan hastighet och Q-värde visas i Figur 4 och är baserat på olika tunnelprojekt från flera olika länder (Barton, 2002).



Figur 3 – Samband mellan p-vågshastighet och Q-värdet (Barton, 2002).

J_a	rating for joint alteration, discontinuity filling (of least favourable set or discontinuity)
J_n	rating for number of joint sets
J_r	rating for joint surface roughness (of least favourable set or discontinuity)
J_w	rating for water softening, inflow and pressure effects
RQD	rock quality designation
SRF	rating for faulting, strength/stress ratios, squeezing, swelling

Figur 4 - Förklaring till termerna för beräkning av Q-värdet (Barton, 2002).

3 Metod

De fyra vattenpassagerna undersöktes med två olika geofysiska mätmetoder, refraktionsseismik och resistivitet. Vid refraktionsseismik skickas en seismisk våg (ljudvåg) ut från en källa, vågens variation i hastighet kan sedan kartläggas vilket ger en uppfattning om hur seismisk gånghastighet varierar i marken. Vid mätning med resistivitet sänds istället en elektrisk puls ut vilket skapar ett potentialfält. Potentialfältet kommer att anta olika form beroende på markens variation i ledningsförmåga, detta fält kan mätas och en bild över markens resistivitet kan beräknas. Tolkning av resultaten kan ge en bild av markens geologiska sammansättning. Då dessa två metoder ser på olika egenskaper hos marken kan tolkningen av dem ge olika resultat (Milsom & Eriksen, 2011).

Nedan följer mer information om de båda geofysiska metoderna och hur de använts i fältarbetet samt hur de sedan analyserats.

Vid kartläggning av områdena som ska undersökas är det viktigt att få in rätt position på undersökningslinjerna för att kunna jämföra resultaten och koppla linjerna till ett specifikt område. Nedan följer därför också ett kapitel om hur positionering fungerar och hur det har använts.

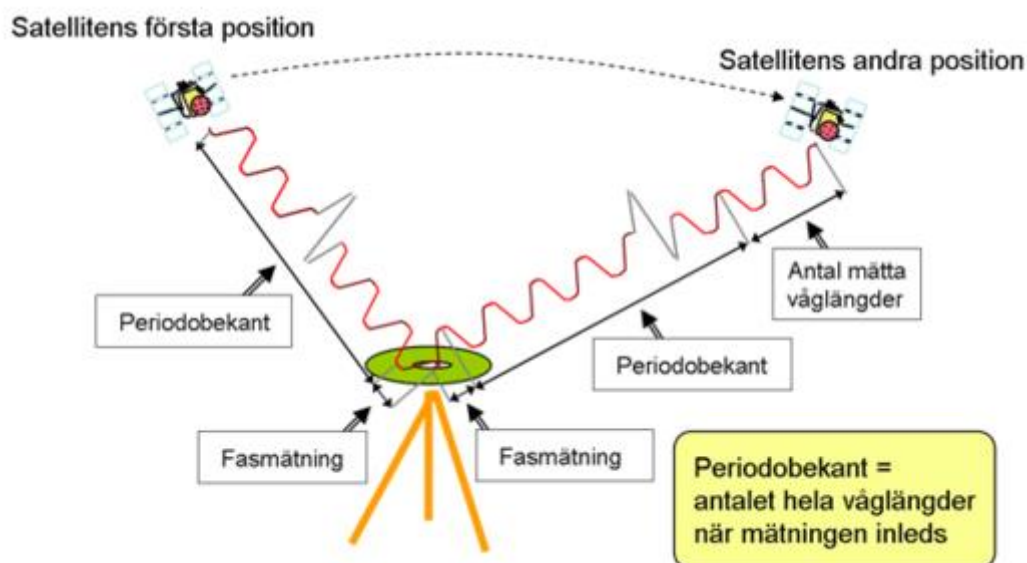
3.1 Positionering

3.1.1 Bakomliggande teori

Vid planeringsskedet, fältarbetet och analysskedet i ett projekt är det viktigt att ha koll på projektets koordinater. Utan dessa kan inte den insamlade informationen från fältarbetet knytas till en plats och tappas därför sitt värde. Det är därför mycket viktigt att i början av projektet bestämma vilket datum som ska användas. Då det rekommenderade datumet i Stockholm är SWEREF 99 1800, RH 2000 används detta genom hela projektet. Av praktiska skäl har koordinaterna i fält mätts in med nätverks-RTK (Real Time Kinematic). Nedan följer en beskrivning av vad nätverks-RTK innebär och vilka fördelar denna metod har.

För att förstå hur nätverks-RTK fungerar behövs först grundläggande kunskap om bärvågs-mätning. Vid denna typ av mätning skickar satelliterna ut en kontinuerlig sinusformad våg som har fått benämningen L1, se Figur 5. Signalen är, till skillnad från sitt namn, högst komplicerad och kräver en mer avancerad GNSS³-mottagare än vid vanlig kodmätning. Avståndet mellan satelliten och GNSS:en kan ses som antalet hela våglängder plus en del av en våglängd (Lantmäteriet, 2015a).

³ Global Navigation Satellite System



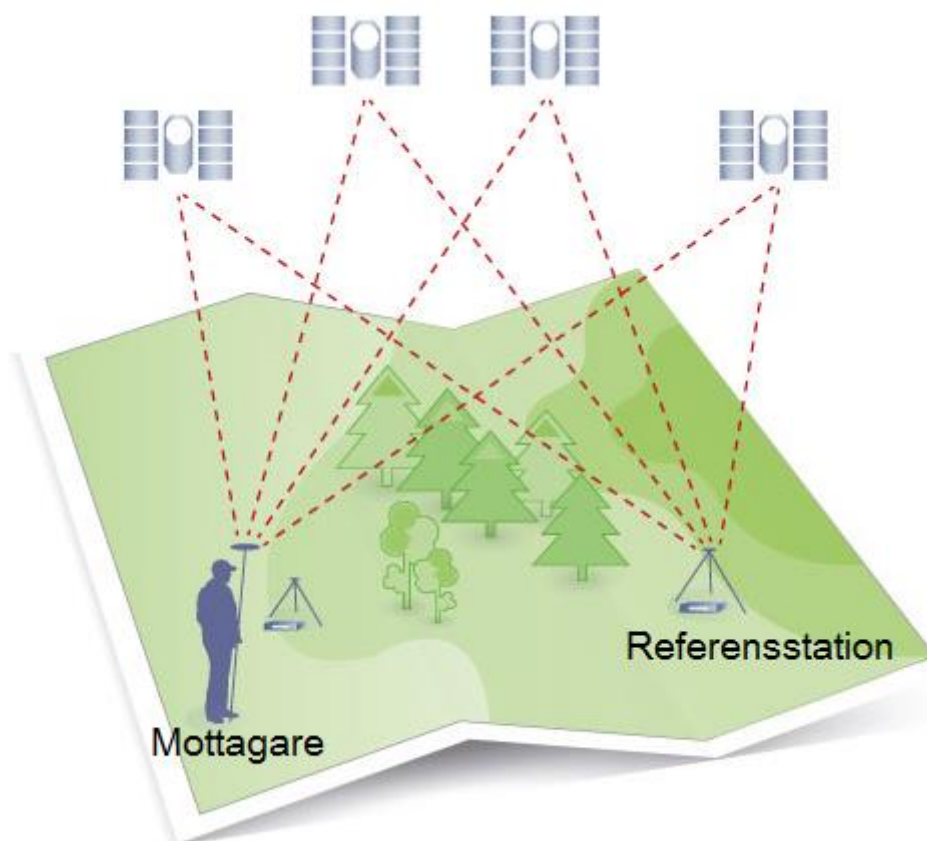
Figur 5 – Bärvågsmätning (Lantmäteriet, 2015a)

Antalet hela våglängder är okänt och kallas för periodobekant. Då en våglängd är ca 19 cm är det viktigt att rätt antal våglängder antas, annars kommer resultatet visa på minst 19 cm fel. Periodobekanta antas genom vanlig kodmätning samt genom att eliminera och minimera felkällor genom relativ positionering. Efter att mottagaren kopplat upp sig mot satelliterna påbörjas en så kallad fasmätning (Lantmäteriet, n.d.). Under fasmätningen kvarstår kontakten mellan satellit och mottagare och skillnad i antalet våglängder registreras, det är denna sträcka plus periodobekanta som utgör antagandet av avståndet mellan mottagare och satellit. Genom att kontinuerligt mäta hur fasmätningen förändras kan positionen antas i realtid. Det är då viktigt att mottagaren konstant har kontakt med satelliten. Genom att ansluta en referensstation med känd position till samma satelliter kan flera felkällor reduceras eller till och med elimineras, se Figur 6. Användande av en referensstation kallas relativ positionering, till exempel nätverks-RTK, och dess effekter på kända felkällor redovisas i tabellen nedan (Lantmäteriet, 2015b).

Tabell 1 - Felkällors effekt av relativ positionering

Felkälla	Effekt av relativ positionering
Satellit- och mottagarklockfel	Reduceras/elimineras
Satellitbanfel	Reduceras
Fel pga. Jonosfären	Reduceras
Fel pga. Troposfären	Ingen effekt
Flervägsfel	Reduceras då mätning sker över längre tid

Nätverks-RTK, som är den metoden som använts i detta arbete, är helt enkelt en relativ bärvågsmätning i realtid där flera av till exempel Lantmäteriets referensstationer ansluts via ett mobilt nätverk. Fördelarna med att ansluta via mobilnätet är att endast den portabla enheten behövs och behovet av att placera ut en lämplig referensstation försvinner.

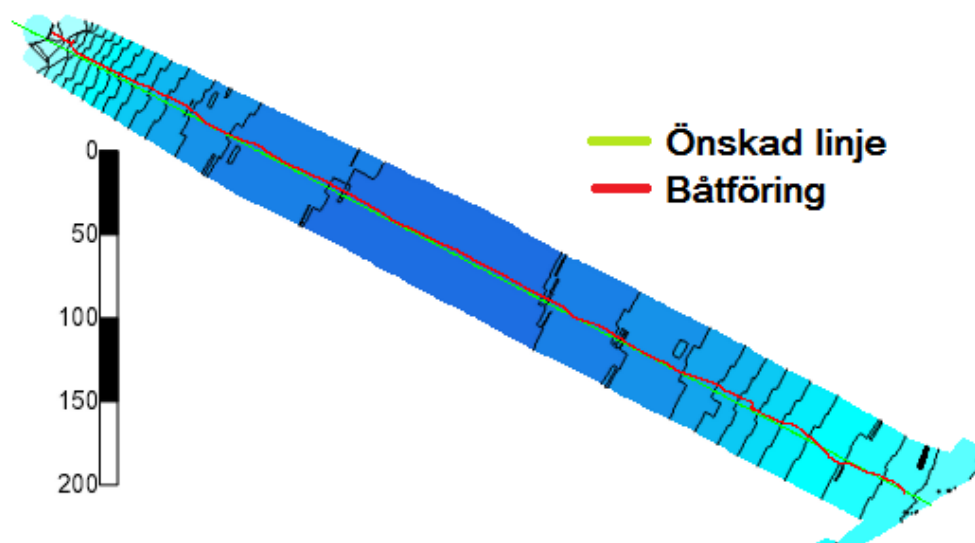


Figur 6 - Relativ positionering med referensstation (Lantmäteriet, 2015c)

3.1.2 Praktiskt genomförande

Vid fältarbetet lades långa kablar med geofysiska sensorer längs med botten på vattenpassager i Stockholmsområdet. När utläggning av kablarna skulle göras kopplades en bärbar dator av typen Toughbook med programmet Navipak ihop med GNSS:en som fästs i båtens för. Navipak använder positionen från GNSS-mottagaren och visar båtens position i realtid. Även bakgrundsinformation från kartor och de planerade undersökningslinjerna visas.

Utläggningen gjordes av praktiska skäl med backande båt där positionen relativt den planerade linjen visades i realtid, i Navipak. Vid utlägget styrde en person båten medan en annan hade ansvar att mata ut kablarna och hålla dem sträckta. På detta sätt kunde kablarna placeras längs linjen med tillräcklig precision. De oundvikliga mindre avvikelserna mellan den planerade linjen och den uppkomna efter båtföringen bedöms inte ha någon större effekt på utlägget. Detta tack vare att kabeln ständigt hölls sträckt vilket jämnade ut utläggets avvikelser. I bilden nedan syns ett exempel på de registrerade positionerna för båten under ett utlägg.



Figur 7 – Önskad linje jämfört med båtföringen

För seismiken positionerades den hydrofon som låg närmast land med en separat GNSS-mätning. På land togs elektrodernas positioner direkt med den handhållna enheten där både horisontella och vertikala koordinater registrerades. För de positioner som togs ute på vattnet erhöles endast de horisontella koordinaterna och z-koordinaten var tvungen att läggas till i efterhand, detta beskrivs nedan. I tabellen nedan följer start- och slutkoordinater för samtliga undersökningslinjer.

Tabell 2 – Koordinater för undersökningslinjerna

SWEREF 99 1800, RH2000	Startkoordinat	Slutkoordinat
Kvarnholmen- Blockhusudden		
Resistivitetsmätning	E: 158191.6 N: 6578027.2	E: 158447.5 N: 6578456.3
Seismikmätning	E: 158207.9 N: 6578054.8	E: 158430.1 N: 6578426.1
Finnboda- Biskopsudden		
Resistivitetsmätning	E: 156908.7 N: 6577952.6	E: 156983.9 N: 6578406.8
Seismikmätning	E: 156911.2 N: 6577950.5	E: 156968.9 N: 6578333.4
Hägersten		
Resistivitetsmätning	E: 148077.9 N: 6577117.6	E: 147596.5 N: 6577249.0
Seismikmätning	E: 148081.8 N: 6577114.9	E: 147618.7 N: 6577243.7
Lambarfjärden		
Resistivitetsmätning	E: 140855.5 N: 6581436.0	E: 141182.2 N: 6582058.4
Seismikmätning (referensdata)	E: 141144.2 N: 6582033.5	E: 140916.4 N: 6581599.8

Start- och slutkoordinat för resistivitet- och seismikmätningarna är inte den samma och längden på de båda utläggarna varierar. Detta berodde dels på en begränsning gällande sprängningstillstånd och dels på att seismikundersökningarna gjordes med två utlägg som överlappade varandra. Resistivitetsutläggarna kunde dras upp en bit på land om omgivning och terräng tillät det.

Vattendjupet är viktigt att veta vid undervattensundersökningar. Dels för att kunna kartlägga kablarnas position i z-led längs mätlinjen och dels för att vattenmassan ovanför elektroderna i resistivitetsmätningarna har stor betydelse i inversionen. Vattendjupet bestämdes genom användning av ett enkelstråligt ekolod. Ekolodet kördes fram och tillbaka, parallellt med undersökningslinjen, fem gånger med ungefär fem meters mellanrum. Med hjälp av detta skapades en övergripande bild av botten djupet i området runt undersökningslinjerna.

3.1.3 Analysering- och processeringsskede

Då alla positioner som registrerades i fält angavs direkt i SWEREF 99 1800, RH2000 behövdes ingen omvandling av de inmätta koordinaterna. Resultatet från ekolodet sammanställdes till en konturkarta i programmet Surfer. Denna konturkarta användes för att ta fram djupet för hydrofonerna och elektroderna. Med hjälp av start- och slutkoordinat och bottenkonturerna räknade ett eget tillverkat Matlab-skript, bilaga 11.1, ut djupet för kabeln. Då antalet hydrofoner/elektroder i vattnet var känt kunde sedan ett medelavstånd mellan dessa räknas ut. I verkligheten är detta avstånd fem meter för både resistivitetsmätningarna och seismikmätningarna, medan det i programmet blev någon centimeter kortare (största differensen var tre cm). Detta beror dels på att terrängmodellen blev något avvikande från verkligheten då ekolodet inte gav exakta djup och dels på att kabelns position inte helt stämmer överens med den antagna.

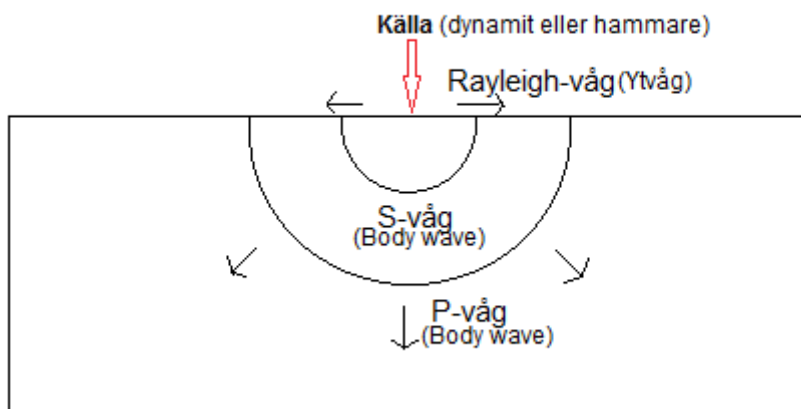
3.2 Refraktionsseismik

3.2.1 Bakomliggande teori

Vid seismikmätningar används en källa som sänder ut elastiska vågor som färdas genom marken till olika mottagare. Mottagare som registrerar rörelse i vertikal- och/eller horisontal led kallas geofoner och används oftast på land. Mottagare som registrerar förändringar i tryck kallas hydrofoner och används för undervattensmätningar. Källan till den elastiska vågen kan vara exempelvis ett slag från en hammare eller detonation från en dynamitladdning. Den elastiska vågen är en ljudvåg som rör sig i marken genom partikelvibrationer (Milsom & Eriksen, 2011). Med hjälp av tidsdifferensen och avståndet från källa till mottagare kan hastigheten av vågen i materialet beräknas.

I luft har ljudvågen en fram- och tillbakarörelse i färdriktningen, en så kallad kompressionsvåg. Jämfört med andra vågrörelser så är det denna våg som är snabbast i fasta material och kallas därför primärvåg (P-våg). Primärvågen kan transporteras både genom fasta material och gas- eller vattenfyllda håligheter. Sekundärvågens (S-våg) partikelrörelse är rätvinklig mot färdriktningen och rör sig

endast genom solida material då vatten inte kan överföra skjuvspänningar. Primär- och sekundärvågen är så kallade "body waves" och transporteras ut i bergmassan i alla riktningar. Det finns även ytvågor, som rör sig längs med ytan, och inte tränger ner i marken på samma sätt som P- och S-vågorna gör. Rayleigh-vågen är en ytvåg och rör sig i en elliptisk rörelse (Milsom & Eriksen, 2011). I Figur 8 visas hur vågorna breder ut sig i ett fast och elastiskt material, P- och S-vågen rör sig ner i massan medan R-vågen rör sig längs med ytan med kraftfullare energi.



Figur 8 - Fördelning av vågor i fasta och elastiska material.

Hastigheterna på P- och S-vågorna beror på materialens egenskaper. Våghastigheten för dessa elastiska vågor kan uttryckas med hjälp av elasticitetsmodulen och densiteten, se Formel 1.

Formel 1- Hastigheter för de elastiska vågorna, p- och s-våg.

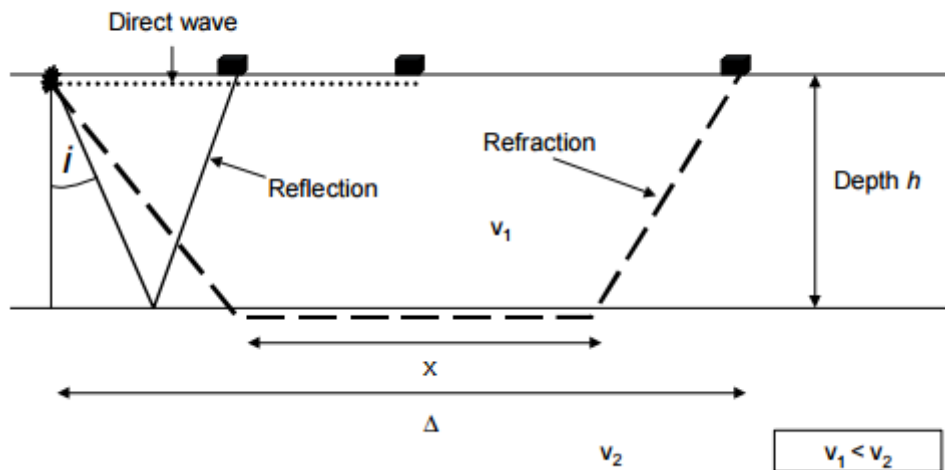
$$V_p = \sqrt{\frac{j}{\rho}} \qquad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Primärvågens hastighet beräknas från elasticitetsmodulen i vågens färdriktning, j , och densiteten ρ . För hastigheten på sekundärvågen används skjuvmodulen, μ . En hög densitet medför normalt en kraftig ökning av elasticitetsmodulerna. Formlerna indikerar då att hastigheten är högre i material med hög densitet och stor elasticitetsmodul. (Milsom & Eriksen, 2011)

När ljudvågen träffar en gräns i marken som har olika akustiska egenskaper kommer en del av energin i vågen brytas och reflekteras tillbaka mot ytan medan resterande energi refrakteras och fortsätter i de material där vågen snabbt kan ta sig fram. (Milsom & Eriksen, 2011)

Seismikvågorna (både P- och S-vågen) som skapas kan delas in i undergrupperna: direktvåg, reflektionsvåg och en refraktionsvåg. Dessa uppträder på olika sätt i marken, se Figur 9. Direktvågen transporteras längs med markytan, reflektionsvågen reflekteras i lagergränser mellan materialen i marken och refraktionsvågen transporteras längs med materialgränserna. (Igél, 2015)

Refraction profile:



Figur 9 - Direktvåg, reflektionsvåg och refraktionsvåg (Igel, 2015).

Vid refraktionsseismik används direktvågen och den refrakterade vågen för att få information om hastigheten i materialen som finns under markytan. Sträckan och den tid det tar för den våg som anländer först (P-vågen) till en hydrofon mäts för att sedan användas för att ta fram hastigheten som vågen har färdats i. Materialen i marken har olika egenskaper så att elastiska vågor rör sig i olika hastigheter. Utifrån en refraktionsseismik-undersökning kan då hastigheterna knytas till olika material med olika egenskaper.

I Figur 10 finns exempel på hastigheter i olika material. Då P-vågen transporteras både i fasta material, vatten och gas kommer hastigheten i mättade material upp i fortplantningshastigheten i vatten, 1450 m/s, förutsatt att materialet är löst lagrat (Lidén, 2012). Hårt kristallint berg kan ha hastigheter omkring 6000 m/s medan ett kraftigt uppsprucket berg kan ha hastigheter ner mot 2500 m/s. Detta jämförs med löst lagrade sediment som har hastigheter på 1500-1800 m/s och morän med ungefär 2000 m/s. Hastigheterna i ett specifikt material kan variera något beroende på var mätningarna görs.

Material		P-wave velocity V_p [m/s]
Clay, silt	dry	100-600
	saturated	1450
Sand, gravel	dry	150-1000
	saturated	1450
Moraine	dry	600-1500
	saturated	1400-2000
Sandstone, shale		2500-3500
Granite, gneiss		3500-7000
Steel		6000

Figur 10 - Exempel på P-vågshastigheter i olika material ((Lidén, 2012).

För att förstå hur ankomsttiden för direkt-, reflektions- och refraktionsvågen beror på transportsträcka och hastigheterna i de olika materiallagerna beskrivs teorin för vardera våg nedan. (Milsom & Eriksen, 2011)

Direktvågen rör sig längs med markytan med hastigheten v_1 , efter att den färdats avståndet Δ (se Figur 9) blir ankomsttiden t_{dir} .

Formel 2 - Ankomsttid för direktvågen

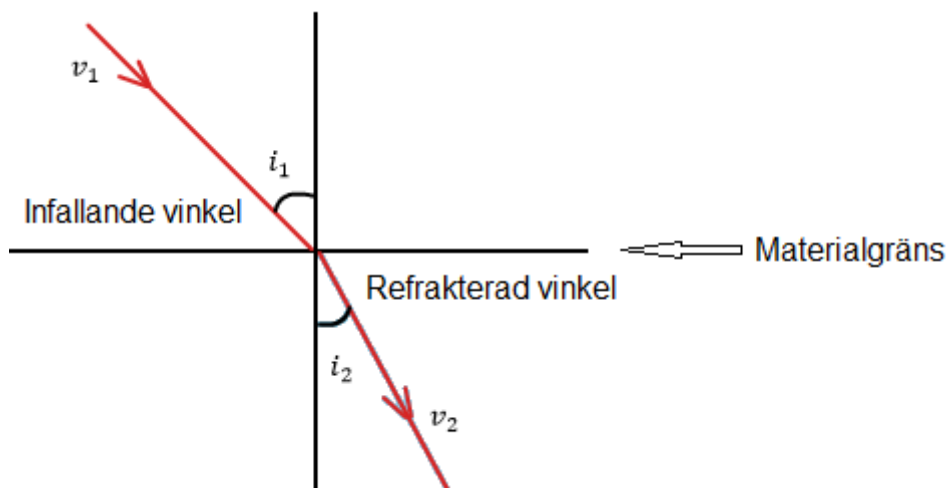
$$t_{dir} = \frac{\Delta}{v_1}$$

Ankomsttiden för den reflekterade vågen kan fås genom Pythagoras sats, enligt Formel 3 (Milsom & Eriksen, 2011). Vågen rör sig ner i materialet, stöter emot ett lager med andra egenskaper och rör sig vidare till markytan igen enligt Figur 9. Den reflekterade vågen används inte inom refraktionsseismik på grund av att avståndet, och därmed gångtiden från källa till mottagare, Δ , blir mycket stort innan reflektionsvågen påverkar direktvågen, se Figur 12.

Formel 3 - Ankomsttid för reflektionsvågen för en tvålagermodell

$$t_{refl} = \frac{2}{v_1} \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + h^2}$$

Den refrakterade vågens beteende beror på hur mycket energi som reflekteras bort vid materialövergången. På så vis är restiden för denna våg mer komplicerad än för direkt- och reflektionsvågen. Refraktionsvågen bryts enligt Snell's lag för en markmodell med två materiallager, se Figur 11. Beroende på vilken vinkel och hastighet vågen har när nästa material i marken träffas får vågen en ny hastighet och en ny transportriktning.



Figur 11 - Brytning av refraktionsvåg i en tvålagermodell

Snell's lag redovisas i formeln nedan. i_x är vinkeln för riktningen på vågen i de två olika materiallagerna och v_x är hastigheterna.

Formel 4 - Snell's lag

$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(i_2)}{v_2}$$

Den refrakterade vågen som rör sig horisontellt i material två är den med kortast gångtid, se Figur 9 ovan. För att den ska kunna röra sig horisontellt krävs det att vinkeln $i_2 = 90^\circ$ (Milsom & Eriksen, 2011). Med kravet för den refrakterade vinkeln, $i_2 = 90^\circ$, insatt i Snell's lag fås ett uttryck för den kritiska infallsvinkeln i_c .

Formel 5 - Framtagning av den kritiska vinkeln, i_c .

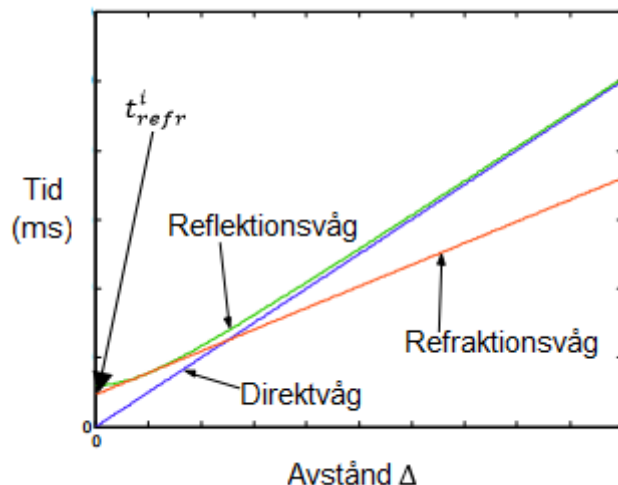
$$\frac{\sin(i_c)}{v_1} = \frac{\sin(90^\circ)}{v_2} = \frac{1}{v_2} \rightarrow \sin(i_c) = \frac{v_1}{v_2}$$

Vågen som refrakteras med den kritiska vinkeln är den kritiskt refrakterade vågen som används vid refraktions-seismiska undersökningar. Infallsvinkeln är direkt kopplat till hur långt vågen transporteras i material ett, olika infallsvinklar ger olika transportsträckor. Ankomsttiden för den refrakterade vågen, t_{refr} , fås enligt Formel 6 (Milsom & Eriksen, 2011).

Formel 6 - Ankomsttid för refraktionsvågen

$$t_{refr} = \frac{2h\cos(i_c)}{v_1} + \frac{x}{v_2} = t_{refr}^i + \frac{x}{v_2}$$

Tiden t_{refr}^i är ankomsttiden då $x = 0$. Ankomsttiderna för respektive våg kan ritas upp i ett diagram utifrån formlerna för respektive ankomsttid. Diagrammet över ankomsttiderna i Figur 12 visar att det är direktvågen och sedan refraktionsvågen som är de första ankomsterna på avståndet Δ (Igel, 2015).



Figur 12 - Diagram över ankomsttider i en tvålagermodell (Igel, 2015)

3.2.2 Praktiskt genomförande

Vid utförande av fältarbete inom refraktionsseismik användes en kabel med 48 hydrofoner med avståndet fem meter. Källan som användes för att alstra den elastiska vågen är sprängmedel placerade med 20 meters intervall längs med kabeln. För att inte kabeln ska skadas av sprängladdningen är denna placerad längst ut på en stålbygel som i sin tur är fäst på kabeln. Avståndet mellan kabel och stålbygel är ungefär 0,5 m.

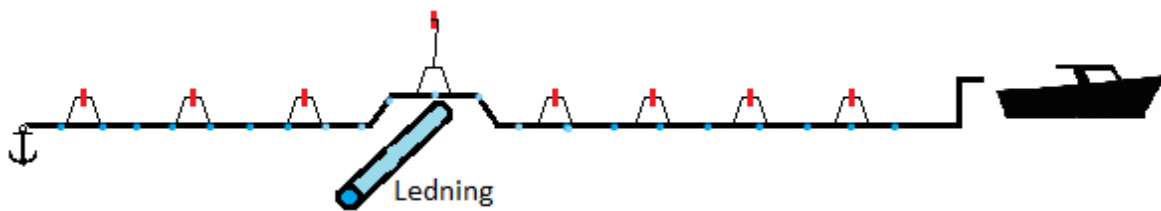
För att kunna lägga ut kabeln så rak som möjligt längs med den tänkta undersökningslinjen förankras först den ena änden med en tyngd. När tyngden är på botten hålls kabeln spänd under hela utläggningen och förankras till sist nära kabelns andra ändpunkt för att förhindra att kabeln flyttar sig under mätningen. Båten är utrustad med GNSS och Navipak som används för positionering för utläggningen, se kapitel 3.1 om positionering. Kontaktdonet i ändan av kabeln är kvar i båten och kopplas ihop med registreringsutrustningen för insamling av data. Alla inställningar och använd utrustning redovisas i bilaga 11.2. Mätningarna utfördes i största mån nattetid för att minimera mängden störningar i form av vibrationer som kommer från Stockholms urbana område.

Kabeln är totalt 235 meter. De tänkta undersökningslinjerna är längre och kräver två utlägg. Vid flera utlägg på en undersökningslinje krävs det att dessa överlappar varandra för att kontinuerlig tolkning skall kunna genomföras.

Seismikkabeln som används har en kapacitet på 17 spränguttag vilket i sin tur ger en möjlighet till 17 datafiler med information. Vid undersökningslinjerna i Saltsjön fanns en begränsning i sprängtillståndet; sprängningen fick inte utföras på ett avstånd på mindre än ca 50 meter från strandkanten. Detta medför en begränsning i mängden insamlad data.

I de undersökta områdena finns det olika typer av ledningar och för att inte skada dessa med sprängutrustningen används i dessa fall frigolit för att skapa ett flöte att fästa sprängladdningen i. Flötet är på ett säkerhetsavstånd på 5 meter från botten

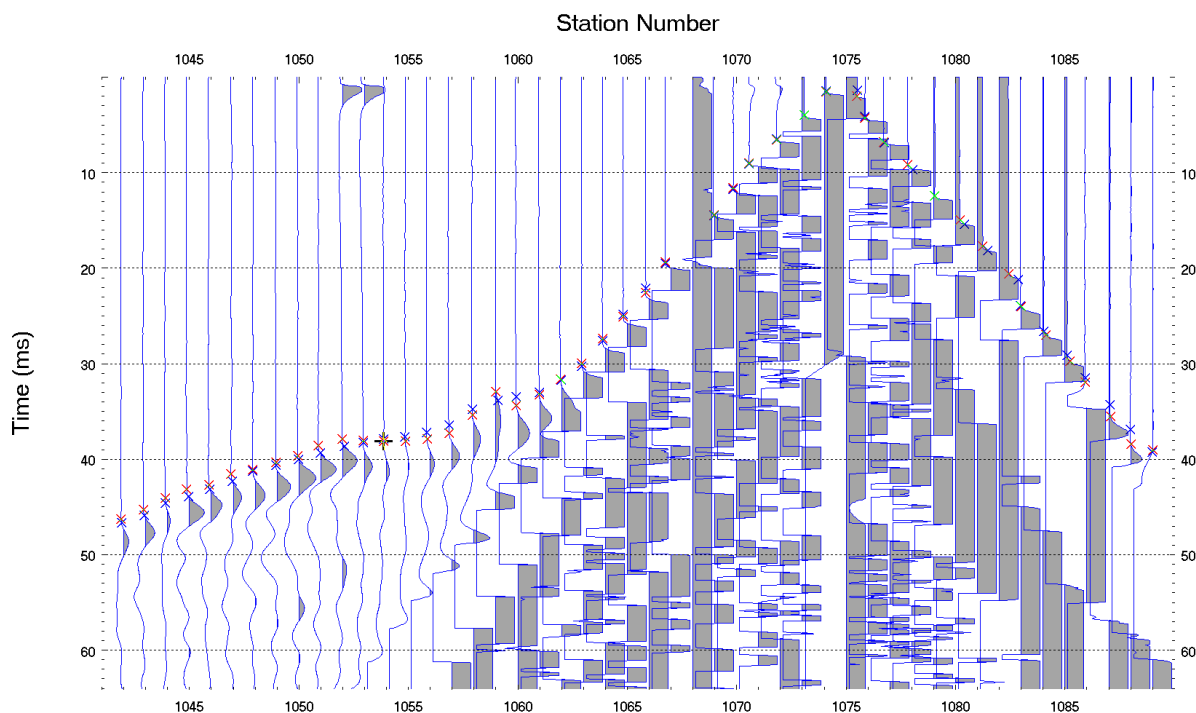
men fortfarande långt under vattenytan. Den extra tid det tar för signalen att färdas dessa fem meter justeras senare i analyskedet.



Figur 13 - Principskiss över seismikutläggen, med en sprängladdning upphöjd 5 m för att undvika skada på ledningen.

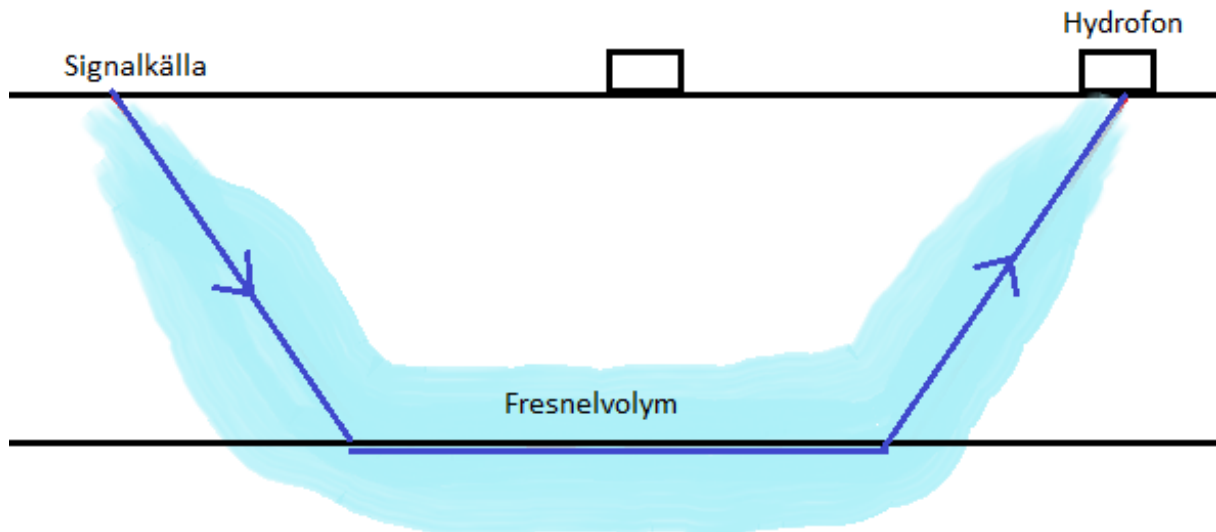
3.2.3 Analysering- och processeringsskede

När data är insamlad användes *Rayfract*, version 3.23, som är ett mjukvaruprogram utvecklat av *Intelligent Resources Inc* för att processera seismikprofiler. Först importerades insamlad data som SEG2-fil och varje hydrofon och skottpunkt påfördes en geometri som beräknats i förväg baserat på positioneringsdata. För att få en markprofil av botten längs med undersökningslinjen användes insamlad ekolodsdatabas för att ta fram djup för respektive hydrofon. När geometrin i programmet blivit inlagt plockades de först anlända vågorna (P-vågorna) från insamlad rådata för respektive hydrofon och skott. Figur 14 är ett exempel på en datafil insamlad från en sprängning där de första ankomsttiderna för vågen är plockade och markerade med röda kryss vid varje hydrofon. Nedan beskrivs hur programmet processar data.



Figur 14 - Exempel på en datafil från Rayfract med manuellt plockade p-vågor (röda kryss)

Interaktiv WET-inversion (Wavepath Eikonal Traveltime inversion), som används i mjukvaruprogrammet *Rayfract*, skapar en 2D seismik-tomografi⁴ för undersökningslinjen. Inversionen modellerar fortplantningen av energin från de första ankomstsvågorna och använder strålsparning (raytracing) i så kallade fresnelvolymmer. Strålen representerar en bred stråle som transporteras i en volym mellan källa och mottagare, se Figur 15.



Figur 15 - Fresnelvolym kring en refrakterad våg

För varje källa och mottagare modellerar inversionen hastigheter, utifrån ankomsttiderna för vågorna som placeras vid noder i ett skapat rutnät med hjälp av en icke-linjär partial differentialekvation⁵ (Rohdewald, 2011). Den färdiginverterade tomografin redovisas i programmet *Surfer*, en mjukvara som *Rayfract* använder för att automatiskt rita upp resultatet från inversionen (Intelligent Resources, 2015).

Inversionen är en skapad modell av en uppskattning av fördelningen av markens egenskaper som baseras på insamlad data från refraktionsseismik-mätningarna. Detta vill säga att informationen om hastigheterna finns men programmet ska ta fram en sektion om hur strukturen i marken ser ut utifrån den informationen. RMS⁶-felet förklarar hur väl uppskattningen i datamodellen passade de manuellt plockade P-vågorna i programmet från insamlad data. Felet blir mindre då programmet hittar en bra uppskattning på markens egenskaper. Programmet förbättrar modellen i ett antal cykler med hjälp av finita element beräkningar för att för att få en bättre passning med insamlad data, en sådan cykel kallas för en iteration.

När en seismik-tomografi skapas visas sällan skarpa lagergränser trots att strukturen i marken har distinkta övergångar i hastighet mellan lagren. Vid inversmodelleringen används ett mjukhetsband, en så kallad "*Smooth inversion*", för att modelleringen ska kunna fungera och detta medför i sin tur otydliga lagergränser i tomografin.

⁴ Sektionsmodell med hastigheter i markmaterialen

⁵ Eikonal solver

⁶ Root-Mean-Squared, ett mått på spridningen av avvikelserna

I jämförelse med traditionell utvärdering av refraktionsseismik så bortser tomografin från antaganden att lagren är homogena, har en tydlig horisontell lagergräns och att hastigheten ökar med djupet. Tomografin skapar en modell med hastighetshorisonter som varierar längs med undersökningsprofilen istället för att göra beräkningar baserat på lager med olika hastighet (Sheehan, 2005). En nackdel med tomografin är dock att bergnivån blir svårtolkad utan referensinformation. Även om berget i praktiken har en högre hastighet så tolkas bergytan i tomografin vid en hastighet omkring 2500 m/s. Detta kan ses som en kalibrering av resultatet och antagandet om vilken hastighet skall göras kommer från tidigare erfarenheter i projekt i liknande geologisk miljö⁷.

3.3 Resistivitet

3.3.1 Bakomliggande teori

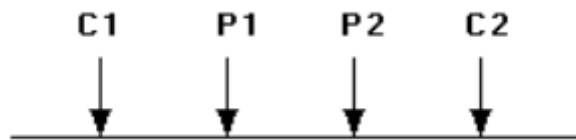
Resistivitmätning är en elektrisk metod som mäter markens förmåga att leda ström. Materialen som finns i marken har olika resistiviteter och ett materials egenskaper kan variera stort, ett lågresistivt material kan exempelvis vara vittrat berg eller lösa sediment medan högresistivt kan vara kristallint berg. I jord kan resistiviteten variera beroende på kornstorlek, porositet hos materialet och vattenhalt medan den kan variera i berg beroende på vatten i bergets sprickor och porer. I jordar med kornstorlekar under 0,06 mm verkar inte bara friktionskrafter mellan kornen utan även den fysikaliska kohesionskraften. Kohesionen kan bidra till ökad ledningsförmåga och ge jordmassan ett lägre resistivetsvärde. Olika typer av mineral ger även olika resistivetsvärden vilket bidrar till variationer i ledningsförmåga inom materialgrupperna. En annan viktig parameter som påverkar resistiviteten för både jord och berg är jonhalten i vattnet i anslutning till massorna. En förhöjd jonhalt sänker resistiviteten (Parasnis, 1997).

Material i marken har olika egenskaper, i Tabell 3 redovisas exempel på några olika materials resistivitet och konduktivitet. Som jämförelse kan tilläggas att koppar har resistiviteten $1.68 \cdot 10^{-8}$ Ohm-m (Matula, 1979).

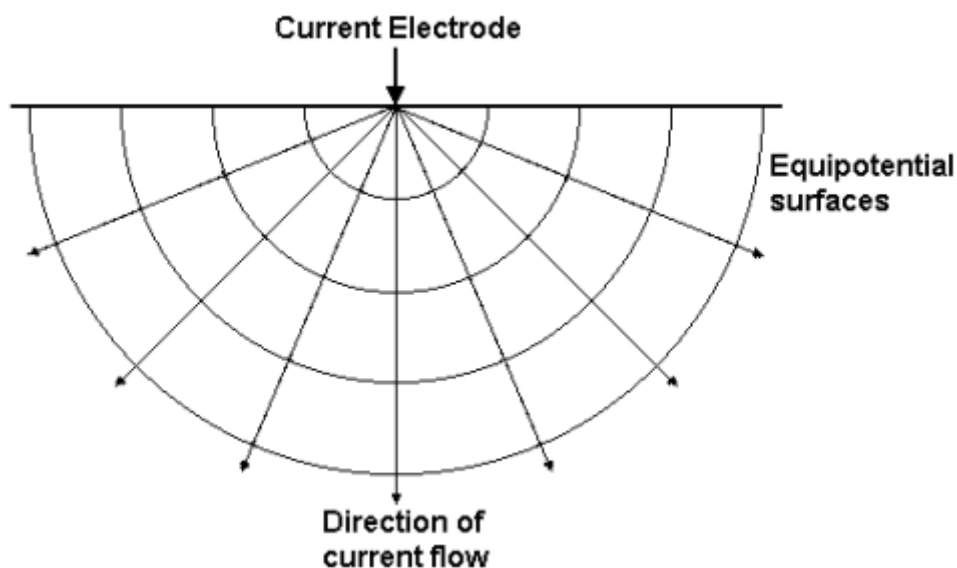
Material	Resistivitet (Ohm-m)	Konduktivitet (mS/m)
Luft	8	0
Ytvatten	10-500	100-2
Saltvatten	≈0.2	≈5 000
Sand (Torr)	1 000-5 000	1-0.02
Sand (Mättad)	500-5 000	2-0.2
Grus	100-1 000	10-1
Lera	1-100	1 000-10
Vittrat berg	100-1 000	10-1
Sandsten	200-8 000	5-0.125
Kalksten	500-10 000	0.1-2
Gnejs	100-1 000 000	0.001-10
Granit	200-1 000 000	0.001-5

⁷ Personlig kommunikation med Roger Wisén, LTH. Stockholm, 3 November 2015

Vid mätning av markens resistivitet sänds en elektrisk ström med känd styrka mellan två elektroder medan potentialen som skapas i marken uppmäts av två andra elektroder. Figur 16 och Figur 17 visar en principskiss över hur den elektriska strömmen går mellan C-elektroderna (strömelektroderna) och formen av det alstrade potentialfältet. P-elektroderna (Potentialelektroderna) registrerar potentialskillnaden och en bild över marken kan skapas (Loke, 2004).



Figur 16 – Ström- och potentialelektroder i en Wennerkonfiguration (Loke, 2004).



Figur 17 - Strömfältet och potentialfältet (Loke, 2004).

Ohms lag förklarar förhållandet mellan strömmen som skickas ut, resistansen i marken och spänningen som skapas.

Formel 7 - Ohms lag

$$U = R \cdot I$$

R – Resistans (Ω)

I – Strömmen som skickas ut (Ampere)

U – Spänningen som mäts (Volt)

R är resistansen i en cylindrisk och homogen ledare av längden L (m) och tvärsnittsarea A (m^2). Resistansen beräknas genom Formel 8 där materialets resistivitet är ρ (Ωm) (Milsom & Eriksen, 2011).

Formel 8 - Resistans för homogen och cylindrisk ledare (Ohm)

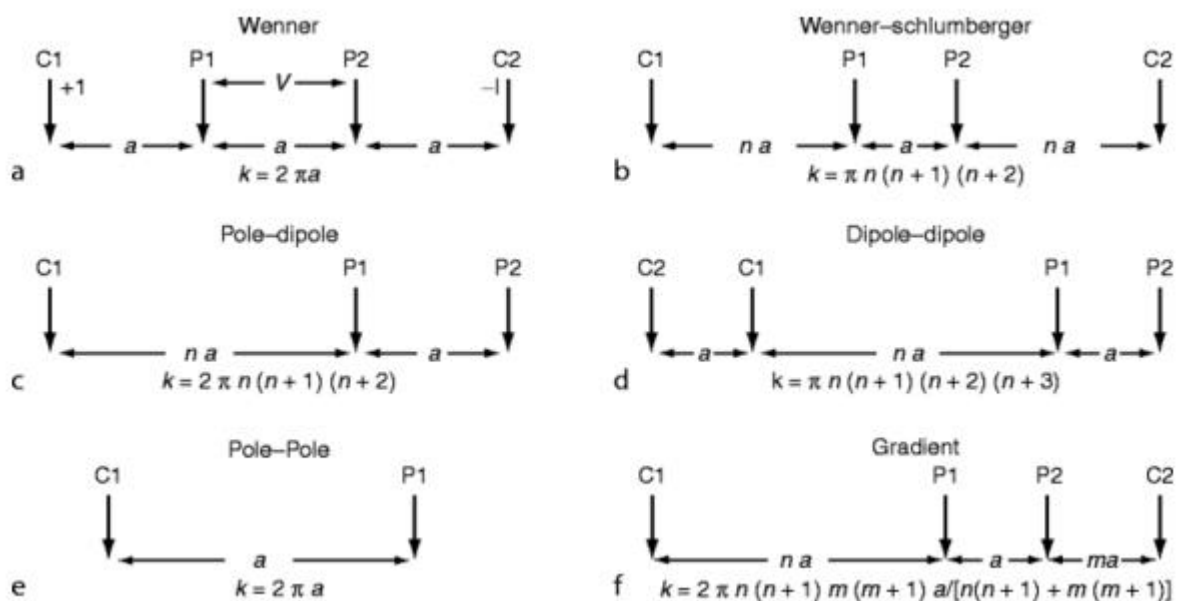
$$R = \frac{L \cdot \rho}{A}$$

Med hjälp av Formel 7 och Formel 8 kan resistiviteten få ett uttryck enligt Formel 9 där k är en geometrisk faktor som beror på elektrodkonfigurationen (Loke, 2011). Den resistivitet som fås genom mätning är den skenbara resistiviteten, den resistivitet som kommer från den homogena halvsfär som strömmen har sänts genom. Då marken inte är homogen krävs en tolkning i form av till exempel datamodellering för att få en mer sann resistivitet (Milsom & Eriksen, 2011).

Formel 9 - Resistivitet (Ohm-m)

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} = \frac{U}{I} \cdot \frac{A}{L} = \frac{U}{I} k$$

Det finns olika uppsättningar av elektroderna, så kallade elektrodkonfigurationer. Beroende på förutsättningar i omgivningarna samt undersökningens syfte väljs en passande konfiguration. I Figur 18 visas några vanliga elektrodkonfigurationer.



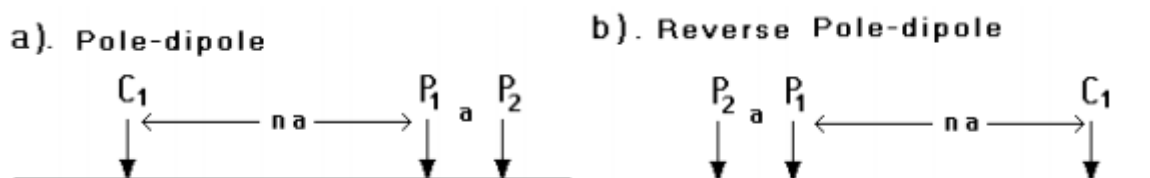
Figur 18 - Vanliga elektrodkonfigurationer med geometriska faktorer som används i resistivetsmätningar (Loke, 2011).

De olika elektrodkonfigurationerna har både för- och nackdelar. Vissa är känsliga för störningar i omgivningen och andra är känsliga för strukturer i marken, både horisontella och vertikala (Milsom & Eriksen, 2011).

I examensarbetet har multipel gradient- och pol-dipol-konfigurationerna använts. Vid multipel gradient förflyttar sig både potential- och strömelektroden längs med undersökningslinjen. Den multipla gradientkonfigurationen liknar Wenners men ger en bättre upplösning. Detta på grund av att elektrodkonfigurationen hos den multipla gradienten är icke-symmetrisk (Dahlin & Zhou, 2005). Den multipla gradientkonfigurationen anses idag vara standard inom branschen. Med de moderna

flerkanaliga mätsystemen finns möjligheten att påskynda tiden i fält genom att använda sig av flera potentialelektroder, vilket de traditionella konfigurationerna, Wenner och Schlumberger, inte stöder. Även pol-dipol-konfigurationen kan utnyttja det flerkanaliga mätsystemen och även bidra till en djupare nedträngning än gradientkonfigurationen. Detta med hjälp av en fjärrelektrod som teoretiskt skall vara placerad på "oändligt avstånd" från mätlinjen. Det "oändliga avståndet" bör i praktiken vara minst 5 gånger längden av undersökningslinjen för att undvika effekter på mätningen (Loke, 2004). Om fjärrelektroden ligger för nära mätlinjen påverkas potentialen i marken och mätdata kan bli felaktig. Då vattnet är mycket ledande ställs extra stora krav på att fjärrelektroden befinner sig på ett stort avstånd från undersökningslinjen. Pol-dipol-konfigurationen är dock mer känslig för störningar än den multipla gradientkonfigurationen.

Pol-dipol-konfigurationen är asymmetrisk vilket medför att den kan påverka skapandet av modellen vid inversion. För att undvika att mätningen påverkas på grund av asymmetrin görs två mätningar, en "Forward" och en "Reverse", se Figur 19. Vid en kombination av de två olika mätningarna påverkas inte slutresultatet av elektrodkonfigurationens asymmetri (Loke, 2004).



Figur 19 - "Forward" och "Reverse" Pol-dipol (Loke, 2004)

Saltvatten har en mycket lägre resistivitet än sötvatten. Resistiviteten för saltvatten brukar ligga under $10 \Omega m$ och sötvattnet omkring $30-50 \Omega m$ eller högre (Jansen, 2011). Då strömmen alltid tar den väg med minst motstånd kommer mycket av denna gå igenom det lågresistiva saltvattnet. Detta gör att mindre ström kommer gå igenom de högresistiva områdena på djupet vilket leder till att djuppenetrationen blir mindre och information på djupet går förlorad. För att komma ner till önskat djup i undersökningen krävs en anpassad elektrodkonfiguration. Vid en jämförelse av multipel gradient och pol-dipol så är pol-dipol mer lämpad för en större penetration.

Rådata från fält kan ses i en pseudosektion. Denna sektion visar en bild över markens skenbara resistivitet och det teoretiska djupet för undersökningen. Efter mätning i fält ska resultatet modelleras och analyseras. Detta görs i ett processeringsprogram, till exempel Res2Dinv64. Givet från uppmätt data är den skenbara resistiviteten och positionerna för ström- och potentialelektroder vid mättillfället. Då en modell över marken efterfrågas krävs en invers modellering av data. Ordet invers betyder att mätresultatet är givet och att det är modellen som gav upphov till resultatet som efterfrågas. Modellen jämförs med det uppmätta resultatet där felet mellan dessa kallas RMS-felet (root-mean-squared-error). För att optimera modellen ytterligare används finita elementmetoden (Loke, 2010). Varje utjämningscykel kallas iteration och bör redovisas tillsammans med RMS-felet och den slutgiltiga sektionen. Ett lågt värde på RMS-felet samt ett lågt antal iterationer indikerar att en bra modell har skapats, ty alltför mycket utjämning kan skapa

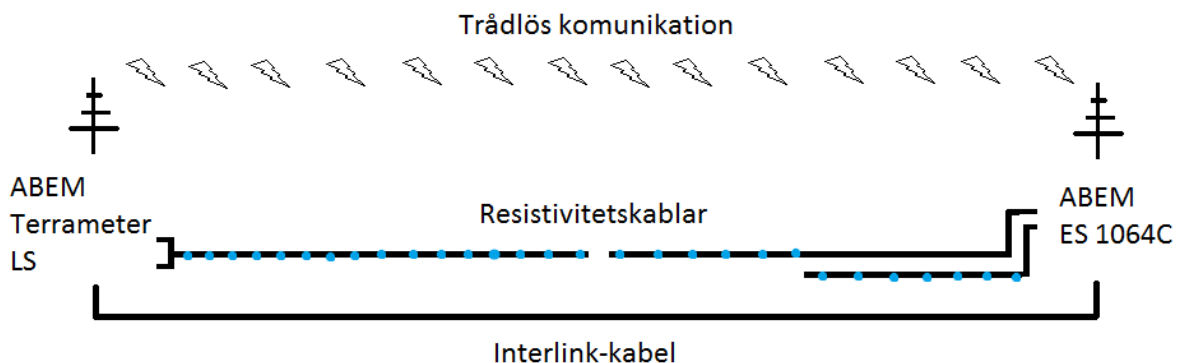
artefakter. Då olika modeller kan ge låga RMS-fel för samma data är det viktigt att verklighetsförankra resultatet genom att kontrollera så att denna är geologiskt trolig för området.

3.3.2 Praktiskt genomförande

Till skillnad från refraktionsseismik-mätningarna så utfördes resistivetsmätningarna, ERT (Earth Resistivity Tomography), från land. Detta krävde en tillräckligt lång mätkabel så att de båda ändarna var på land, på vardera sida om vattenpassagen. Då samtliga vattenpassager var mellan 400-500 meter användes tre undervattenskablar med totalt 128 elektroder och elektrodavståndet fem meter. Kablarna kopplades ihop så att 64 elektroder anslöts till instrument på vardera sida om vattenpassagen.

Vid utläggning av kablarna fästes ena änden vid strandkanten för att sedan sträckas ut från båten och läggas ner i vattnet längs undersökningslinjen. Med hjälp av utrustningen för positionering fick kabeln en god placering på botten längs med linjen.

På ena sidan vattenpassagen kopplades en kabel ihop med ABEM Terrameter LS och på andra sidan kopplades de andra två kablarna in i en reläväxel av typen ABEM ES10-64C. ABEM Terrameter LS och ABEM ES10-64C var sammanlänkade med hjälp av en interlink-kabel som även den var dragen över sundet. Interlink-kabelns uppgift var att skicka ström och potentialvärden från de två kablarna som inte var anslutna till terrameteren. Då kabeln var för lång, 1000 meter, för styrning av reläer i ES 10-64 användes ett trådlöst system för att skicka informationen till andra sidan vattenpassagen. Det trådlösa systemet var inkopplat i Terrameteren och reläväxeln på vardera sida om vattenpassagen.



Figur 20 - Principskiss över resistivetsupplägg

Elektroderna kräver god kontakt med marken för att kunna ta upp och sända ut signaler. De elektroder som låg på havsbotten hade automatiskt en god kontakt med omgivningen tack vare omgivningen av vattnet. Hos de elektroder som fortsatte upp på land behövde kontakten förbättras genom användning av stål- eller plattelektroder.

Utläggning av kablarna och andra förberedelser gjordes dagtid medan mätningarna utfördes nattetid för att minimera störningar från den urbana Stockholmsmiljön.

Mätningarna i Mälaren, sötvattnet, gjordes med multipel gradient medan mätningarna i Saltsjön, bräckt vatten, gjordes både med multipel gradient och pol-dipol. Datamängden som samlas in vid pol-dipol var mycket stor och delades därför in i två separata mätningar, en "reverse" och en "forward", vilka sedan kombinerades i processeringsskedet. Inställningarna som användes för ABEM Terrameter LS redovisas i bilaga 11.3 och 11.4.

Längs med den sammanlänkade resistivitetskabeln satt tryck-sensorer, *Schlumberger Divers*. De var placerade på utvalda punkter längs kabeln för att kunna användas som referens till ekolodsmätningarna och verifiera vattendjupet och placeringen på resistivitetskabeln.

Resistiviteten för omgivande vatten mättes på 3-4 punkter längs med vardera undersökningslinje. Informationen användes sedan för att modellera vattenlagret i mjukvaruprogrammet Res2dinvx64. För att mäta vattenresistiviteten användes en resistivitetskabel med 32 elektroder med 1 meters elektrod mellanrum. Ena änden släpptes ner i vattnet tills denna nådde botten. Kabeln sträcktes sedan så att denna blev vertikal innan mätningen påbörjades. ABEM Terrameter LS användes för att utföra mätningarna.

3.3.3 Analysering- och processeringsskede

För överföring av data från Terrameter LS användes Terrameter LS Toolbox. Förprocessering av data utfördes och innebar att vissa dåliga datapunkter togs bort såsom negativ data, data med hög varians och data med orimligt höga eller låga resistivetsvärden. Totalt togs ca 30 datapunkter bort för varje mätning vilket kan anses vara lågt. Elektrodernas position längs kabeln definierades även i Terrameter LS Toolbox. Djupdata mättes in med hjälp av ett enkelstråligt ekolod och med det egengjorda Matlab-programmet, som beskrivs i kapitel 3.1, kunde elektrodernas position beräknas där positionerna på landelektroderna samt antalet elektroder i vattenpassagen användes som randvillkor. För att utföra en processering med programmet Res2Dinvx64 krävs att all information är samlad i en .dat-fil vilken skapas med Terrameter LS Toolbox. Dat-filen är en textfil som innehåller mätvärden, positioner samt elektrodavstånd, konfiguration och olika områdesbeskrivningar. Det är även i .dat-filen som det överliggande vattenlagret definieras med geometri och resistivitet. Vattenresistiviteten mättes upp på flera ställen, se kapitel 3.3.2, och resultatet skissades upp. I Diagram 1 syns vattenresistivetsresultatet från Saltsjön och de vattenlager som använts för beräkningarna.

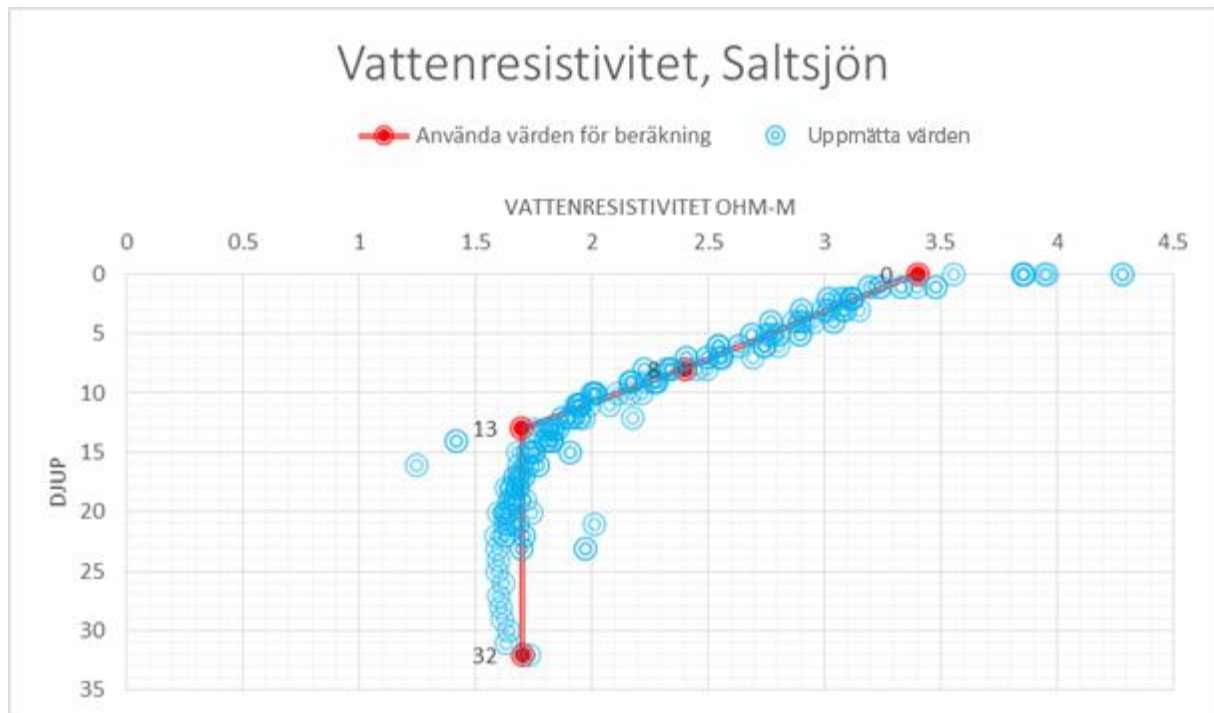


Diagram 1 - Vattenresistivitet, Saltsjön

Nedan följer det sista stycket av .dat-filen som definierar vattenmassans geometri och resistivitet för mätlinjerna i Saltsjön.

Tabell 4 - Definiering av vattenmassa för undersökningslinjerna i Saltsjön.

1	Topografi används
0	Inga låsta regioner
1	Vattenlager används
Number of water layers	
3	Antal vattenlager
layer 1 parameters	Parametrar för vattenlager 1
3.4 -2000 2000 -0.281	Vattenresistivitet, vänster gräns, höger gräns, elevation
layer 2 parameters	Parametrar för vattenlager 1
2.4 -2000 2000 -8	Vattenresistivitet, vänster gräns, höger gräns, elevation
layer 3 parameters	Parametrar för vattenlager 1
1.7 -2000 2000 -13	Vattenresistivitet, vänster gräns, höger gräns, elevation
1	Normal geometrisk faktor använd för att beräkna "apparent resistivity"

Den färdiga .dat-filen användes i processeringsprogrammet Res2Dinvx64. Programmet har flera funktioner som kan användas för att justera och förbättra resultatet. En funktion som användes är en grafisk funktion som visar datapunkterna

som små prickar där avvikande värden lätt kan utskiljas och elimineras⁸. För att få mindre cellstorlekar och därmed bättre upplösning användes en inställning som simulerar hälften så stora elektrodavstånd⁹, det vill säga 2,5 meter (Loke, 2010). Denna inställning var extra viktig för pol-dipol-mätningen då mindre cellstorlek ger en bättre upplösning på mindre djup, vilket är en svaghet hos denna typ av mätning. Traditionellt används en sektion i form av en upp-och-nedvänd kon. Svagheten med denna inställning är att datapunkternas position måste ligga inom konen. Inställningar användes för att ta bort denna restriktion genom att använda en rektangulär sektion¹⁰. Mätningarna ställdes in för att göra max 20 iterationer och fortsätta så länge som förändring av skillnaden mellan den beräknade och den uppmätta skenbara resistiviteten (RMS fel) var större än 1 %. Efter att beräkningarna var klara kontrollerades statistiken över RMS-felen och punkter med högt värde togs bort och inversionen gjordes om. Endast ett fåtal punkter togs bort genom hela processen, att ta bort för många kan resultera i att resultatet påverkas och inte längre reflekterar "sanningen". Enligt en vägledningsrapport skriven av det danska universitetet i Aarhus (Geofysiksamarbejdet, 2015) bör inte antalet borttagna datapunkter överskrida 10 % av den totala mängden punkter.

Tolkningen av bergnivån gjordes okulärt. Viss ledning av typiska resistivitetsvärden användes, se Tabell 3, men bör verifieras av andra metoder då flertalet materialtyper kan stämma in på ett och samma resistivitetsvärde. Generellt var bergets resistivitet mycket låg i de undersökta områdena. Bergnivån har tolkats där den största gradienten i resistivitet finns.

⁸ Funktionen "*Exterminate bad data points*"

⁹ Funktionen "*Use model refinement*"

¹⁰ Funktionen "*Use extended model*"

4 Undersökningsområden

Fältarbetet har utförts i Stockholmsområdet under september och oktober. Fyra olika undersökningslinjer har undersökts i Mälaren och i Saltsjön och placeringen av dessa visas i Figur 21. Mitt i Stockholm avskiljs sötvattnet i Mälaren från det bräckta vattnet i Saltsjön vid Slussen. Undersökningslinjerna ligger både väster och öster om Slussen vilket gör att mätningar kunnat utvärderas utifrån båda vattentyper.

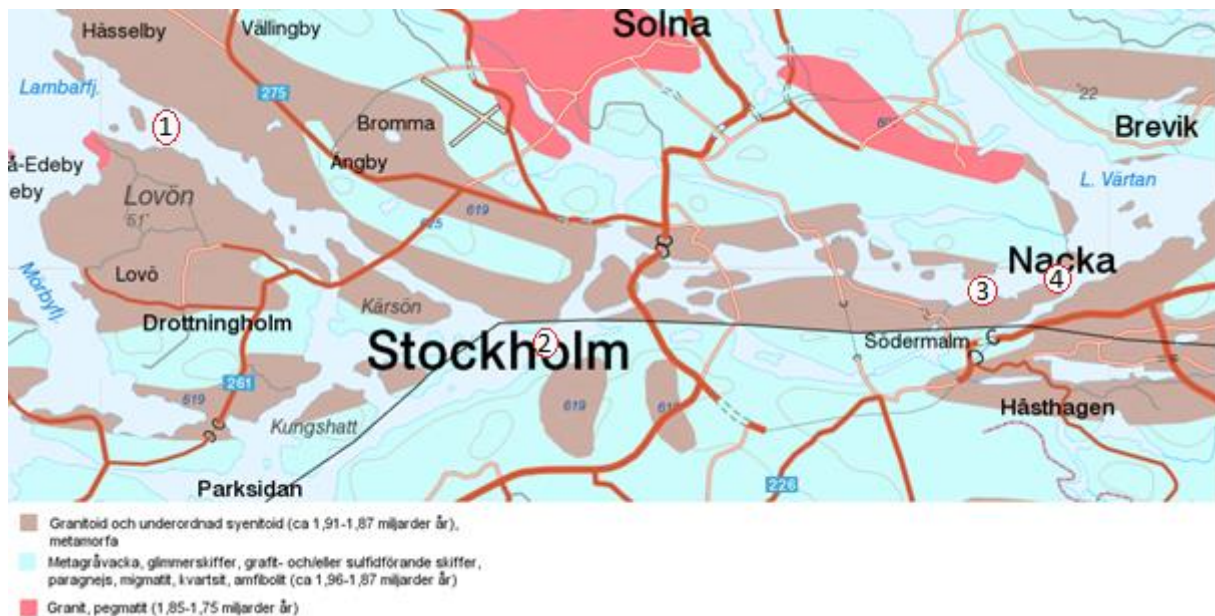


Figur 21 - Placering av undersökningslinjer: 1. Långbarfjärden och 2. Hägersten i Mälaren samt 3. Finnbo-Biskopsudd och 4. Kvarnholmen-Blockhusudd i Saltsjön (Europa Technologies, 2010).

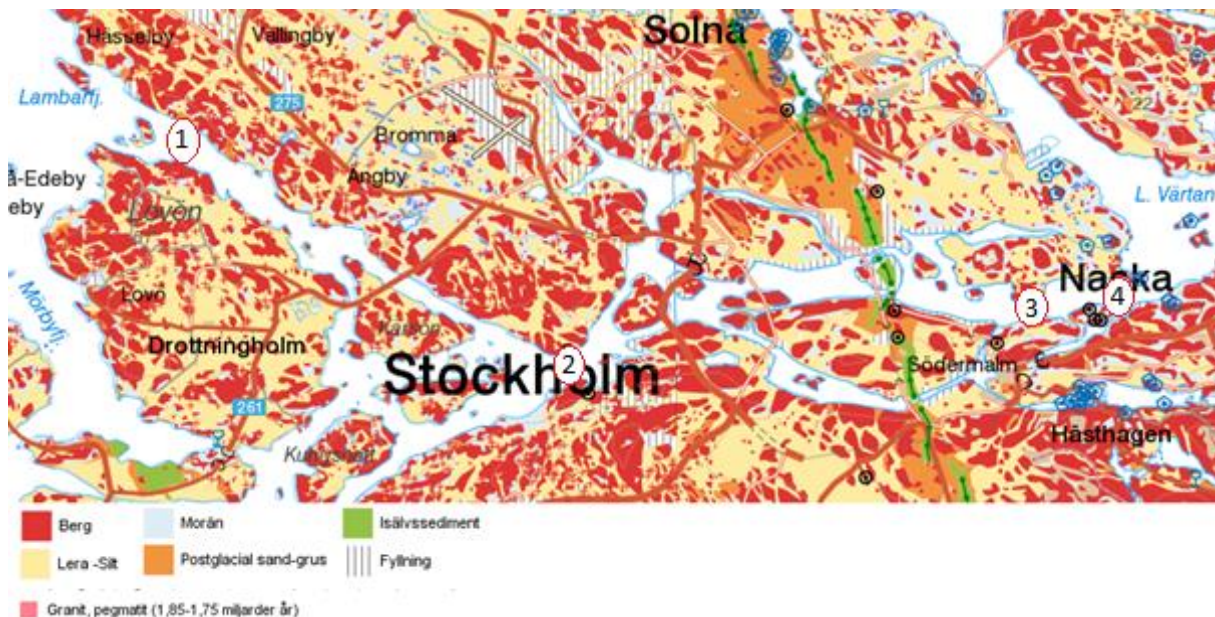
Undersökningsområdet i Saltsjön, Finnbo-Biskopsudd och Kvarnholmen-Blockhusudd, är logistiskt svårare områden än undersökningsområdena i Mälaren. Detta då Saltsjön är högtrafikerat med olika passagerar- och fraktfartyg samt större färjor vilket kräver en viss logistisk förberedelse och god kommunikation med Sjöfartsverket. Området är även mer centralt och fler och större störningar är förväntat.

4.1 Geologi

I Figur 22 och Figur 23 visas en beskrivning av berggrunderna och jordarterna som finns i Stockholmsområdet samt position av de olika undersökningsområdena. Det finns mycket ytligt berg enligt jordartskartan och berggrunden består till största del av granitoid (även kallad gnejsgranit), granit och glimmerskiffer. Glimmerskiffer är en metamorf bergart som bildats genom att sedimentära bergarter utsatts för höga tryck och temperaturer i jordskorpan. Mineralerna kristalliserar under metamorfosen och ett nytt mineral bildas. Granitoiden är en metamorf bergart som både påminner om granit i utseendet och har liknande egenskaper medan granit är en magmatisk djupbergart som har svalnat långsamt och stelnat på stort djup under jordskorpan (Svensson, 1996) (SGU, 2015a).



Figur 22 - Översikt på berggrunden i Stockholms län (SGU, 2015b)



Figur 23 - Översikt på jordarter i Stockholms län (SGU, 2015b)

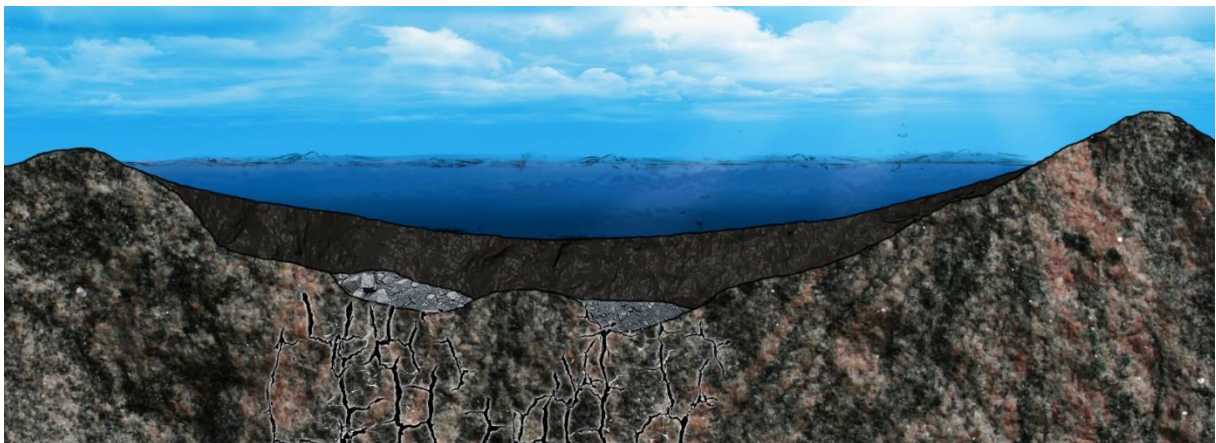
Havsbottnen i Saltsjön och Mälaren är mestadels ackumulerande och huvuddelen av denna innehåller organiska gasrika sediment. I området kring de båda undersökningslinjerna i Saltsjön har många sedimentprovtagningar gjorts för att undersöka spridningen av föroreningar (Jonsson, 2009). Området i Mälaren har också undersökts men för att utvärdera fosforbelastningen (Weyhenmeyer & Rydin, 2003). Utifrån dessa dokument och undersökningar finns information om sedimenten i undersökningsområdena.

Akkumulationsbottnar består mestadels av finmaterial i form av lera och lergyttja med höga vattenhalter. På grund av den höga vattenhalten är gränsen mellan vatten och sediment svårtolkad. Denna typ av bottnar innehåller mycket organiskt material som förbrukar mycket syre vid nedbrytning. Finmaterial deponeras kontinuerligt på

akkumulationsbottnar från omgivningen vilket hindrar att syrgas tränger ner till djupare sedimentskikt. Syrgasen tränger bara ner någon enstaka centimeter i sedimenten. Ytsedimenten fungerar då som ett lock och släpper inte ut någon näring från sedimentlagerna som är på djupare nivå. I gränsskiktet som är mellan syrerikt och syrefattigt lager omvandlas då oorganiskt kväve till kvävgas med hjälp av bakterieaktivitet (Jonsson, 2009). I rapporten som gjordes vid sedimentprovtagningarna i Saltsjön visas det även en registrering på en översiktskarta från SGU där det finns tippmassor i området för undersökningslinjerna.

Vid utförandet av refraktionsseismiken i de olika områdena bekräftades de gasrika sedimenten. Gasbubblor steg upp mot ytan efter att sprängladdningen detonerats och bubblorna fortsatte stiga från botten en god stund efter detonationen.

Samtliga undersökningsområden har likande geologi vilket resulterat i en gemensam konceptuell geologisk modell. Berget, som består till största del av granit, ligger utan övertäckande lager på land medan det i vattenpassagen finns ett mäktigt överliggande lager med sediment. I lokala svackor i bergnivån kan morän finnas och vid bergnivåns lägsta punkt kan svaghetszoner påträffas. Figur 24 visar den konceptuella geologiska modellen som gjorts för samtliga undersökningslinjer.



Figur 24 - Konceptuell geologisk modell över undersökningsområdena. Berggrunden består av granitoid och/eller skiffer med ett mäktigt ovanliggande sedimentlager. Moränfickor samt sprickzoner kan förekomma.

4.2 Lambarfjärden

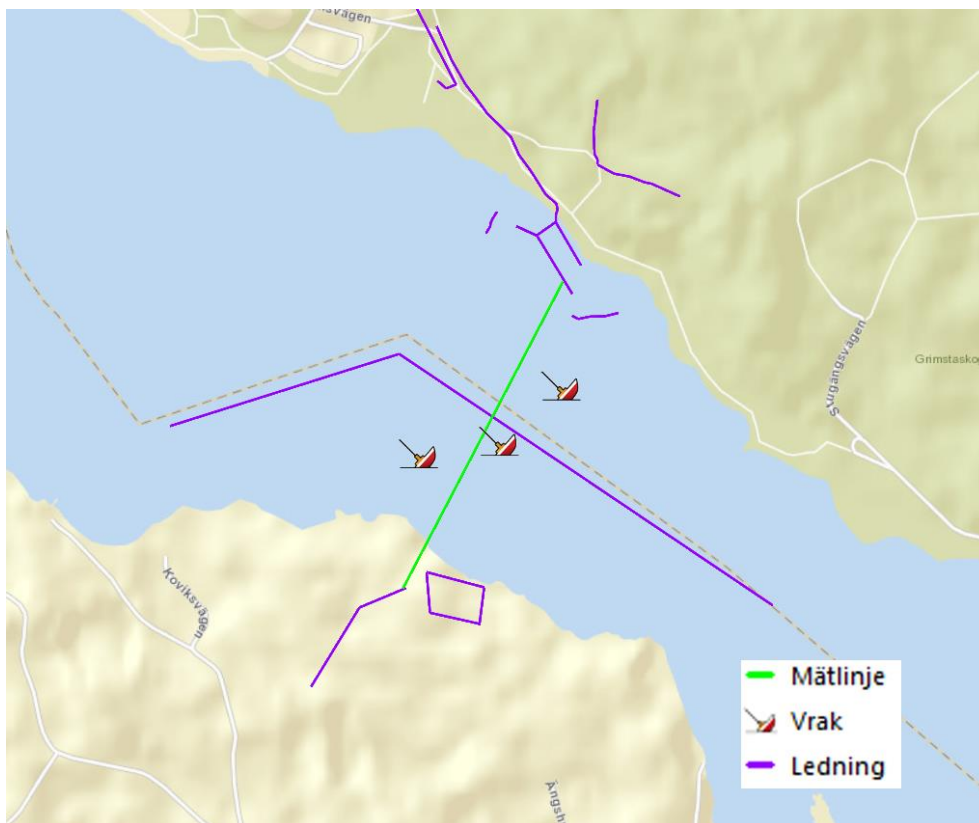
Vid Lambarfjärden är en sträckning planerad för projektet "E4 Förbifart Stockholm", Trafikverket, en sträckning som binder samman de norra och södra länsdelarna i Stockholm och avlastar trafiken för Essingeleden och innerstaden.

Undersökningslinjen för mätningarna ligger i anslutning till dragningen av den planerade sträckningen för tunneln. Tidigare har Trafikverket utfört förundersökningar i området som kommer att användas som verifiering till de geofysiska mätningarna. Redan utförda geofysiska undersökningar är bottenpenetrerande ekolod, refraktions- och reflektionsseismik (Nilsson, 2008b). I området finns också jord- och bergsonderingar som också kommer att användas för verifiering.

Mätningarna från bottenpenetrerande ekolod har använts för att lokalisera bergytan och på så sätt bedöma var seismikundersökningar bör utföras. Resultaten försämrar

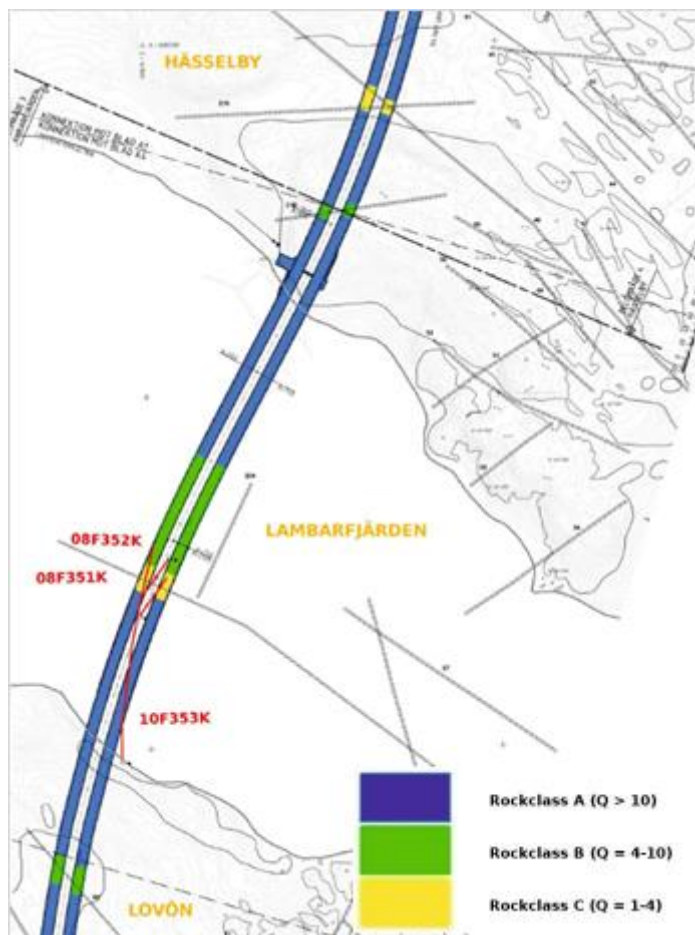
dock något om sedimenten har stor mäktighet, om den innehåller gas eller storblockig morän. Seismikundersökningarna har en bättre penetrationsförmåga och kommer längre ner i sediment och berg. Utifrån dessa fås information om potentiella svaghetszoner i berget genom utvärdering av P-vågen, se teorikapitel om seismik. Resultaten som är redovisade från de tidigare mätningarna är en samtolkning gjord av Geonova av både refraktionsseismik och reflektionsseismik, vilket kommer att redovisas i resultatdelen av examensarbetet.

I området kring undersökningslinjen finns vrak och ledningar att ta hänsyn till. I Figur 25 visas undersökningslinjen, vraken och ledningarna som finns i området. Linjen planeras för att undvika vraken i så stor mån som möjligt. Om mätutrustningen fastnar i ett vrak finns det en risk för skador på både vraket och utrustningen.



Figur 25 – Undersökningslinje för Lambarfjärden i Mälaren

Undersökningslinjen börjar i skogen på Lovön i söder och slutar på småbåtshamnens brygga vid Grimstaskogen i norr. På grund av hamnens placering och svårighet att placera mätkablar under bryggorna kunde inte undersökningslinjen sträckas längre norrut än till hamnens yttersta brygga.



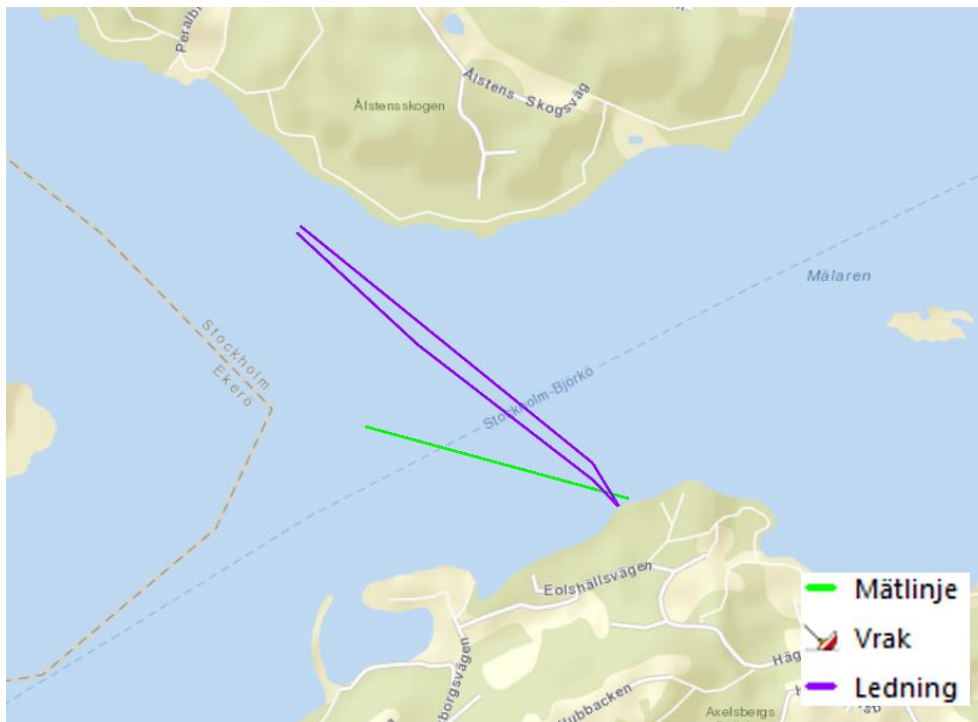
Figur 26 - Dragning av E4 Förbifart Stockholm och lokalisering av svaghetszon (Vass, 2012).

Enligt tidigare förundersökningar för E4 Förbifart Stockholm har en svaghetszon lokaliserats i Lambarfjärden (Vass, 2012). Svaghetszonen är vid den gula markeringen i Figur 26 som visar dragningen av förbifarten.

4.3 Hägersten

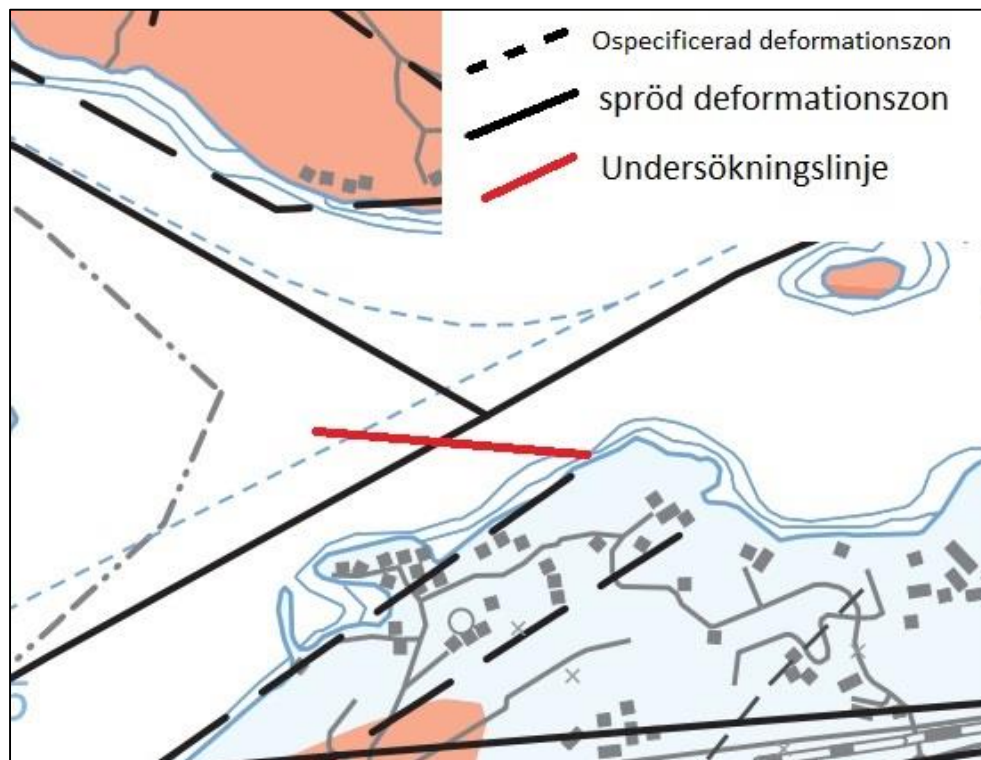
Norr om Hägersten i Mälaren är ett undersökningsområde för Stockholm Vattens planerade dragning av ett nytt avloppssystem. Projektet syftar till att förnya det befintliga avloppssystemet i området med hänsyn till högre utsläppskrav och för att anpassa systemet till befolkningsökningen som sker. Det nya avloppssystemet gynnar även kvaliteten på Mälarens badvatten då avloppssystemet kommer att ha större tolerans för kraftiga regn (StockholmVatten, 2015).

I området för undersökningslinjen har det genomförts flera andra linjer på samma sätt som denna, undersökta med både resistivitet och refraktionsseismik. Den utvalda undersökningslinjen går från öst till väst och längs denna linje finns det referensdata i form av borrhälsdata som kommer att användas för verifiering. I öst börjar undersökningslinjen nära land och sträcker sig sedan ut i vattnet.



Figur 27 - Undersökningslinje norr om området Hägersten i Mälaren.

Figur 28 visar de deformationszoner som är kända för området. Kartan visar att undersökningslinjen korsar en spröd deformationszon vid ungefär halva dess längd. En ospecificerad deformationszon syns även gå längs med kusten och kan korsa undersökningslinjens östra ände. Noggrannheten i läge för deformationszonerna är ca 50 m för observationer och osäkerheten är större för tolkningar (SGU, 2015b).



Figur 28 - Förkastningszoner, Hägersten 1:50 000 (SGU, 2015b).

4.4 Finnboda-Biskopsudden

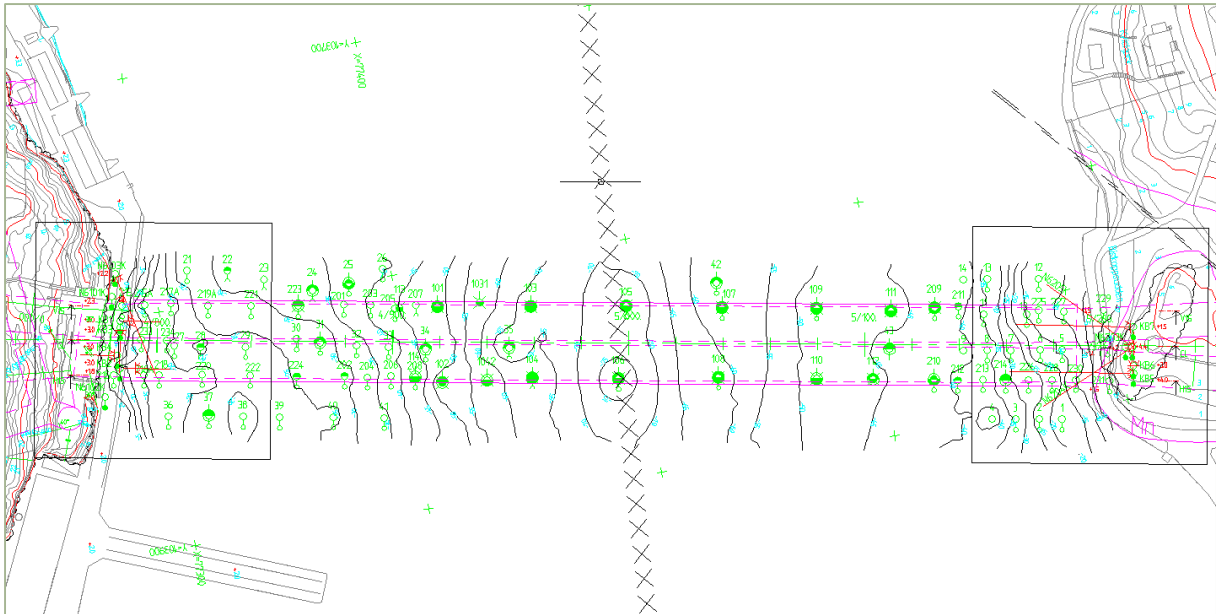
Undersökningslinjen Finnboda-Biskopsudden är anpassad till ett av två alternativ för dragningen av vägförbindelsen i projektet "Östlig Förbindelse". Vägförbindelsen är ett av Trafikverkets projekt med syfte till att bygga en nordsydlig vägförbindelse öster om Gamla Stan i Stockholm. Dragningen vid Finnboda-Biskopsudden är planerad att vara en sänktunnel under vattenpassagen. År 1994 gjordes ett antal jord- och bergsonderingar i förundersökningssyfte längs med linjen vilket ger omfattande information för att verifiera resistivitets- och refraktionsseismik-mätningarna (Öhrner, 1994). Information från jord- och bergsonderingarna redovisas i samband med resultaten från mätmetoderna.

På havsbotten finns vissa vrak och ledningar att ta hänsyn till för att inte påverka data eller fastna med utrustningen. Vid Finnboda-Biskopsudden finns det endast några få vrak vid sidan om undersökningslinjen och dessa skapar inget problem vid utförande av fältarbetet, se Figur 29.



Figur 29 - Undersökningslinje för Finnboda-Biskopsudden i Saltjön

Undersökningens södra del börjar i vattnet då en stor kajkant, cykelväg och staket hindrar en sydligare dragning av linjen. Norra delen av linjen avslutas i en park som dels är uppbyggd av sprängsten.



Figur 30 – En alternativ dragning av Östlig Förbindelse (Syd - Nordlig riktning) med sänktunnelalternativ, en svaghetszon är lokaliserad i vattenpassagens mitt (Öhrner, 1994).

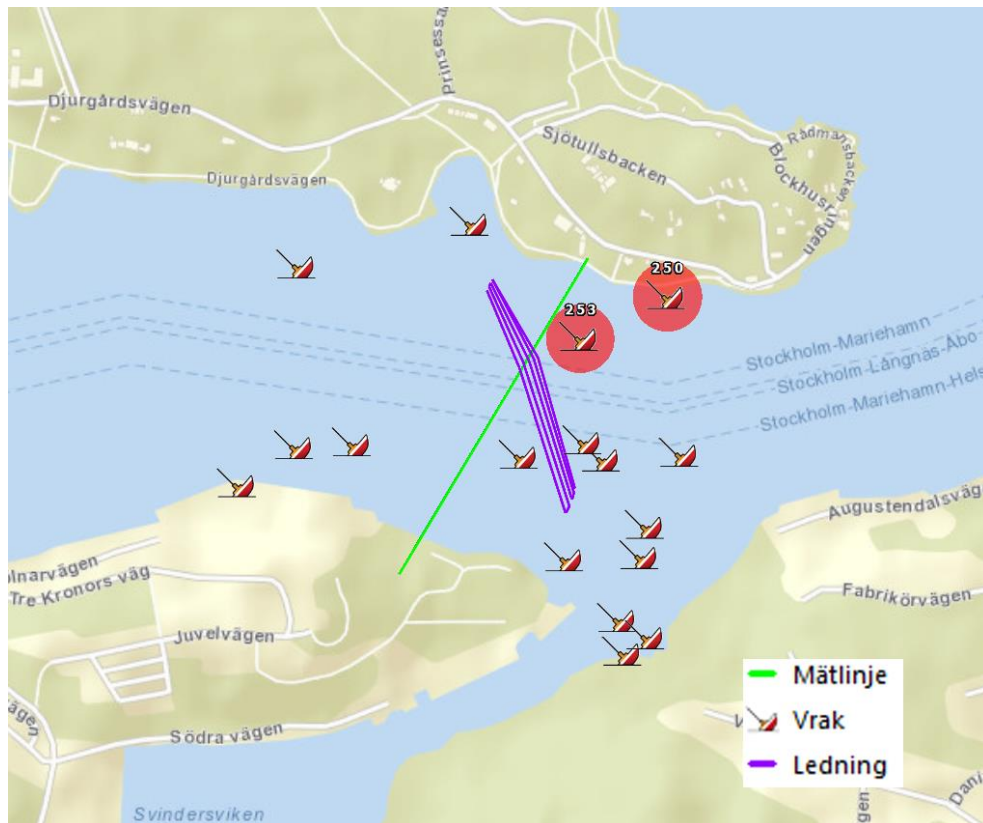
Figur 30 visar alternativet till Östlig förbindelse och i figuren är JB-sonderingarna markerade med grön färg. En svaghetszon är lokaliserad i mitten av passagen enligt de utförda förundersökningarna för projektet (Öhrner, 1994). I mätresultatet från resistivitet och seismik förväntas därför en indikation på en svaghetszon just där. Dragningen av undersökningslinjen går längs med den västra linjen av JB-sonderingar som är gjorda och på så sätt sammanfaller referensdata väl med undersökningslinjen och vrak i omgivningen undviks.

4.5 Kvarnholmen–Blockhusudden

Vid området Kvarnholmen-Blockhusudden är den andra alternativa dragningen av Östlig Förbindelse planerad. Istället för en sänktunnel som vid Finnboda-Biskopsudden planeras en bergtunnel.

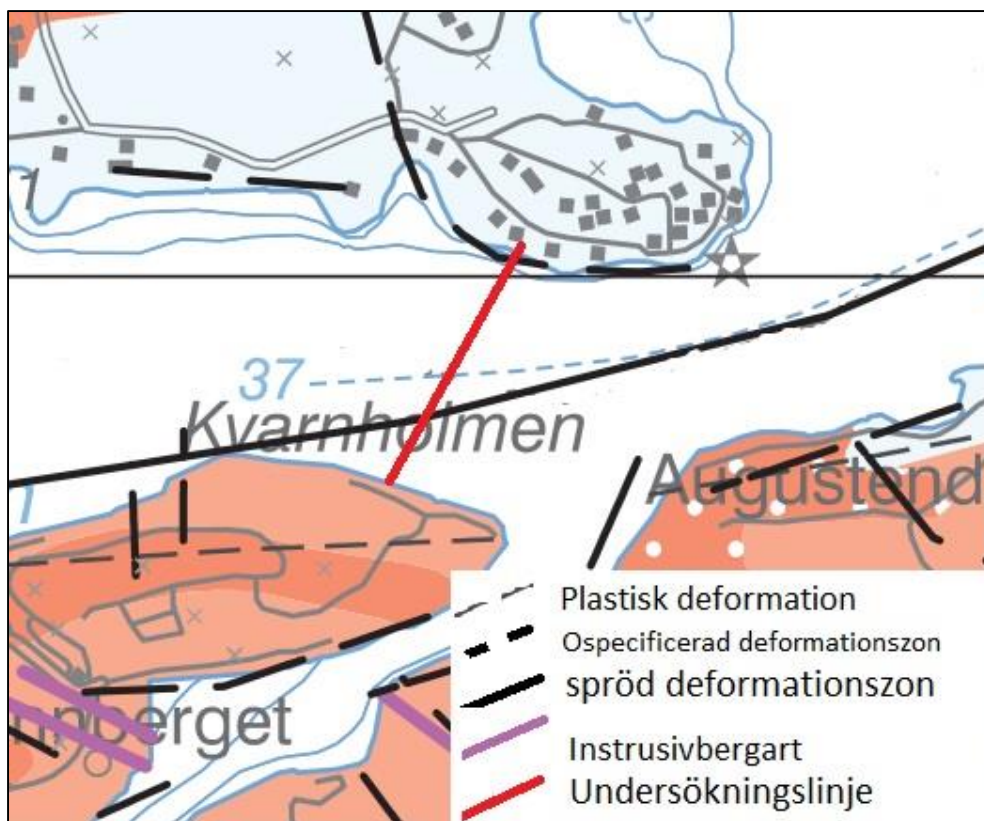
Förutom den omfattande båttrafiken i området så finns det ännu en logistisk svårighet med undersökningslinjen Kvarnholmen-Blockhusudden, på havsbotten finns ett stort antal vrak som ligger omkring den tänkta dragningen. På grund av detta så flyttas undersökningslinjen bort från vraken, ca 60 meter längre västerut än den tänkta tunneldragningen, se Figur 31. I söder går undersökningslinjen i en park/lekplats och på grund av stängsel så kan inte linjen gå längre söderut. Vid strandkanten finns en stor mängd med sprängsten. Kvarnholmen är ett område i utveckling och förnyelse, parken är en del av nybyggnationen. I norr är området också under ombyggnad och staket stoppar en dragning längre norrut.

Undersökningslinjen korsar flera ledningar. Ledningarna har en ungefärlig position vilket innebär att seismikmätningarna får göras med försiktighet i området.



Figur 31 - Undersökningslinje för Kvarnholmen-Blockhusudden i Saltsjön

Figur 32 visar de deformationszoner som är kända för området. Kartan visar att undersökningslinjen korsar en spröd deformationszon vid en fjärdedel av dess längd. En ospecificerad deformationszon syns även längs med den norra kusten och kan korsa undersökningslinjens norra ände. Noggrannheten i läge för deformationszonerna är ca 50 m för observationer och osäkerheten är större för tolkningar (SGU, 2015b).



Figur 32 - Kvarnholmen - Blockhusudden deformationszoner 1:50 000 (SGU, 2015b)

Referensdata i form av geoteknisk borrhning att jämföra mätresultaten med togs fram i november 2015 av Trafikverket men då dessa avviker från den geofysiska mätlinjen med 70-90 m i sidled kommer dessa inte att utvärderas i detalj. Däremot kommer resultatet redovisas i resultatkapitlet.

5 Störningar från området

Stockholm är ett urbant område med många människor och mycket trafik. Antalet invånare i området ökar och kommunikation med tunnelbana, tåg, båt och bil används flitigt. Tunnelbanan är längre än 105 km och sträcker sig över hela Stockholms stad och till många av förorterna. I tunnelbanesystemet finns ca 100 stationer och 75 % av dessa ligger utanför Stockholms innerstad (Stockholms lokaltrafik, 2015a). I närheten av de fyra undersökningsområdena går både tunnelbana och pendeltåg. Dessa trafikslag ger upphov till olika störningar som kan försämra data från mätningarna. För att undvika dessa görs undersökningarna med resistivitet och refraktionsseismik på dygnets lugnare tider, under natten.

För att se hur stor skillnad det är i störningar på dagen mot störningar på natten gjordes två resistivitetsmätningar i Lambarfjärden. Mätningarna skedde under natten mellan onsdagen den 23:e och torsdagen den 24:e september år 2015. Den första mätningen ägde rum mellan 03:26 till 04:52, en tidsperiod där ingen planerad tunnelbanetrafik förekommer. Mellan 06:02 och 07:28 gjordes den andra mätningen vilket sammanföll med morgontrafiken. Variansen av mätdata beror på geologin i området, elektrodkontakten och de störningar som finns. Då elektroderna befann sig på samma ställe för båda mätningarna är variansen ett användbart värde på hur stora störningar som finns i området. I Diagram 2 syns hur variansen för mätningarna varierar över tiden. Då trafiken tros vara en stor störningskälla är även dennas variation inlagd i diagrammet. Trafikflödena är hämtade från Stockholms lokaltrafiks hemsida (Stockholms lokaltrafik, 2015b) och Statens väg- och transportforskningsinstitut (Björketun & Carlsson, 2005).

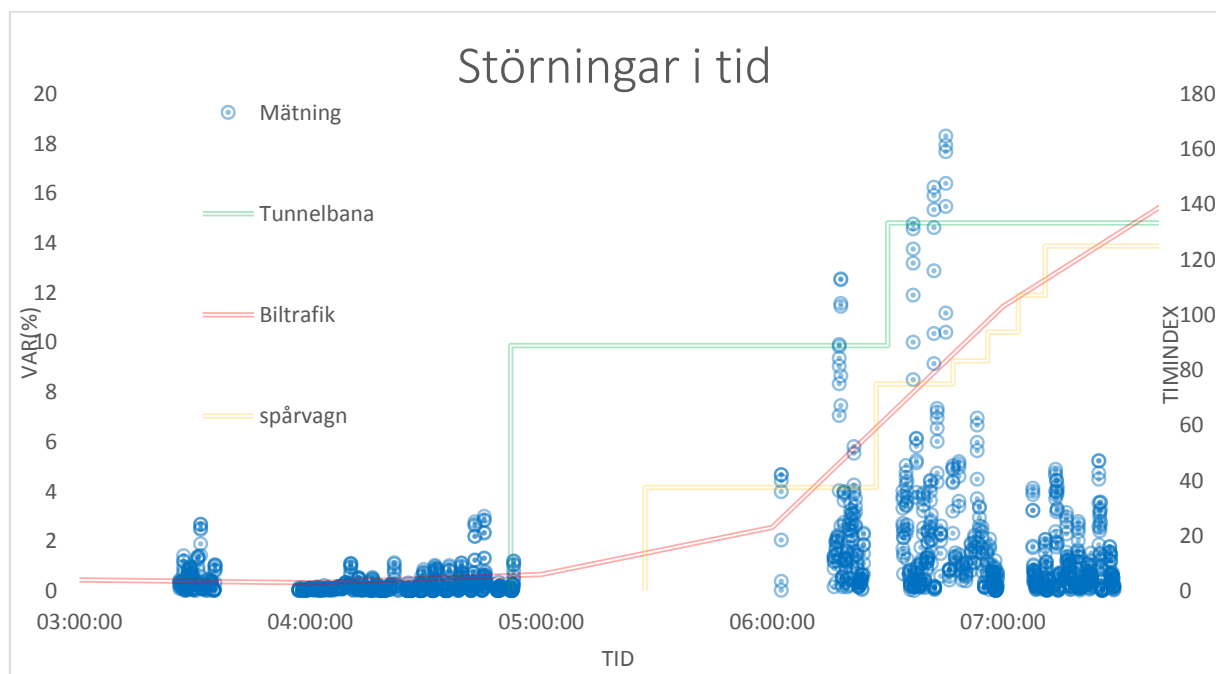


Diagram 2 – Variansen för störningar över tid [klockslag] samt inritade trafikflöden i området.

En tydlig skillnad kan ses mellan de mätningar som skedde under småtimmarna mot de som skedde under morgonrusningen. Jämförelse med bil-, spårvagns- och tunnelbanetrafiken visar att dessa är en trolig källa till störningar i

resistivetsmätningarna. Det framgår dock inte vilka trafikslag som påverkar och i vilken grad. Förmodligen står tunnelbanan för den största delen av störningarna då denna går på likström och har bra kontakt med berget. En fortsatt studie om dessa störningar hade varit intressant, där en utvärdering av rådata och de olika frekvenserna som störningarna förekommer på kan göras.

Vid närmare koll på variationen i variansen tycks denna ha en lägre variation kring kl 07:00 trots att de antagna störningskällorna är högst aktiva i området. Detta kan bero på att mätplanen är uppbyggd att börja med de längre elektroavstånden för att sen successivt gå över till kortare och kortare. De längre avstånden ger ett större djup på mätningen och är mer känsliga för störningar då signalen förlorar styrka då den färdas en längre väg. Nedan, i diagrammet, visas variansen av mätningarna mot tiden. Storleken på punkterna representerar djupet för mätningen. Ett större djup ger en större prick och tvärtom för mindre djup. Det syns tydligt att mätdjupet är grundare i slutet av mätningen och därför inte lika känslig för störningar.

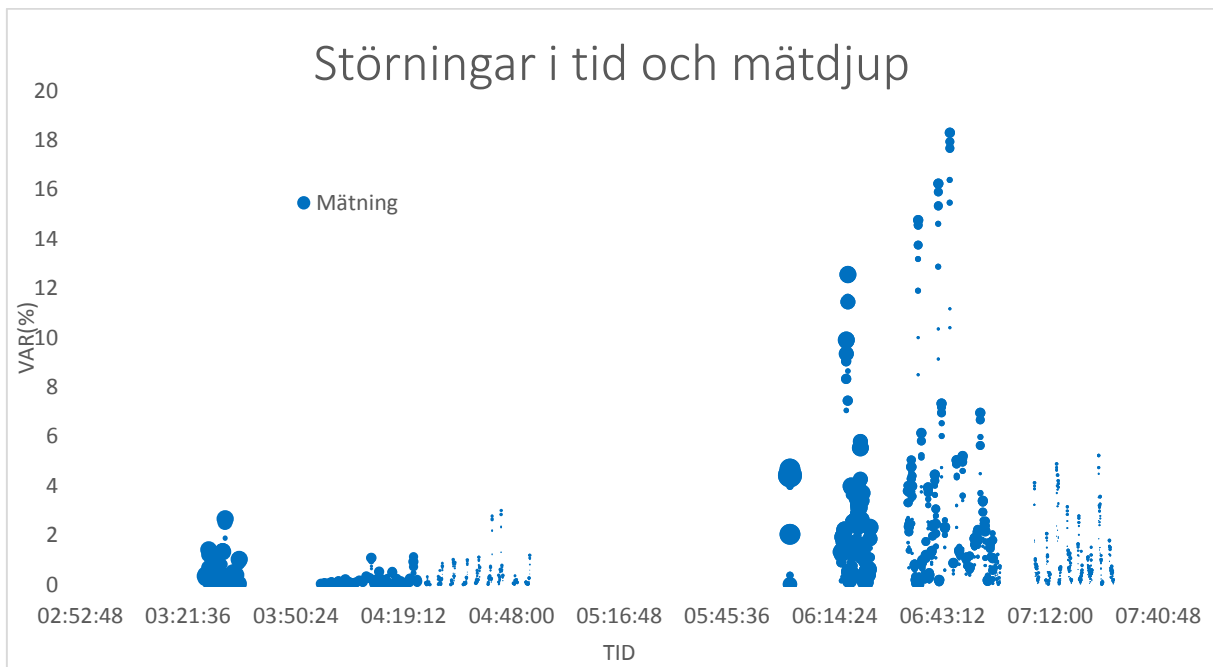


Diagram 3 – Variansen för störningar över tid [Klockslag] för olika mätdjup.

Då dessa testmätningar utfördes i Lambarfjärden, vilket är det området som är minst urbant av de som ingår i examensarbetet, är störningarna troligen större i de mer centrala områdena. Att utföra mätningarna nattetid är därför mer fördelaktigt ju mer urbant läge undersökningen har.

6 Resultat och analys av respektive undersökningslinje

I de framtagna sektionerna av resistivitetsresultatet är informationen på stort djup och i undersökningslinjernas ändar inte tillförlitliga, detta på grund av en försämrad datatäckning i dessa delar. För att resultaten ska bli lättare att diskutera trimmas vissa delar av sektionen bort. Trimningen har ingen direkt vetenskaplig grund utan bygger på teoretiska antaganden och för att redovisa pedagogiska sektioner. Pseudosektionerna används som riktlinje i vilken utsträckning och räckvidd som signalen tränger ner i marken och resultatsektionerna trimmas därför i en liknande konformad profil. Trimningen är även utförd så att osannolika geologiska strukturer tas bort och på så sätt blir mer lättolkad för otränade ögon. Pseudosektionen visar variationen av den skenbara resistiviteten uppmätt i fält samt det teoretiska penetrationsdjupet (Allaby & Allaby, 2016).

Under insamlingen av data gjordes en intressant iakttagelse vid samtliga seismikmätningar. Vid sprängning rörde botten-sedimenten om och gas frigjordes. På vattenytan syntes först vågen från sprängladdningen och sedan täcktes vattnet med små gasbubblor som fortsatte att komma upp till ytan en god stund efter sprängladdningen detonerat.

6.1 Lambarfjärden

Vid undersökningslinjen Lambarfjärden gjordes endast resistivitetsmätningar. Detta på grund av tidsbrist där seismikundersökningarna fick bortprioriteras. Tidigare undersökningar har däremot gjorts som en förundersökning för Förbifart Stockholm. De undersökningar som gjordes och som togs med i utvärderingen i denna rapport var resultat från JB-sonderingar, borrhål, reflektions- och refraktionsseismik. Dessa resultat redovisas och jämförs tillsammans med resistivitetsmätningarna.

6.1.1 Resistivitet

Resistivitetsmätningarna gjordes med multipel gradient-konfigurationen. Då undersökningslinjen är lång och vattenresistiviteten är relativt hög är denna konfiguration tillräcklig för området kring Lambarfjärden för att få fram en tolkad nivå på berggrunden och upptäcka svaghetszoner. Två extra mätningar gjordes, en nattetid och en under morgonrusningen för att se hur dygnsvariationen av störningar från Stockholms stad påverkar mätningarna. Dygnsvariationen kommenteras i kapitel 5 om störningar.

Den uppmätta och den använda vattenresistiviteten för området redovisas i nedanstående diagram. De värden som används vid processering av data är markerade, värdet varierar inte så mycket med djupet och hela vattenlagret antas därför ha samma resistivitetsvärde.

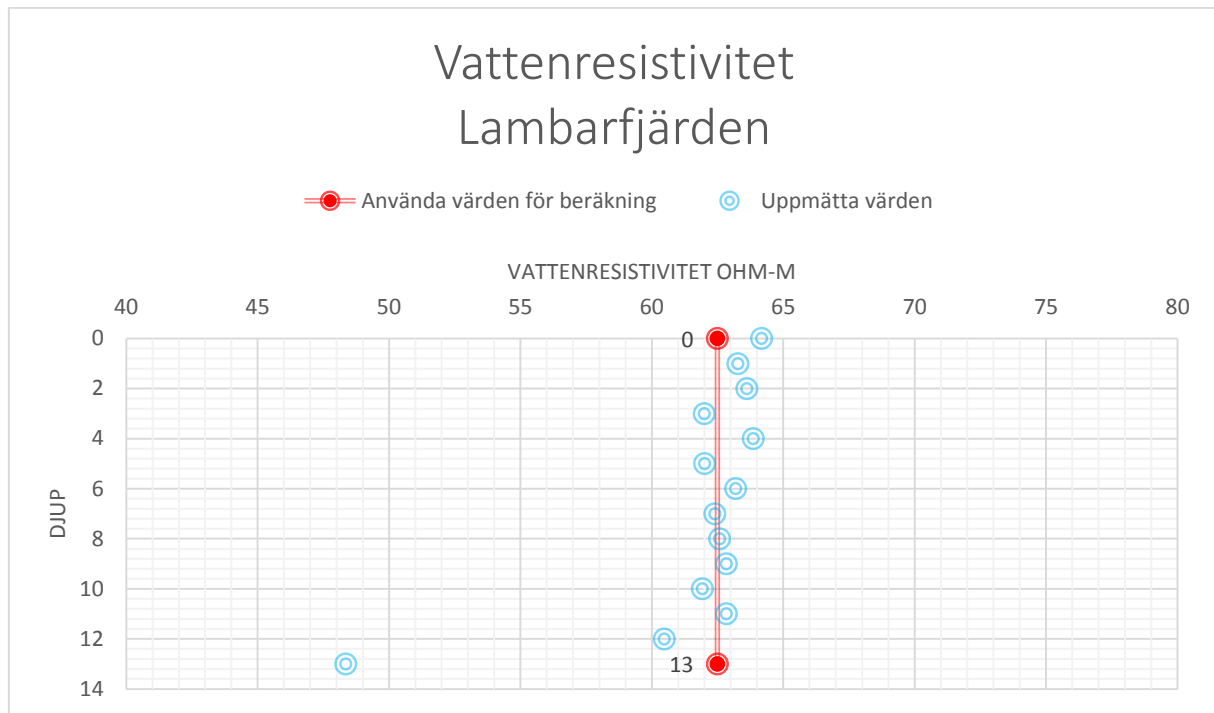
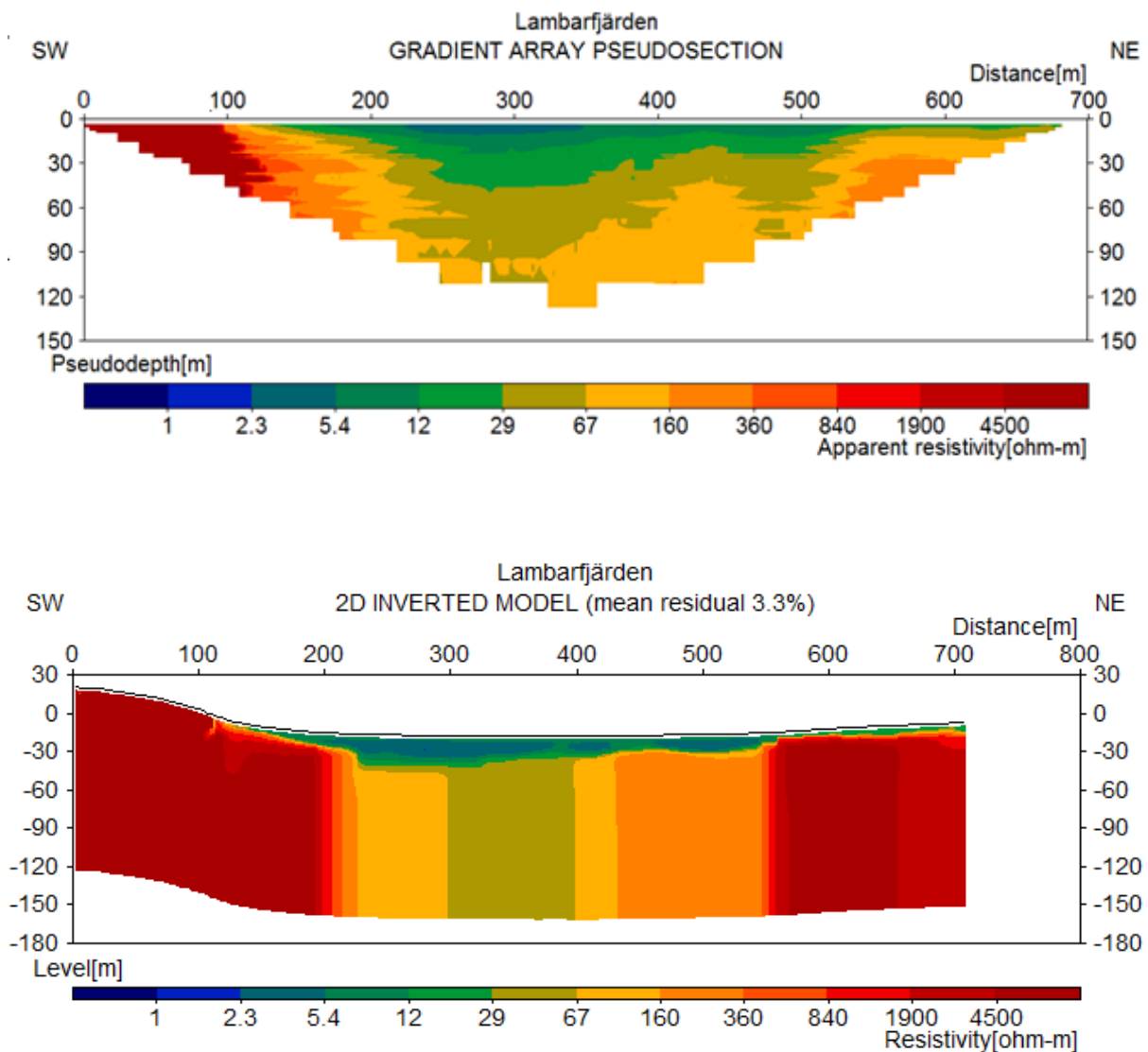


Diagram 4 - Vattenresistivitet vid Lambarfjärden

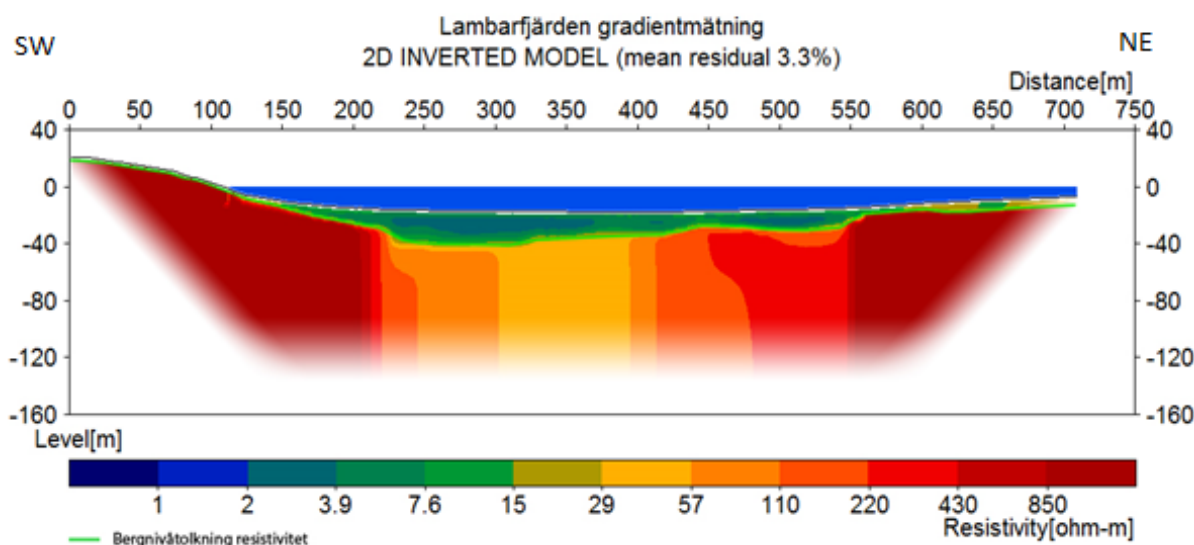
Resultatet av multipel gradientmätningen visas i Figur 33 med både pseudosektion och under denna en inverterad sektionsmodell. Resistivitetsmätningen av undersökningslinjen gjordes under natten. Startpunkten i sydväst började i lite högre terräng på Lovön och slutade under en brygga i nordöst.



Figur 33 – Pseudosektion och resistivitetssektion för multipel gradientkonfiguration vid Lambarfjärden

Pseudosektionen för den multipla gradientmätningen, som visas överst i Figur 33, har en konformad profil och ett djup på ungefär 120 m. Den inverterade modellen i Figur 34 är justerad, alltså trimmad, på djupet och vid ändarna med hänsyn till denna. Vissa vertikala strukturer syns fortfarande i resultatet, dessa är inte geologiskt sannolika men har valts att inte trimmas bort för att behålla helhetskänslan.

I figuren är även en tolkning av bergnivån gjord med en grön linje. Denna bergnivå är tolkad att ligga längs den skarpa färgövergången.



Figur 34 - Resistivitetssektion för undersökningslinjen Lambarfjärden med multipel gradientkonfiguration, justerad med hänsyn till datatäckning.

I resultaten kan en tydlig svaghetszon utskiljas vid sträckningen 240-410 m. Ett lågresistivt område sträcker sig längs sjöbotten. Detta område tolkas som sedimentlager med mäktigheten <25m, då dess resistivetsvärde och position stämmer väl in på detta antagande.

6.1.2 Referensdata

Från förundersökningen för dragningen av E4 Förbifart Stockholm finns det seismik, borrhål och JB-sonderingar som referensdata att jämföra resistivetsresultatet med. Borrhålen och sonderingarna presenteras i Figur 38, tillsammans med resistivetsmätningen och annan data som också samlades in i samband med förundersökningen (Nilsson, 2008a).

Tabell 5 visar de sonderingar och borrhål som gjorts i Lambarfjärden och som ligger tillräckligt nära undersökningslinjen för att anses vara jämförbara.

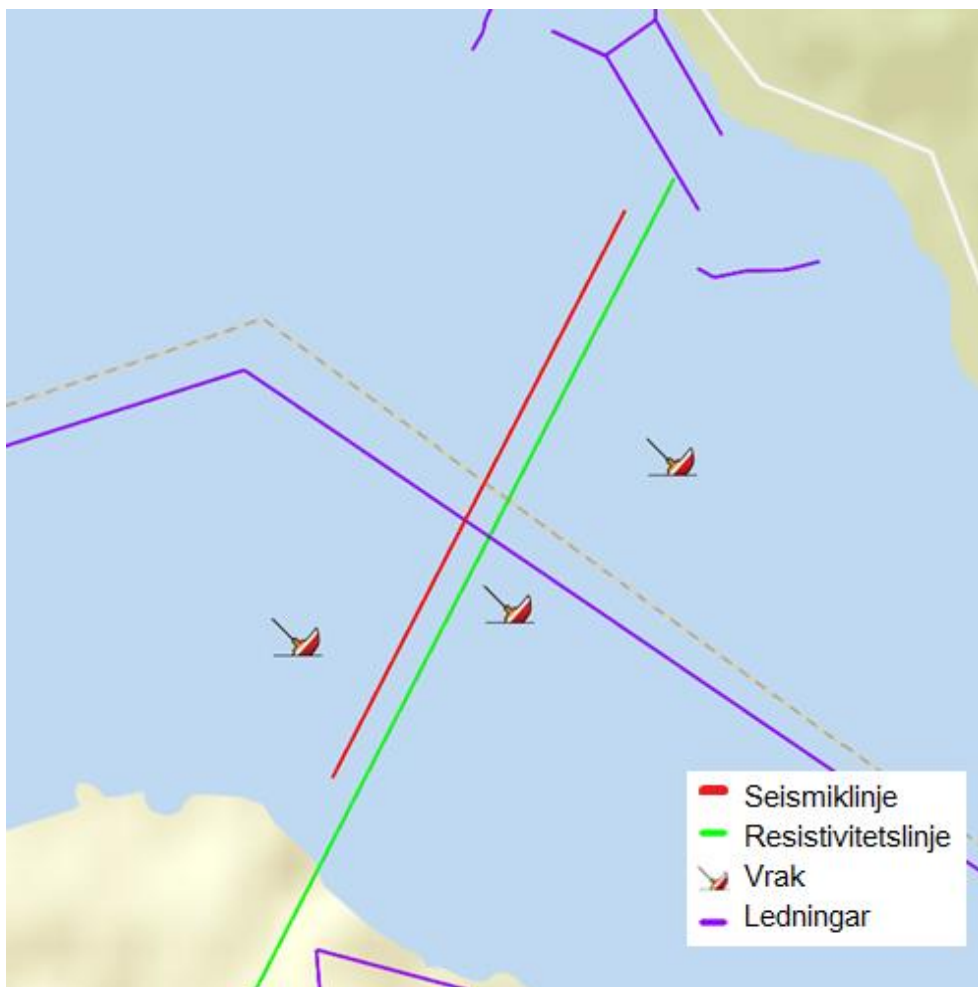
Tabell 5 – Sonderingar gjorda vid resistivetslinjen i Lambarfjärden. Angivna positioner är i resistivetslinjens längdmätning.

Position	Beteckning	Bergnivå	Avstånd från mätlinjen
274.2	08F388	-47.4	-15.8
284	08F351K	-36.9	0
307.3	08F389	-39.9	-13.5
377	08F352K	-37	0
461.6	08F391	-26.3	-3.7

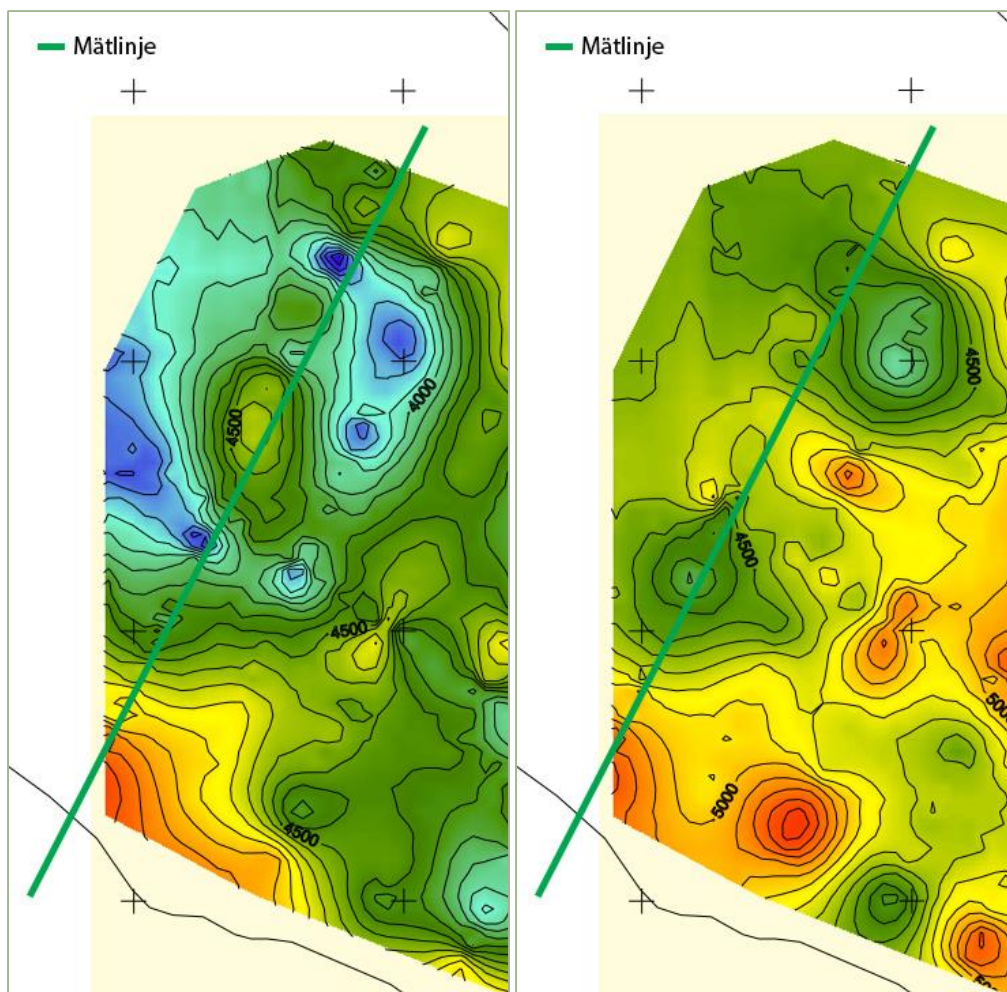
De seismiska undersökningarna har utförts av ELGI som underkonsult till Geonova på uppdrag av Trafikverket. Utrustningen som använts är avsedd för vattenundersökningar och kan hantera både reflektion- och refraktionsseismik. Energikällan som användes var en "airgun", laddad med kvävgas som gav tillräcklig effekt för att ett resultat skulle fås. Syftet med refraktionsseismiken var att se hur hastigheterna varierade i berget medan reflektionseismiken var ämnad att identifiera eventuella sprickors lutning. Utläggat var 200 meter långt och hade 23 kanaler

(Nilsson, 2008b). Resultatet från seismiken redovisas i Figur 36 och dess position i Figur 35. Flera undersökningslinjer är gjorda för att kartlägga området men endast linjen närmst resistivitetundersökningen är redovisad, se Figur 37. Avståndet mellan denna och undersökningslinjen för resistivitet är ca 5-20 m och bedöms vara tillräckligt liten för att resultaten skall kunna jämföras. I figurerna är undersökningslinjen för resistivitetsutlägget inritad med en grön linje. För p-vågshastighet i bergkontakt indikerar figuren på svagare område hos berget vid de blå områdena. Figuren beskriver p-vågshastigheterna i bergmassan där den blågröna nyansen motsvarar de svagare delarna av bergmassan.

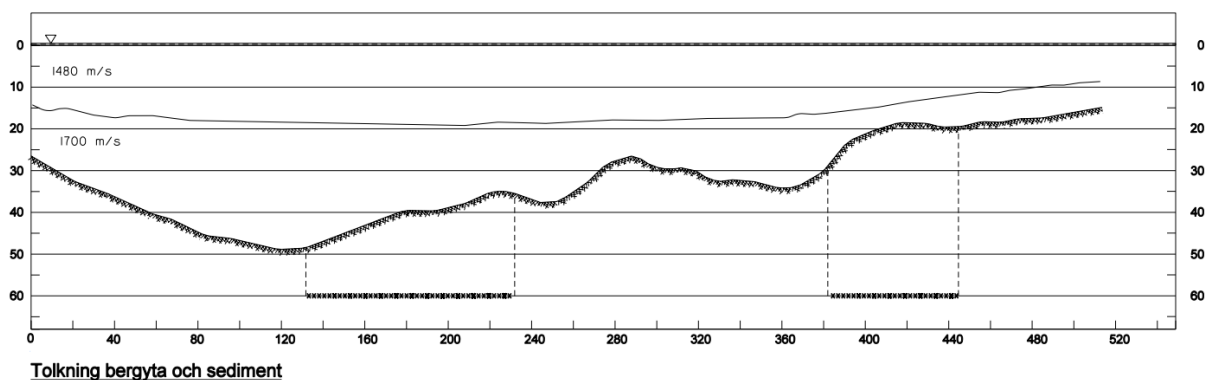
De uppmätta p-vågshastigheterna i området är som lägst ca 3500 m/s. Områdena med en lägre p-vågshastighet visar på potentiella svaghetszoner. Enligt resultaten på reflektionsseismiken blev det ingen tydlig reflektion på djupet från svaghetszonerna. Utifrån detta antas det att lutningen på svaghetszonerna är branta, närapå vertikala. (Nilsson, 2008b)



Figur 35 - Position för seismikundersökningen i Lambarfjärden. Grön linje representerar resistivitetslinjen och röd seismiklinjen.



Figur 36 – (Bild vänster) Undersökningslinje vid Lambarfjärden, P-vågs-hastighet vid bergkontakt [m/s]. (Bild höger) Undersökningslinje vid Lambarfjärden, P-vågs-hastighet i berg [m/s] (Nilsson, 2008a). Den gröna linjen representerar positionen för resistivitetsmätningen.

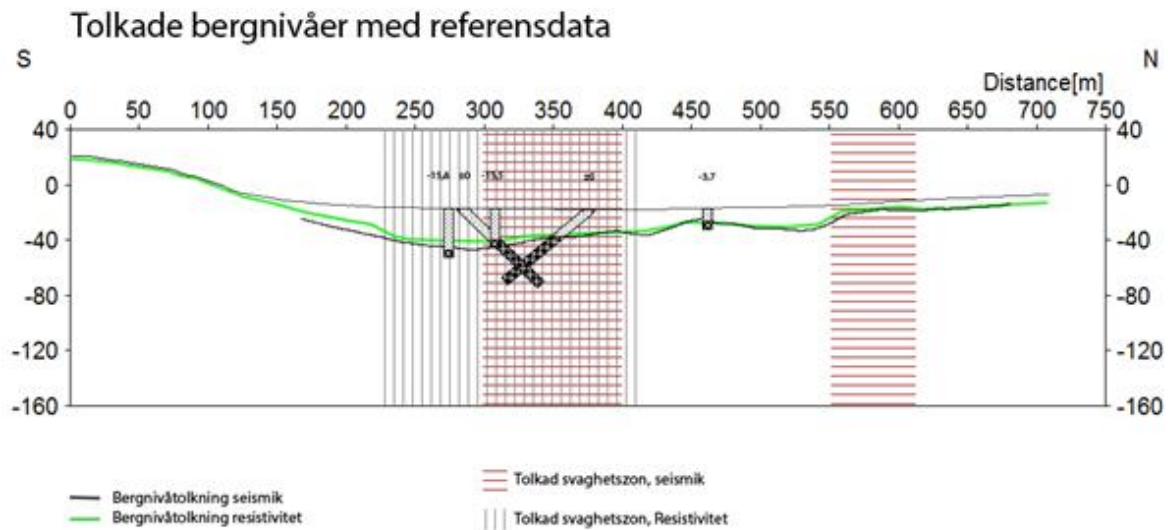


Figur 37 - Tolkad bergnivå och svaghetszoner utifrån seismikundersökningen (Nilsson, 2008a).

6.1.3 Jämförelse

I Figur 38 redovisas samtolkningen mellan de olika geofysiska mätningarna, borrhål och sonderingar. Den tolkade bergnivån för resistivitetsmätningarna är markerad med en grön linje och för samtolkningen av seismikundersökningarna är den tolkade bergnivån markerad med en svart linje (Nilsson, 2008a).

Borrhålen och JB-sonderingarna i Figur 38 visar på bergnivån och denna stämmer bra överens med de tolkade bergnivåerna från de geofysiska undersökningarna.



Figur 38 - Tolkning av bergyta och intressanta zoner för de geofysiska mätningarna tillsammans med referensdata.

Resistivetsmätningarna indikerar en svaghetszon vid sträckningen 240-410 meter vilket sammanfaller med seismikresultaten, med en svaghetszon vid 300-400 meter. Seismikresultaten antyder också på en svaghetszon vid sträckningen 550-610 meter men denna zon kan dock inte stärkas av resistivetsresultatet. Anledningen till detta är oklar. Resistivetsmätningarna har bra täckning i området och den svaghetszon som syns i seismikresultatet borde synas i resistiviteten. En möjlig förklaring kan hittas i positioneringen av mätlinjerna. Mot området 500 m blir avståndet större mellan undersökningslinjerna och det är möjligt att de låga hastigheterna som syns i seismikresultatet är lokala och sträcker sig därför inte bort till undersökningslinjen för resistivitet. Då båda seismikresultaten är utvärderade av en extern organisation kan denna skillnad inte utvärderas noggrannare och avgränsas därför i examensarbetet.

6.2 Hägersten

Vid Hägersten har både seismik- och resistivetsundersökningar gjorts längs med den aktuella undersökningslinjen. I området finns borrhål och de som inte ligger alltför långt ifrån undersökningslinjen används som referensdata.

6.2.1 Resistivitet

Mätningarna gjordes med multipel gradientkonfiguration vilket ger tillräcklig information på djupet för att kunna lokalisera bergnivån i området. I diagrammet nedan redovisas vattenresistivetsmätningarna som gjordes i området och värdena som användes vid processering av data är rödmarkerade. Fördelningen av vattenresistiviteten på djupet varierar något och därför delas vattenvolymen in i tre lager med olika resistiviteter.

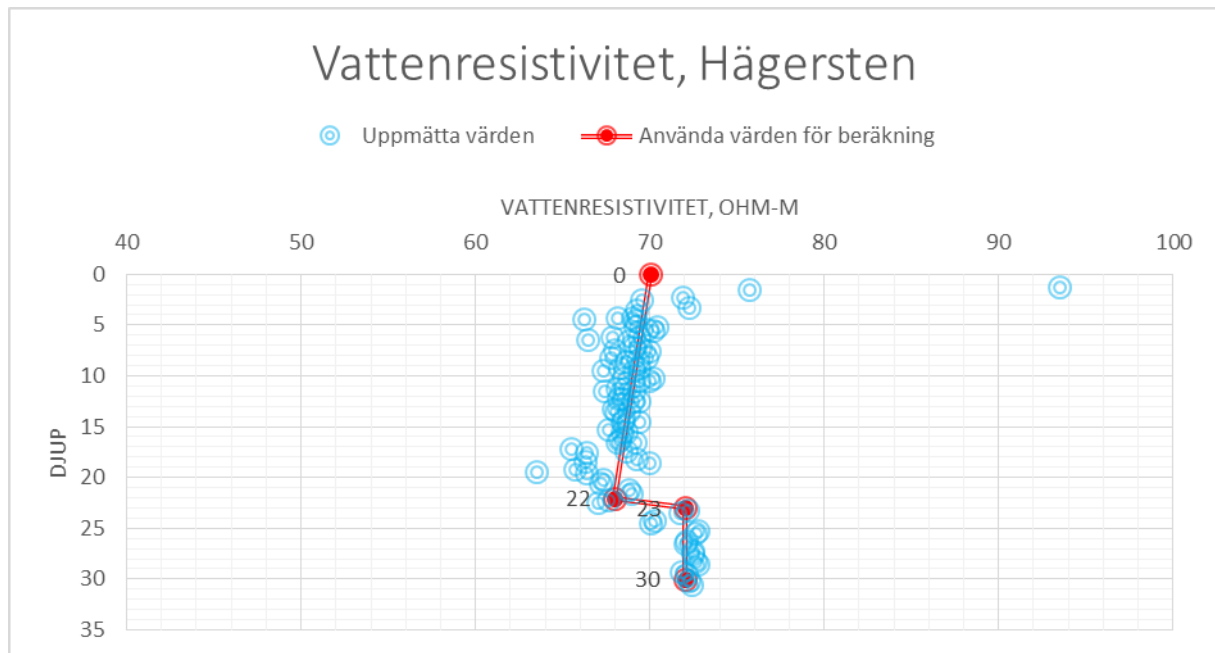
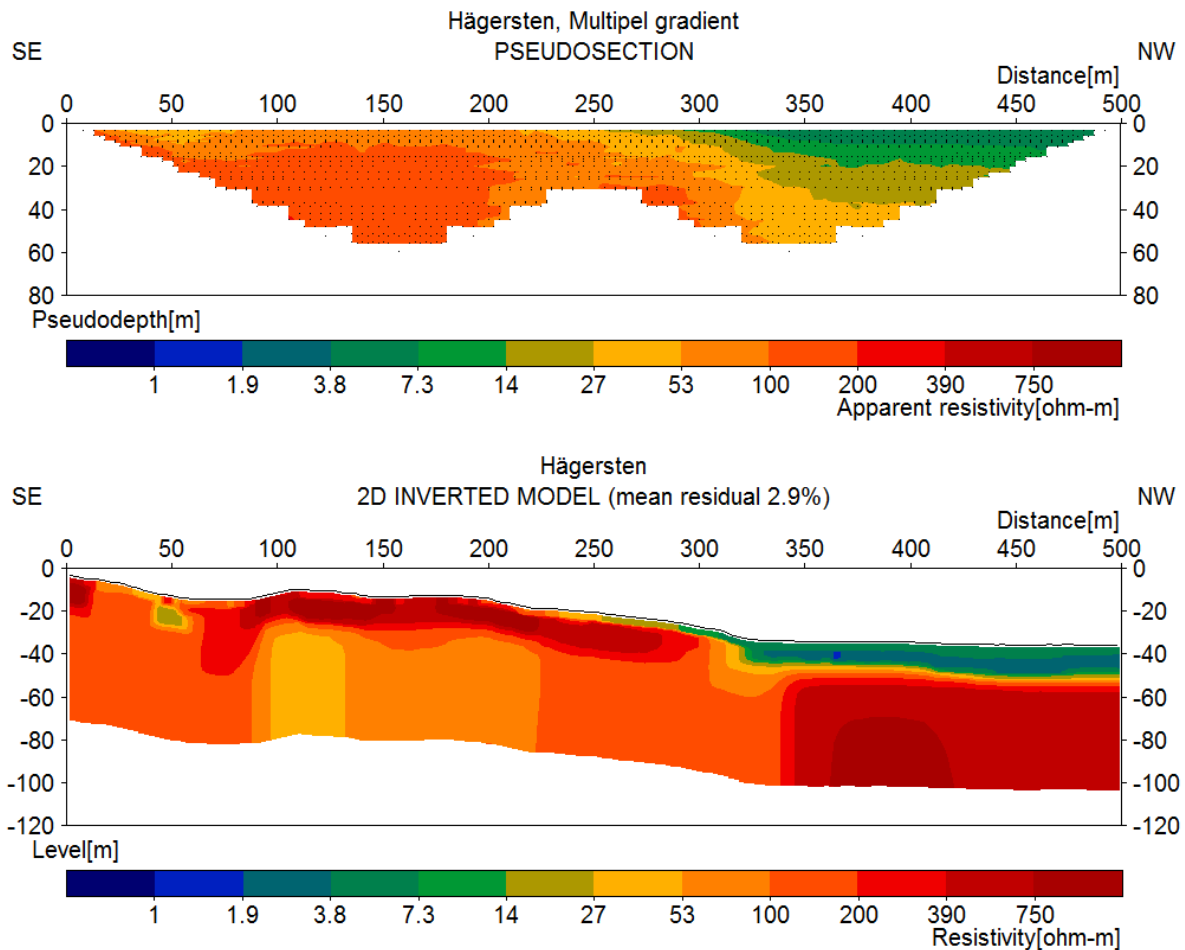


Diagram 5 - Vattenresistivitet, Hägersten

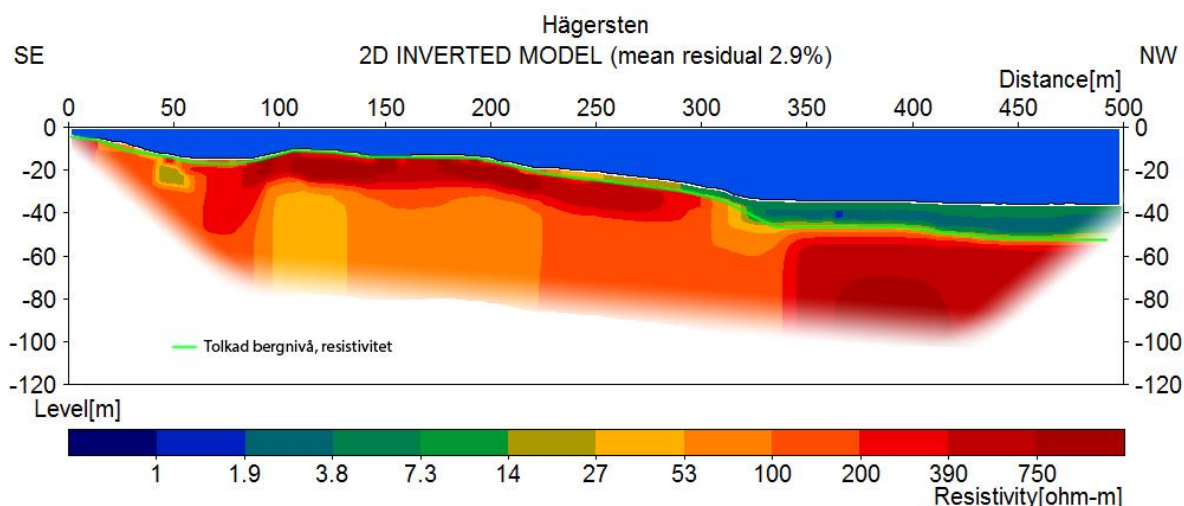
Resistivitetsresultatet visas i Figur 39 med både en pseudosektion och en inverterad modell. Pseudosektionen för den multipla gradientmätningen består av två mindre konformade delar. Sektionen är sådan på grund av att mätningen gjordes med två kortare utlägg med överlapp för att undvika att ha kontaktändar ute i vattnet vid fältarbetet. Mätningen krävde då inte ett utlägg med interlink-kabel och trådlöst system utan kablarna var direkt kopplade in i ABEM Terrameter LS. Djupet hos pseudosektionen går till ca 60 meter vilket sektionen över resistivitetsresultatet i Figur 40 är justerad mot. Trimning har också gjorts vid ändarna av undersökningslinjen på grund av sämre datatäckning.



Figur 39 - Resistivetsresultatet från gradientmätning vid Hägersten.

Resistivetssektionen visar på en anomali vid sträckningen 50 m på undersökningslinjen och en tendens till en annan vid ca 325 m. Dessa områden stämmer väl med de kända svaghetszonerna i området, se Figur 28. Det översta skiktet mellan ca 90-270 m visar ett högresistivt område, underliggande område har något lägre resistivitet vilket kan bero på att signalen har svårt för att tränga ner genom det högresistiva området och väljer därför en annan väg. Detta kallas för en 3D-effekt och uppstår eftersom signalen följer minsta motståndets lag och kan avvika från undersökningslinjen till ett mer konduktivt område och således ge falsk information om marken direkt under linjen.

Bergnivån är tolkad utifrån resistivetsmätningarna enligt den gröna linjen i Figur 40. Bergnivåtolkningen följer gradienten mellan den högre och lägre resistiviteten.

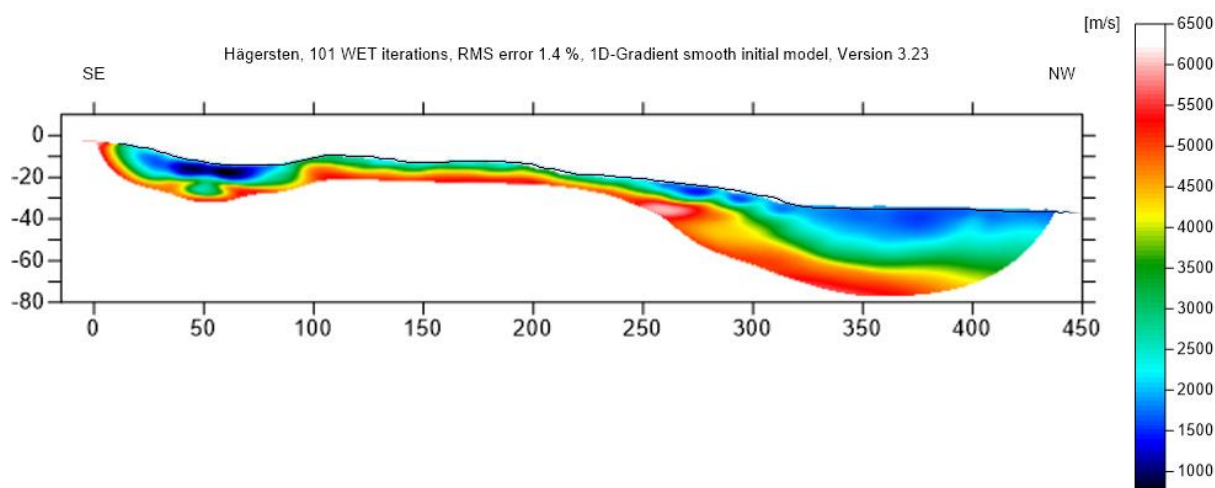


Figur 40 - Resistivitetsresultatet från gradientmätning vid Hägersten, redigerad med hänsyn till täckning vid insamling av data.

6.2.2 Seismik

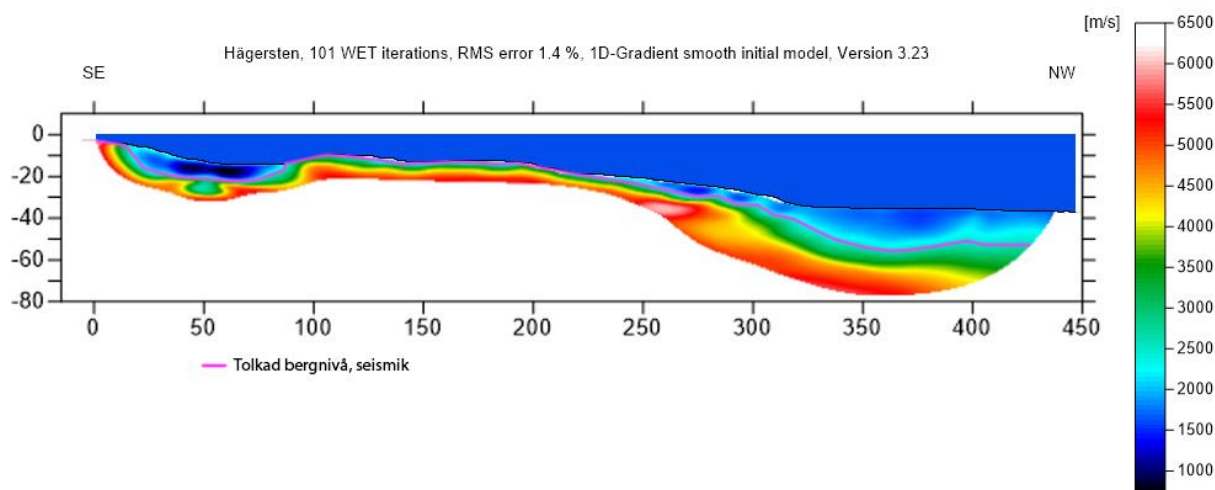
Seismikundersökningen gjordes med två utlägg längs med undersökningslinjen. Överlappningen blev på lite mer än 100 meter och gav en god täckning i övergången mellan de båda utläggerna. Från resultatet som presenteras i Figur 41 finns det en zon vid sträckningen 20-80 meter som visar på ett större sedimentdjup och en möjlig svaghetszon. Denna möjliga svaghetszon kan vara den ospecificerade deformationszonen som visas i Figur 28.

Utöver denna anomali syns inga tydliga avvikelser som indikerar på fler svaghetszoner längs med undersökningslinjen. En svag antydning till en liten avvikelse finns dock vid sträckningen 280-300 meter. Även denna tolkning styrks av en svaghetszon i Figur 28.



Figur 41 - Resultat från refraktionsseismik-undersökning vid Hägersten.

Bergnivån tolkas vid hastigheten 2500 m/s, se Kapitel 3.2.3, och är inritad med en rosa linje, se Figur 42.



Figur 42 - Resultatet för refraktionsseismik-undersökningen med en tolkad bergnivå, Hägersten.

Enligt resultatet så har mätningarna god täckning längs med seismikprofilen.

6.2.3 Referensdata

I området norr om Hägersten har flera sonderingar gjorts i förundersökningssyfte till Stockholm Vattens projekt. Tre av dessa sonderingar ligger tillräckligt nära undersökningslinjen för att kunna användas som referensdata och ha representativa värden på bergnivån. Position, avvikelse från mätlinjen och bergnivå för dessa tre sonderingar presenteras i Tabell 6.

Tabell 6 – Sonderingar vid Hägersten med en position längs med undersökningslinjen [meter].

Position	Beteckning	Bergnivå	Avstånd från mätlinjen
245.5	13W23	-23.814	9.9
260.3	13W22	-29.182	12.5
458.6	13W27	-48.617	1.6

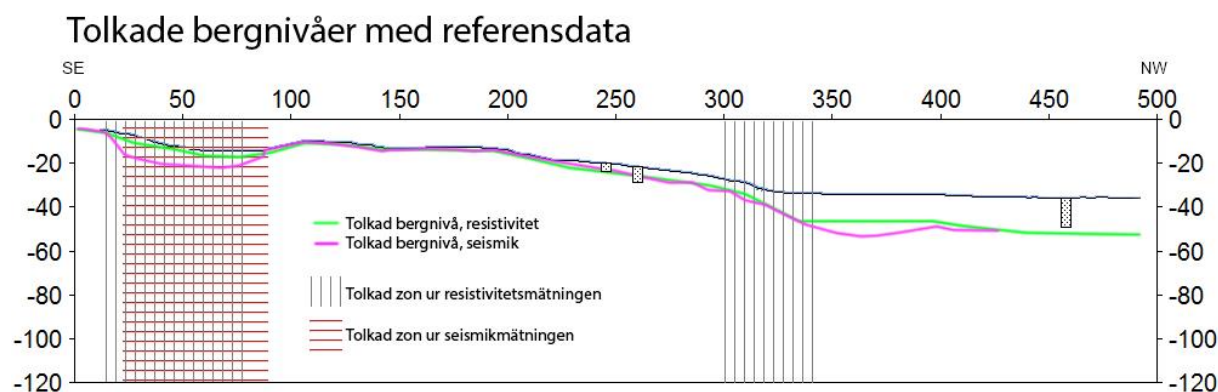
Referensdata är inritad längs med undersökningslinjen i Figur 43. Markeringarnas djup representerar bergnivåtolkningen utifrån de gjorda sonderingarna.

6.2.4 Jämförelse

Under utförandet av fältarbetet observerades två rör som gick från strandkanten ut i vattnet vid undersökningslinjen, se Figur 27 där rören är inritade i översiktsskissen för undersökningslinjen. Rören är vattenledningar och sammanfaller med undersökningslinjen vid sträckningen 50 meter, där en anomali kan ses i både resistivetssektionen och seismikresultatet. Mätningarna kan ha påverkats av rören och skapat en artefakt. Utseendet för denna artefakt från rören är svårt att förutse då varken storlek, exakt position eller materialtyp för rören är kända. En störning från rören hade dock inte påverkat seismikresultatet i den utsträckning som resultatet visar. Mer troligt är att anomalin kan vara en effekt av den väntade svaghetszonen som visas i Figur 28, detta då anomalin har en stor utbredning och syns tydlig i båda resultaten. Vid fältarbetet fastnade kablarna på botten i detta område och en del sprängsten observerades.

Den högresistiva strukturen mellan 90 – 270 m i resistivetsresultatet sammanfaller med området med högre hastigheter i seismikresultatet. Detta tyder på att bergytan

borde ligga på djupet som i princip följer botten. Se Figur 43 för en jämförelse av bergnivåerna mellan resistivitet, seismik och referensdata. Tolkningarna av bergytan ligger ungefär på samma nivå för de olika mätningarna. Tolkningen för seismiken har dock en tendens att ligga på något djupare nivå på enstaka ställen längs med linjen. En möjlighet till dessa skillnader är moränfickor eller en kraftigt uppsprucken bergyta. Dessa fickor skulle kunna visa på lägre hastigheter än den fasta berggrunden och samtidigt visa en hög resistivitet, se Figur 10 och Tabell 3 i kapitel 0. Teorin styrks av jordartskartan, Figur 23, som visar att moränfickor förekommer i området.



Figur 43 - Jämförelse av de tolkade bergnivåerna och intressanta zoner för resistivitet, refraktionsseismik och referensdata för undersökningslinjen vid Hägersten.

6.3 Finnboda-Biskopsudden

Vid Finnboda-Biskopsudden utfördes mätningar med både resistivitet och refraktionsseismik. På platsen finns även flera sonderingar från den förundersökning som gjordes i samband med projektet Östlig Förbindelse 1994.

6.3.1 Resistivitet

Den uppmätta och den använda vattenresistiviteten för området redovisas i nedanstående diagram. Resistiviteten varierar med djupet och därför används olika vattenresistivitet fördelat på tre olika vattenlager, se Diagram 6.

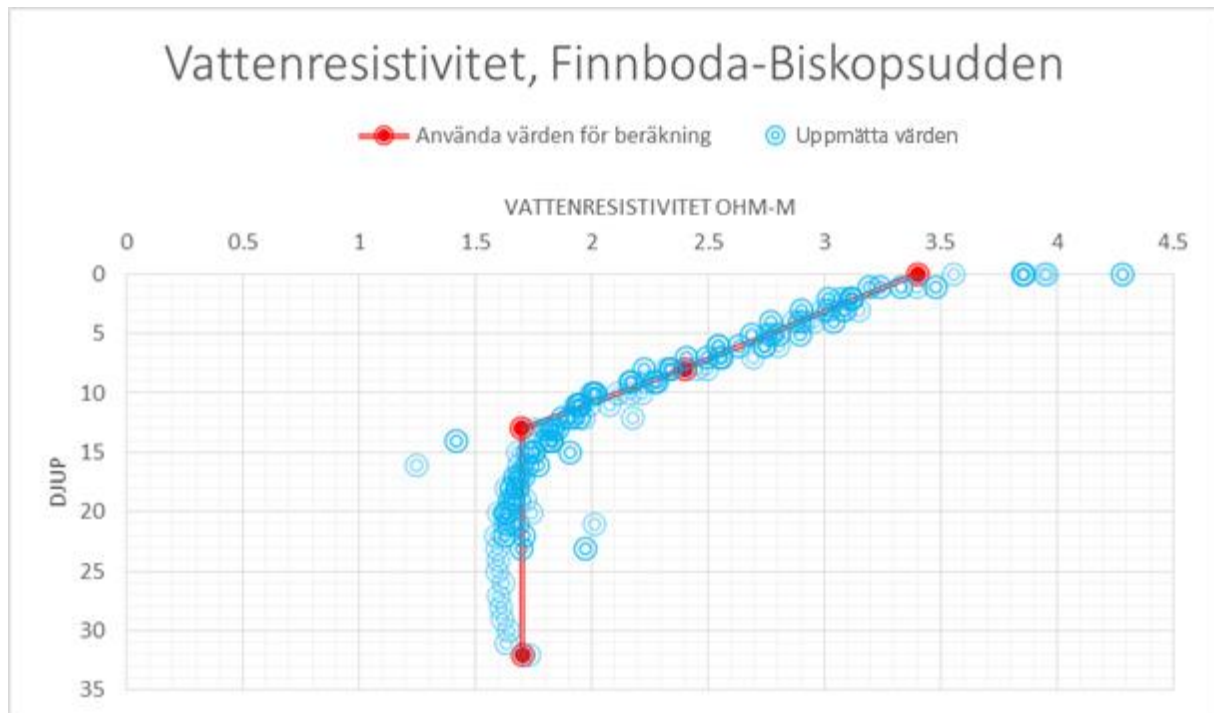
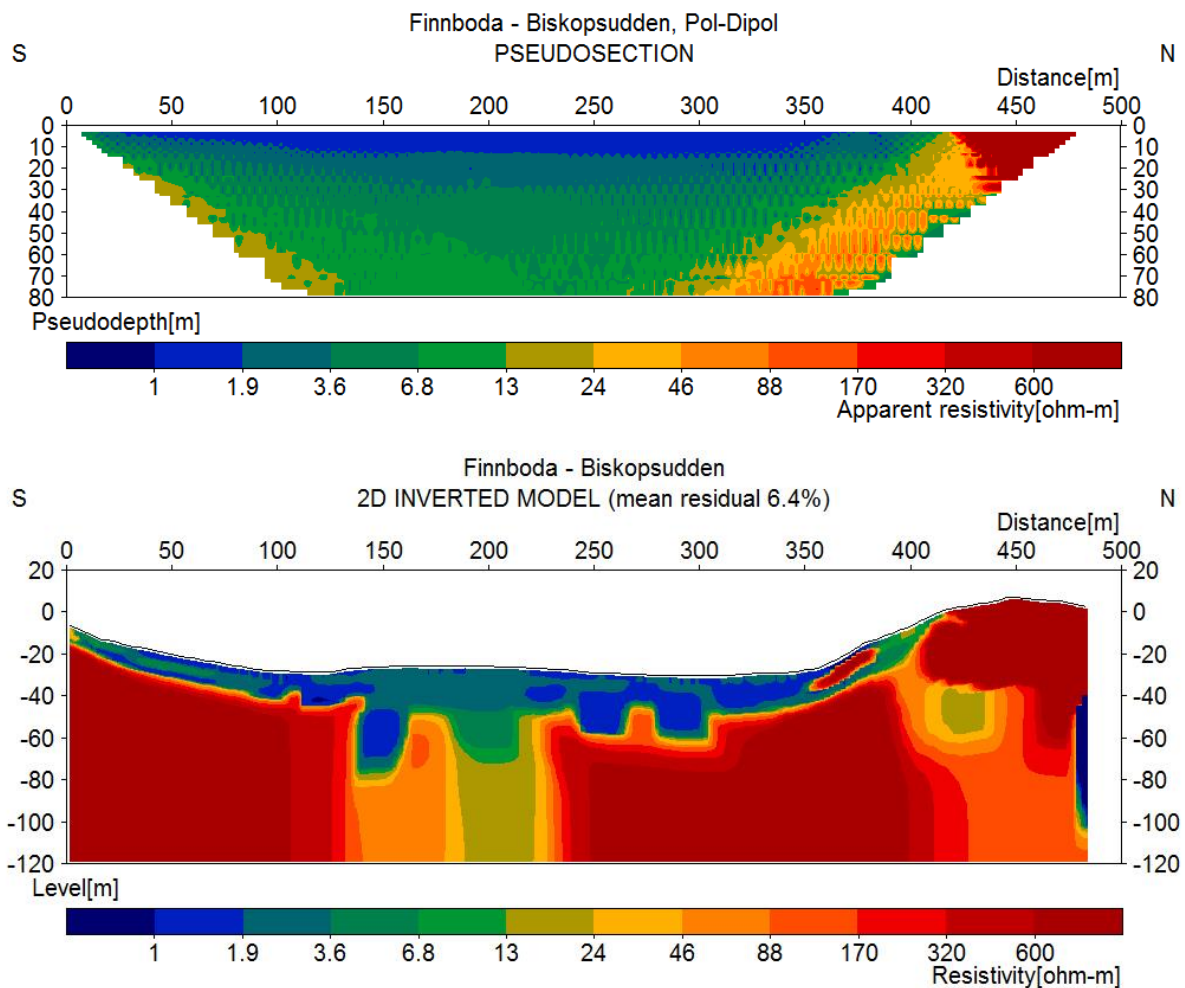


Diagram 6 - Vattenresistivitet Finnboda-Biskopsudden

Resistivetsmätningarna vid Finnboda-Biskopsudden utfördes nattetid. Först gjordes en multipel gradientmätning och sedan en pol-dipol-mätning. Ett operatörmisstag som gjordes i samband med mätningen av den multipla gradienten gör att resultatet från denna inte går att använda. Resultatet från pol-dipol-mätningarna presenteras i Figur 44. Fjärrelektrodens placering var 3080 meter öster om mätlinjen.

Pseudosektionen från pol-dipol konfigurationen, i Figur 44, har djupet 80 meter och den justerade sektionen över resultatet, i Figur 45, är anpassad till denna. Även denna sektion är justerad med avseende på pseudosektionen och sämre täckning vid undersökningslinjens ändar. I den norra delen av undersökningslinjen trimmas även en osannolik struktur med låga resistiviteter bort.



Figur 44 - Resistivetssektion baserad på data från pol-dipol-mätning för linjen Finnaboda - Biskopsudden.

6.3.2 Seismik

Resultatet från refraktionsseismiken fick tyvärr alltför dålig kvalitet för att kunna användas. Detta berodde antagligen på de gasfyllda bottensedimenten som dämpade signalen från sprängladdningen. Trots att mätningarna utfördes nattetid och att mängden sprängmedel ökades blev signalen för svag och kunde inte ses igenom bakgrundsbruset i insamlad rådata.

6.3.3 Referensdata

Geoteknisk referensdata i form av JB- och CPT-sonderingar har lagts in i sektionen, i Figur 45, och visar antagen bergnivå. Sonderingarna och bergnivåtolkningarna är utförda år 1994 av VBB Viak (Öhrner, 1994). Samtliga sonderingar som är ljusst markerade har drivits minst tre meter ner i det förmodade berget medan de mörkt markerade klassas som "Sondering till förmodad fast botten, d.v.s. sonden kan inte med normalt förfarande utan svårighet drivas ned ytterligare" (SGF, 2001). I Tabell 7 presenteras information om referensdata som finns längs med undersökningslinjen.

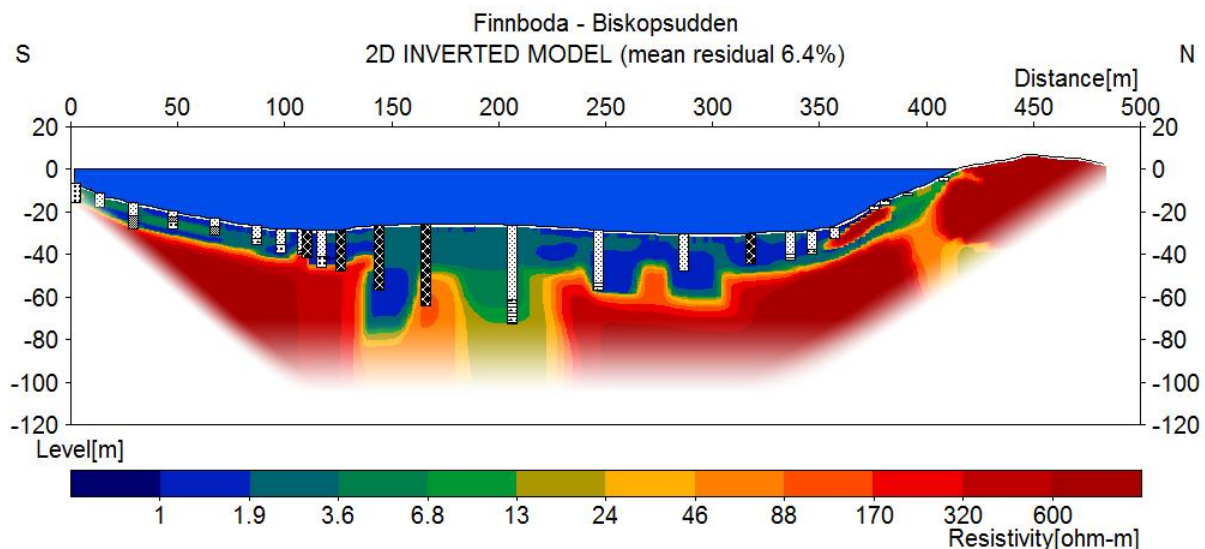
Tabell 7 - Referensdata i form av 24 sonderingar för undersökningslinjen Finnboda-Biskopsudden

Position	Beteckning	Bergnivå	Avstånd från mätlinjen
1.9	215A	-16.8	-0.1
12.9	217A	-19.6	-0.9
28.8	219A	-28.4	0
47	221	-27.6	0
67	223	-31.8	-0.3
86.4	201	-36.5	-0.9
97.6	203	-40.3	-0.7
108	205	-41.8	0.6
109.9	113	-43.4	0.3
116.8	207	-47.5	-0.9
126	101	-48.7	-0.4
144	1031	-57.5	-2.3
165.5	103	-64.3	-0.8
205.9	105	-72.8	-1.5
246.5	107	-58	-1
286.6	109	-48.8	-1.1
318.1	111	-45.3	-0.2
336.6	209	-43.6	-1.8
346.7	211	-41.2	-2.4
357.4	11	-34.6	0.8
375.8	10	-15	0.9
380.8	225	-13.5	-1
391.3	227	-8.6	-0.7
408.3	229	-0.5	-1.5

6.3.4 Jämförelse och diskussion

På grund av oanvändbar data från seismik- och den multipla gradientundersökningen jämförs och diskuteras endast pol-dipolresultatet tillsammans med referensdata.

Då pol-dipolresultatet har många svårtolkade zoner är det svårt att anta en bergnivå. En generell tolkning av resultatet kan läsas nedan och i Figur 45 syns sonderingarna resultat redovisat i resistivitetssektionen.



Figur 45 - Resistivetssektion baserad på pol-dipol-data med tolkade bergnivåer för linjen Finnroda-Biskopsudden. Ljusa sonderingar har drivits minst 3m i förmodat berg medan de mörka klassas som "Sondering till förmodat fast botten, d.v.s. sonden kan inte med normalt förfarande utan svårighet drivas ned ytterligare" (SGF, 2001)

Figur 45 visar resultatet från pol-dipol-mätningen tillsammans med referensdata för undersökningslinjen. En tolkning av resistivetsresultatet och sonderingarna görs nedan.

Vid en första anblick kan en möjlig svaghetszon ses vid 200 m. Denna styrks även av den geotekniska undersökning som gjorts i området. De tidigare undersökningarna gjorda av VBB Viak 1994 klassade området vid 200 m som: "Krosszon i berg, långsträckt, bred med framträdande struktur i landskapet" (Öhrner, 1994). Utbredningen av den möjliga krosszonen kan sträcka sig från 130 till 225 m, men som nästa stycke förklarar är tolkningarna kring området 150 m mycket osäkra.

Vid 150, 200, 250 och 300 meter syns ett par annorlunda strukturer. Samtliga områden visar på resistiviteter strax under 2 Ohm-meter vilket anses som mycket låga värden. Strukturen på områdena är anmärkningsvärd då de visar på mycket skarpa och kantiga övergångar. En tänkbar förklaring skulle kunna vara att de beror på metallobjekt på eller i sjöbotten, t.ex. foderrör som lämnats kvar efter tidigare borrhiningar. Det är även känt att fyllningsmassor blivit dumpade på platsen och det är inte omöjligt att metallobjekt följt med. Dessa elektriskt ledande föremål skulle kunna ge störningar i data och resultera i svårtydda strukturer. En annan teori är att fossilt saltvatten finns i området. Det är sen tidigare känt att det förekommer fossilt saltvatten i Stockholmsområdet (Johansson, 1993) och det salta vattnet skulle kunna ge utslag på låga resistiviteter men borde inte ge strukturer som syns i Figur 45.

Vid 350-400 meter syns en fyragerföljd med varierande högresistiva och lågresistiva områden. Det kan röra sig om sprängstensfyllning men samtliga sonderingar motsäger detta genom att visa på förmodat berg bara några meter under havsbotten. Störningar eller 3D-effekter är heller inte omöjliga men mycket svåra att identifiera. En sådan effekt kan uppstå om det finns områden med lägre resistivitet vid sidan av undersökningslinjen. Då strömmen följer minsta motståndets lag kan denna avvika från linjen om förhållandena är mer konduktiva där. En annan möjlig 3D-effekt syns

vid området 420 m på 50 meters djup, alternativt kan detta även vara en svaghetszon.

Kort sagt är pol-dipolresultatet svårtytt och utan stöd från varken gradientmätningen eller seismikmätningen är det mycket svårt att tolka bergets nivå och kvalitet. Resultaten från referensdata överensstämmer ibland med övergången från låg till högresistivt, som pol-dipol visar, men ibland är den avvikande. Områdena som är diskuterade ovan gör det svårt att göra en bra jämförelse mellan den givna informationen från sonderingarna och pol-dipol-mätningen.

6.4 Kvarnholmen-Blockhusudden

Vid Kvarnholmen-Blockhusudden genomfördes både resistivitet- och seismikmätningar.

6.4.1 Resistivitet

Den uppmätta och den använda vattenresistiviteten för området redovisas i nedanstående diagram. Vattenresistiviteten har mätts på olika punkter längs med undersökningslinjen och utvärderas sedan tillsammans för att få ett så bra värde som möjligt för området. Resistiviteten delas in i olika vattenlager då den varierar med djupet.

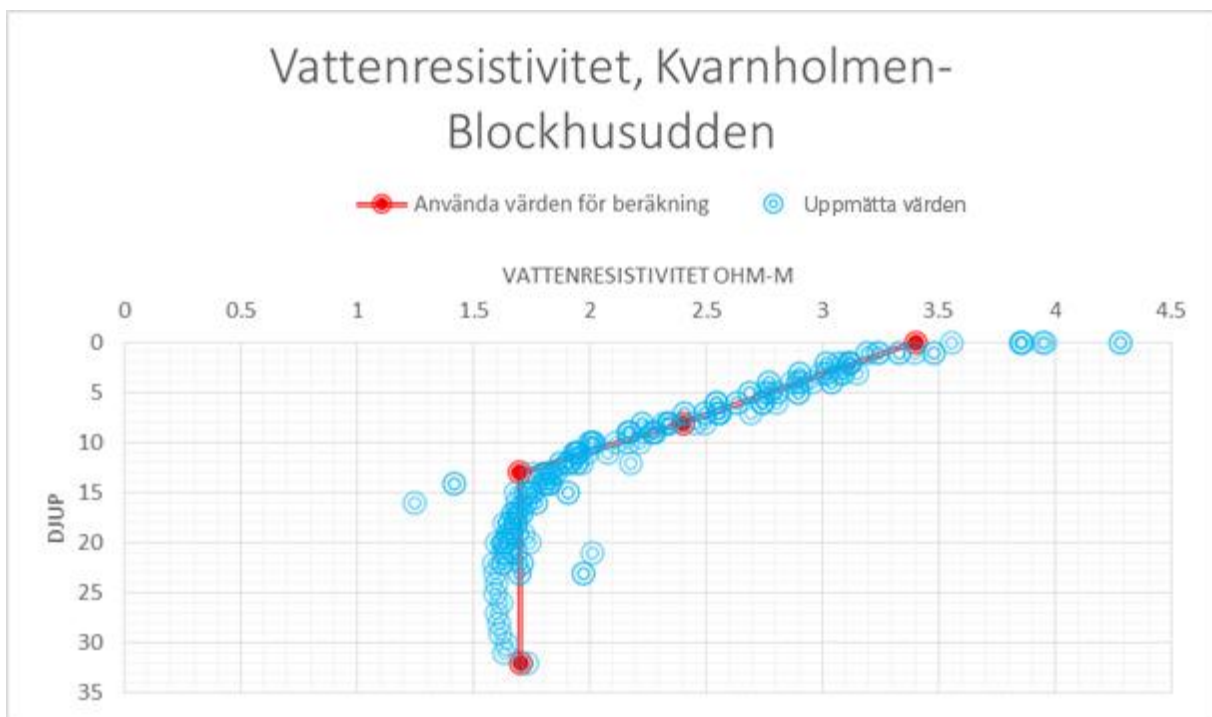
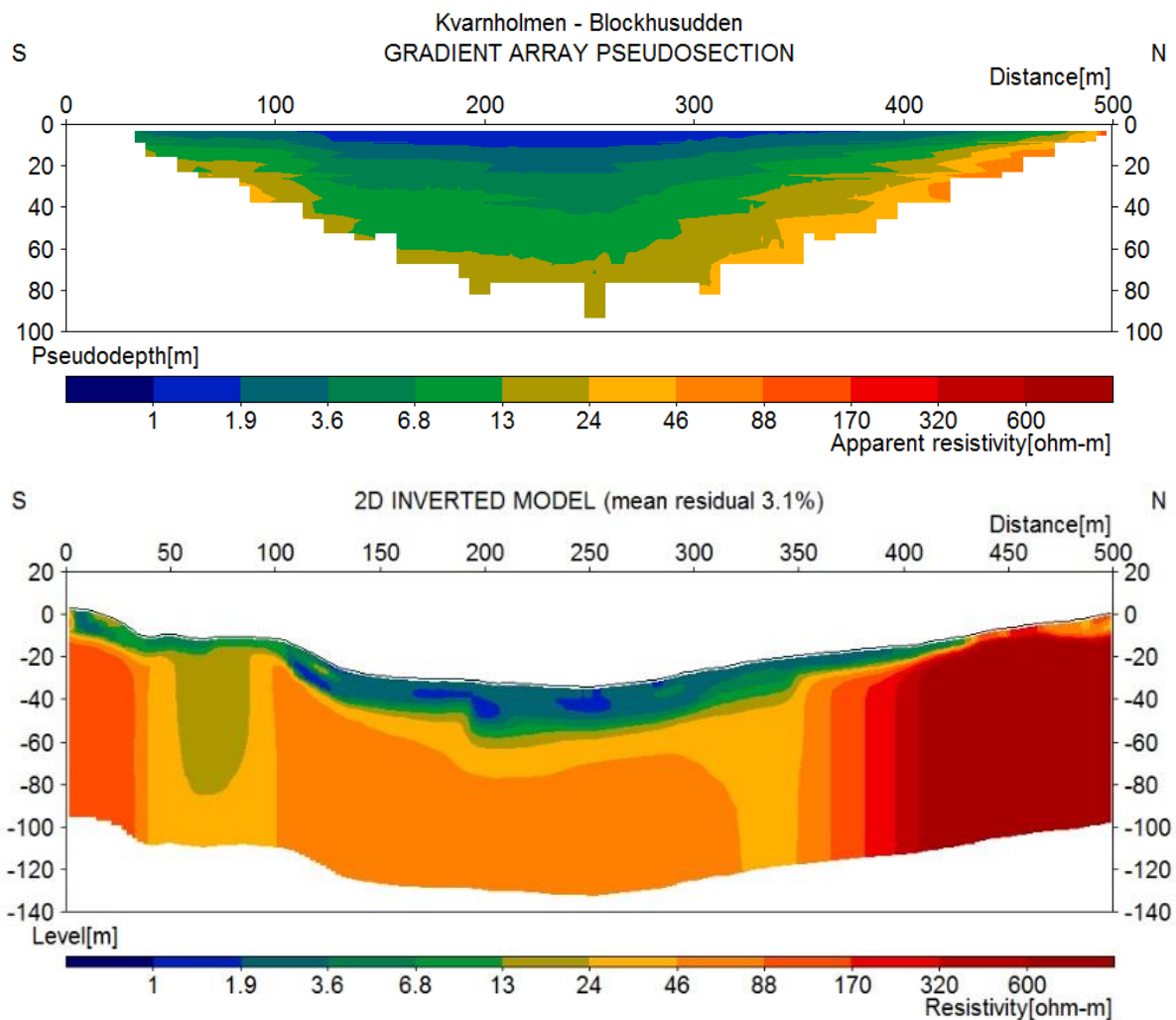


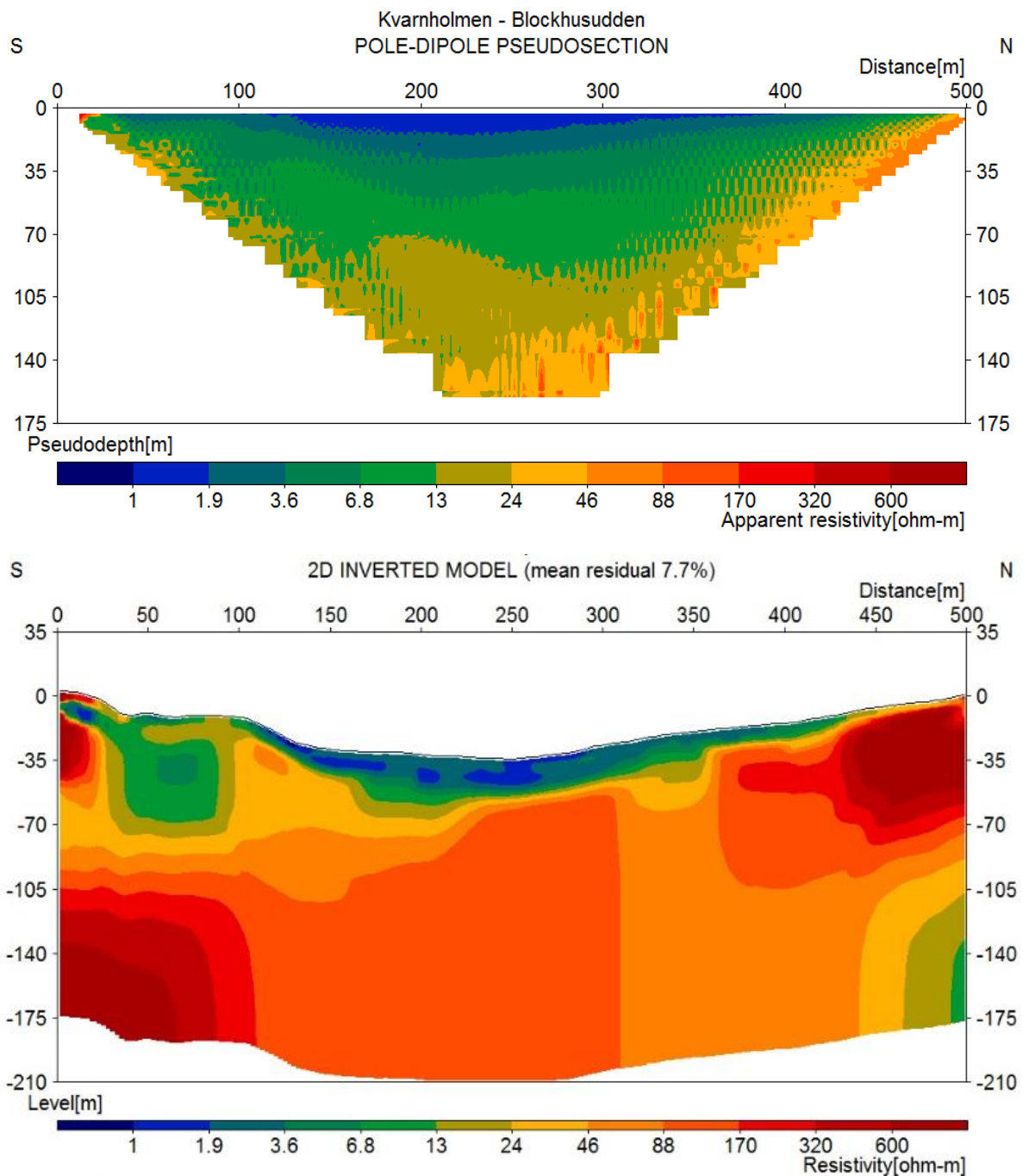
Diagram 7 - Vattenresistivitet, Kvarnholmen-Blockhusudden

Resistivitetmätningarna utfördes med både multipel gradientkonfiguration och pol-dipol. Vid pol-dipol var fjärrelektroden placerad 1700 meter öster om mätlinjen. Mätningarna med båda konfigurationerna utfördes nattetid. Resultatet från multipel gradient visas i Figur 46 och det från pol-dipol visas i Figur 47.



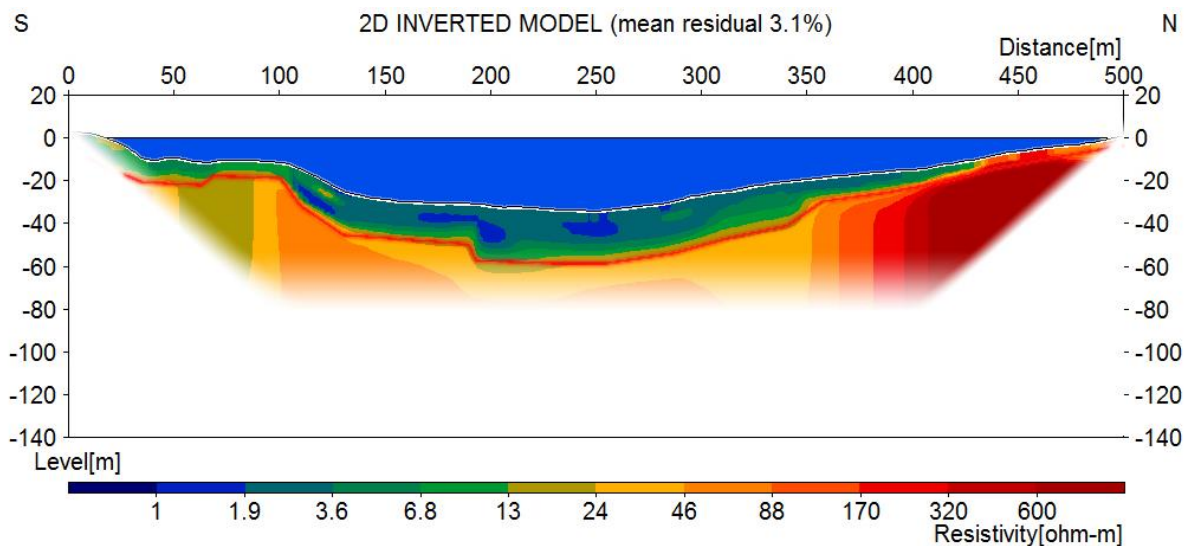
Figur 46 – Resistivitssektion baserad på data från multipel gradient-mätning för linjen Kvarnholmen–Blockhusudden.

Pseudosektionen för multipel gradientmätningen går till ett djup på 80 meter och pol-dipol till djupet 140 meter. Sektionen för multipel gradientmätningen är trimmad så att tendenserna för de verkliga geologiska strukturerna kan tolkas medan information utan troligt innehåll har tagits bort, bland annat med hjälp av avgränsning från pseudosektionen med djup och form. Osannolika geologiska strukturer som de vertikala i figurerna diskuteras i kapitel 7. Pol-dipol sektionen har en möjlig 3d-effekt på djupet 100-175 meter vid norra ändan av utlägget, denna kommer troligtvis från en "ospecificerad" deformationszon i närheten (läs om denna i kapitel 4.5). Den södra delen av undersökningslinjen visar dock på en högresistiv struktur som befinner sig i ett område med låg datatäckning. Dessa två strukturer trimmas bort i sektionerna och djupet reduceras med stöd från pseudosektionen, detta för att skapa en mer trovärdig resistivitssektion av resultatet.

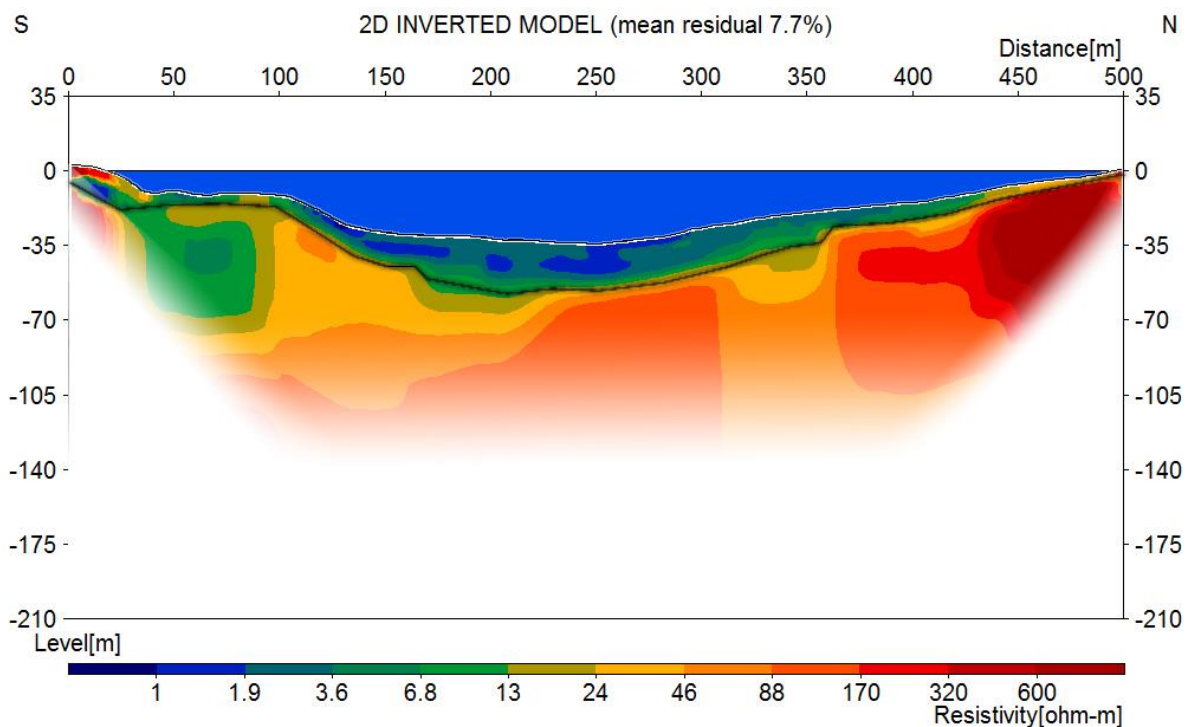


Figur 47 – Resistivetssektion baserad på data från pol-dipol-mätning för linjen Kvarnholmen–Blockhusudden.

Nivån till berg är antagen för både gradientmätningen och pol-dipol-mätningen och antas ligga på ungefär -55 m på djupaste stället. I Figur 48 och Figur 49 är den antagna bergnivån inritad som en linje i färgen röd för multipelgradientmätningen och svart för pol-dipol-mätningen. Båda resultaten visar på ungefär samma bergnivå, med en avvikelse vid området kring sträckningarna 120 m samt 175 m.



Figur 48 – Resistivitssektion baserad på multipel gradientdata med tolkade bergnivåer för linjen Kvarnholmen–Blockhusudden.



Figur 49 – Resistivitssektion baserad på pol-dipol data med tolkade bergnivåer för linjen Kvarnholmen–Blockhusudden.

Vid en jämförelse av resistivitsundersökningarna visar både gradient- och pol-dipol-sektionerna ett område med lägre resistivitet i söder, vid 20-95 m, och en antydning att det är en anomali vid sträckningen 300-350 m.

Vid sträckningen 155-215 m i pol-dipol-resultatet finns en antydning till ett område med lägre resistivitet, se Figur 49. Även i gradientmodellen syns en avvikelse i form av en plötslig förändring i den tolkade bergnivån. Anledningen till att gradientmätningen skiljer sig från pol-dipol-mätningen i detta område kan bero på sämre

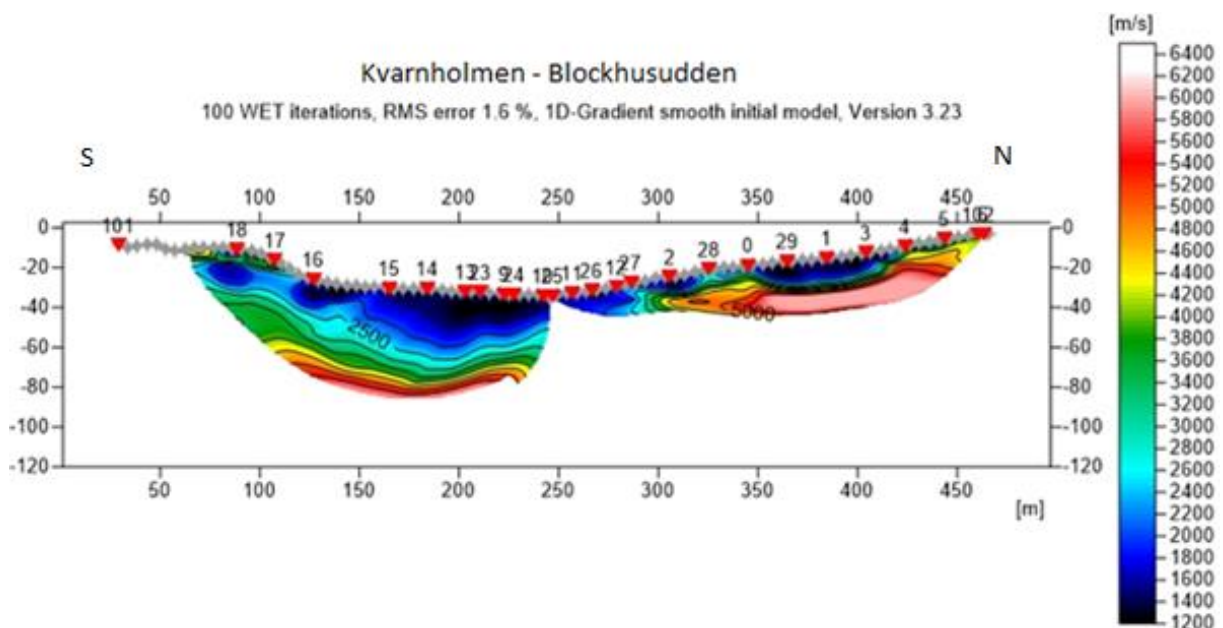
djupnedträngning på grund av det överliggande konduktiva lagret och dess mäktighet.

6.4.2 Seismik

Refraktionsseismiken utfördes med två stycken utlägg med ett planerat överlapp på 25 m. På grund av att tre hydrofoner i slutet av kabeln inte fungerade som de skulle blev det istället ett glapp mellan utläggerna på ca 5 m. Detta medför en ökad osäkerhet i resultatet i detta område.

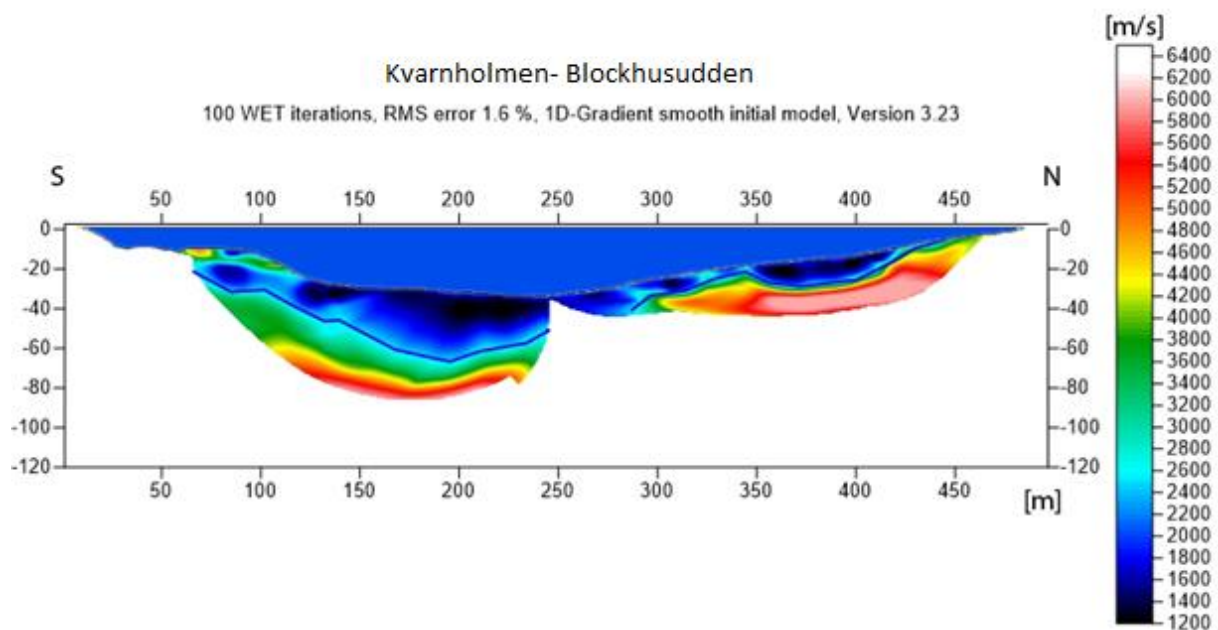
Figur 50 visar resultaten av refraktionsseismik-mätningarna för Kvarnholmen-Blockhusudden. Processeringen utfördes med seismisk tomografi och resultaten består av en profil med framtagna P-vågshastigheter längs undersökningslinjen.

Kvaliteten på seismikdata är högst varierande med en del bra data, speciellt nära skottpunkterna och på grundare vattendjup, och en del dålig data, framförallt i de djupa delarna av profilen. Anledningen till dålig data är sannolikt gasfyllda sediment som dämpar signalen kraftigt. På grund av den svaga signalen så påverkas data också av störningar, även om dessa är förhållandevis små då mätningarna utfördes nattetid. Trots bitvis dålig data har det gått att tolka en refrakterad signal för i stort sett hela datasetet vilket medför att bergnivå och bergkvalitet kan tolkas. Det skall dock noteras att den bitvis ringa datakvaliteten ökar osäkerheten i tolkningen.



Figur 50 - Sektion över tryckvågshastighet baserad på refraktionsseismiktomografi för linjen Kvarnholmen-Blockhusudden.

Av erfarenhet från tidigare projekt, i liknande geologisk miljö, brukar berg definieras vid hastigheten 2500 m/s, se kapitel 3.2.3, vilket motsvarar den turkosa färgen i Figur 50. Från mätningarna kan bergytans lägsta nivå tolkas till ungefär -65 m, i Figur 51 är den tolkade bergnivån markerad med en blå linje. Det skall noteras att detta är en osäker tolkning. Genom jämförelse med tolkningen av resistivitetdata kan säkerheten ökas, men det som framförallt behövs för kalibrering och verifikation är information från referensdata i form av geoteknisk borrhinformation.



Figur 51 – Refraktionsseismik hastighetssektion med tolkad bergnivå för linjen Kvarnholmen–Blockhusudden.

Bergnivån varierar en del längs med undersökningslinjen. I den södra delen ligger berget djupare än i den norra delen av sträckningen. Undersökningen gjordes med två utlägg av seismikurustningen och det nordliga utlägget känns något mer osäkert än det sydliga. För att kunna bekräfta bergnivåerna och utvärdera osäkerheten behövs referensdata (sonderingar).

Anmärkningsvärt är den låga hastigheten i sedimentlagret som i vissa delar underskrider vattenhastigheten. Detta tyder på att gas eller någon annan dämpande effekt förekommer, vilket även observerades i fält.

Nedan analyseras resultatet från refraktionsseismiken så att informationen sedan kan jämföras med resistivitetsresultatet.

Från 0 till 50 m saknas datatäckning och ingen tolkning av bergnivå kan göras här. Skälet till avsaknad av datatäckning är att inga detonationer kunde utföras då kabeln till fjärrelektroden för resistivitetsmätningen korsade mätlinjen. En restriktion från Sjöfartsverket bidrog även då inga skott fick skjutas nära land.

Från 50 till 120 m syns en trelagerföljd med hög hastighet längst ner, låg hastighet ovan detta och därefter återigen hög hastighet i sjöbotten. På tolkningsmöte med TRV¹¹ har det diskuterats om de höga hastigheterna i sjöbotten kan bero på sprängstensfyllning. I sådana fall tolkas låghastighetslagret som naturlig jord/sediment och berg återfinns på djupet ca -30 m på denna sträcka.

Från 175-240 m syns en normal tvålagerföljd med höga hastigheter i botten på över 5500 m/s. Bergytans nivå tolkas i detta område att ligga mellan -50 m till -66 m. Vid 195 m finns den lägsta antagna bergnivån för profilen vilket är -66 m.

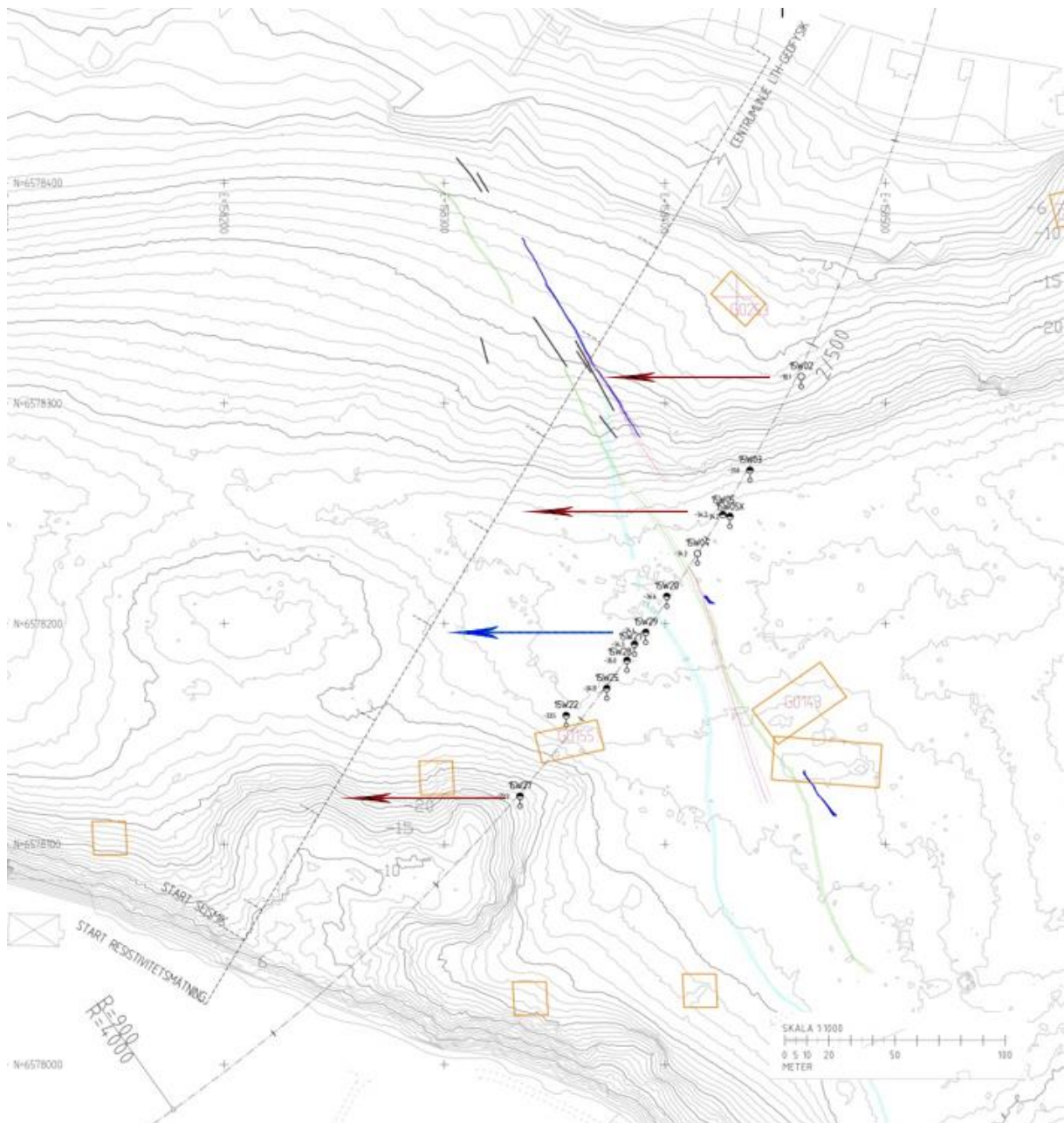
¹¹ Tolkningsmöte med Trafikverket Stockholm, den 3 november 2015 kl. 08:00

Vid området 240-300 m saknas täckning i data och bergnivån i detta område har därför inte tolkats. Den dåliga täckningen beror dels på en felbedömning i överlappning av de två seismik-utlägggen och förklaras tidigare i detta kapitel. En annan anledning till att det inte finns information om berg i området är att ingen refrakterad våg kunde ses, utan endast direktvåg. Detta tyder på att djupet till material med högre hastighet är alltför stort och den refrakterande vågen inte hinner anlända före direktvågen. Detta kan betyda att en svaghetszon finns lokaliserad i området, men då det inte finns tillräcklig refraktortäckning över denna förblir den oviss.

Från 300-465 m syns en normal tvålagerföljd med höga hastigheter i botten över 5500 m/s. Bergytans nivå tolkas i detta område mellan 0 m till -30 m.

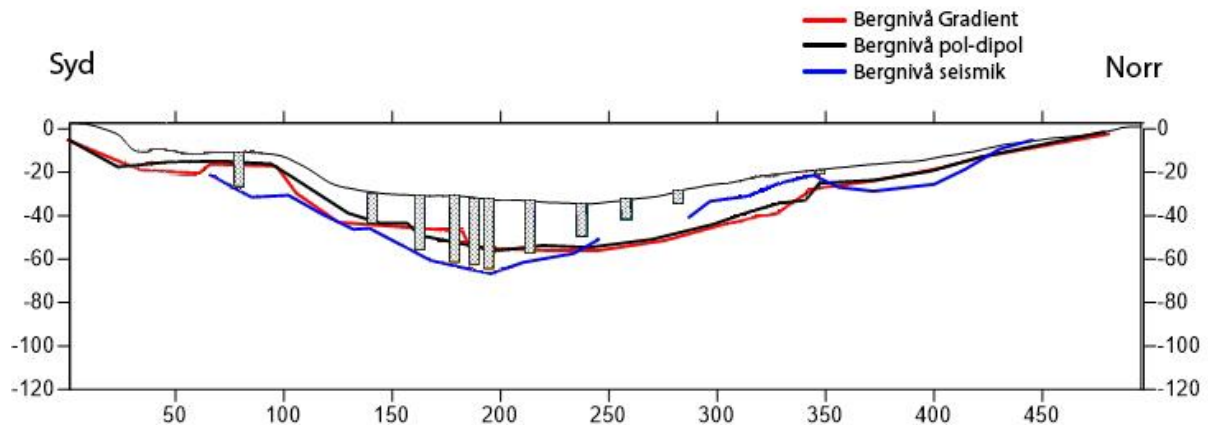
6.4.3 Referensdata

Längs den planerade tunneldragningen har elva sonderingar gjorts för att ta reda på bergnivån. Då den geofysiska undersökningslinjen ligger upp till 90 meter väster om tunneldragningen anses sonderingarna vara alltför avlägsna för att ingå i en detaljerad jämförelse. I Figur 52 redovisas sonderingarnas läge gentemot den geofysiska undersökningslinjen. För att jämföra sonderingarna med geofysikresultaten har sonderingarnas resultat passats in längs den geofysiska undersökningslinjen. Detta gjordes genom att passa de två lägsta bergnivåerna, den från geofysiken och den från sonderingarna, så att de överlappar varandra. Förflyttningen av sonderingarna följer längs med sundet och ungefär rakt öst till väst, till geofysik-undersökningslinjen. Det är endast positionerna på sonderingarna har ändrats, inte den tolkade bergnivån. Förflyttningen illustreras som pilar i Figur 52, där förflyttningen av den lägsta bergnivån är markerad som en blå pil.



Figur 52 - Karta över sonderingar för området Kvarnholmen – Blockhusudden

Figur 53 visar den tolkade bergnivån från både geofysikmätningarna och sonderingarna. Resultaten överensstämmer väl och visar på liknande strukturer. Dock kommer ingen vidare utvärdering göras och resultatet kommer inte tas med i slutresultatet på grund av att avståndet mellan undersökningslinjen och sonderingarna är för stort.



Figur 53 - Jämförselektion med resistivitet, seismik samt sonderingar. Observera att sonderingarna är belägna cirka 70 till 90 meter öster om undersökningslinjen.

6.4.4 Jämförelse

Nivån för bergets lägsta punkt har antagits till -55 m för resistiviteten och -66 m för seismiken, se Figur 54.

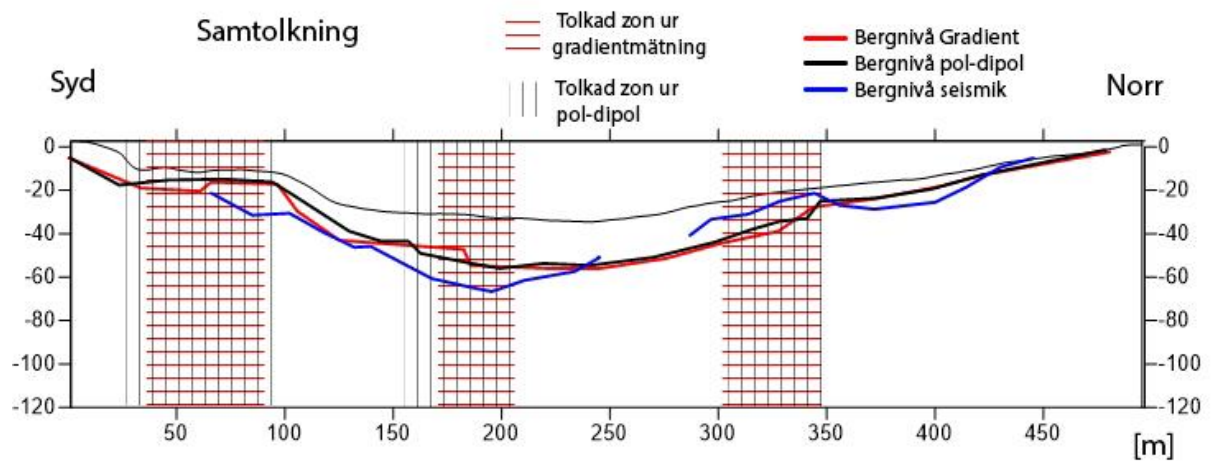
Båda resistivitetmetoderna antyder en möjlig svaghetszon vid 25-95 m. Seismikresultatet täcker inte detta område.

Vid 50-120 m förekommer det en trelagersföljd med hastighetsinversion¹² i seismikresultatet. Detta kan vara resultatet av att sprängsten har lagts på platsen. Resultatet från resistivitetmätningarna visar inga tydliga tecken på detta. En förklaring kan vara att signalen rör sig i det matrix av sediment och saltvatten mellan sprängstenarna.

Vid området 155-215 m syns ett område med lägre resistivitet i pol-dipolmätningen samt en plötslig förändring i den tolkade bergnivån för gradientmätningen. Tolkningen för bergnivån utifrån seismikresultatet skiljer sig från den från resistivitetstolkningen. Då partiet är svårtolkat och innehåller den lägsta tolkade bergnivån är det intressant för fortsatt utredning.

Från 300 m till 350 m visar båda resistivitetsresultaten på en möjlig svaghetszon. Viss antydning till detta kan även ses i seismikresultatet då hastigheterna börjar tillta vid 350m, men den ringa datatäckningen gör att området är svårtolkat.

¹² Lägre seismiska hastigheter förekommer under ett lager med högre hastighet.

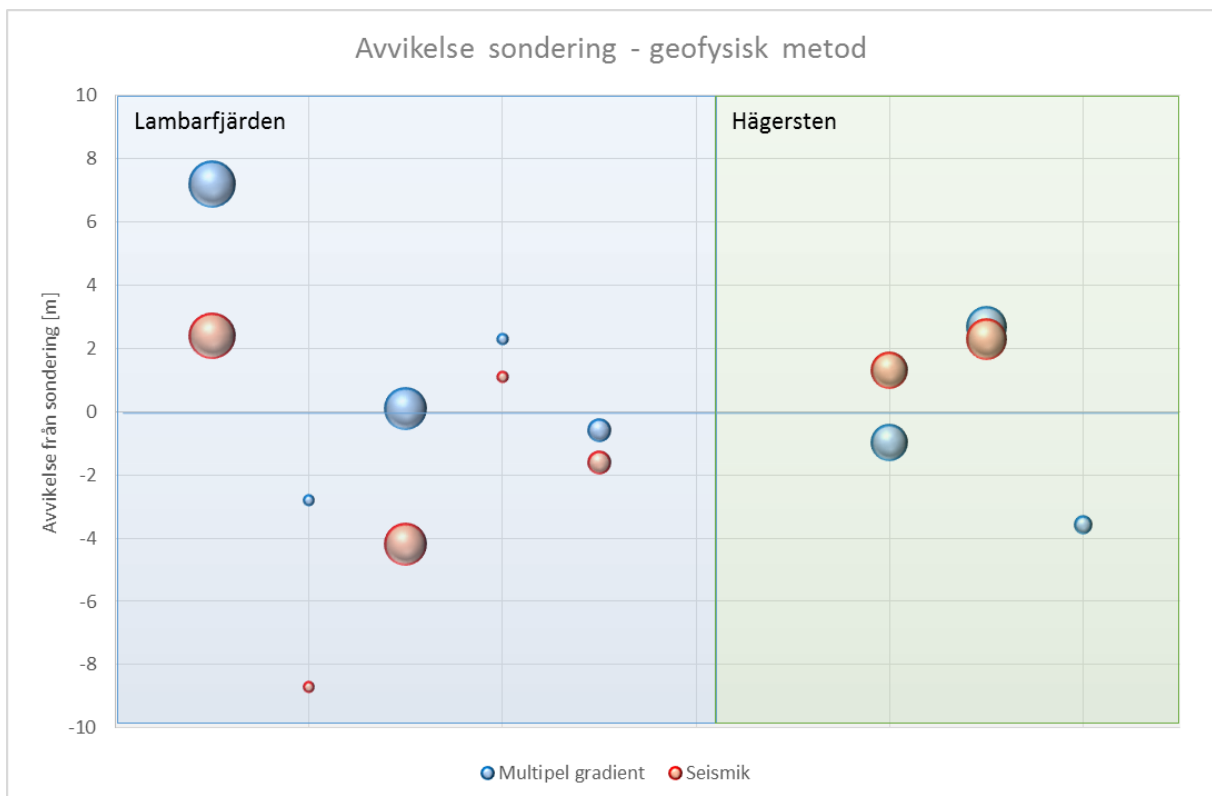


Figur 54 – Tolkade bergnivåer samt möjliga svaghetszoner för linjen Kvarnholmen–Blockhusudden.

7 Diskussion

Efter att ha tolkat de fyra undersökningslinjerna separat med vardera mätmetod utvärderas nu de framtagna resultaten tillsammans. En jämförelse av mätmetoderna och de gjorda sonderingarna, "verkligheten", finns i Figur 55 och Figur 56. Figurerna visar avvikelserna i bergnivåtolkningen mellan sondering och mätmetod samt avvikelserna i bergnivåtolkningen mellan de geofysiska mätmetoderna.

Avståndet mellan sonderingarna och undersökningslinjen presenteras i tabeller som hittas i kapitel 6 om resultatet för vardera undersökningslinje. En sammanställning av sonderingarna finns även som bilaga i kapitel 11.5. I Figur 55 är avvikelserna i bergnivå, från sonderingen till de olika metoderna, presenterade på y-axeln där värdet noll representerar bergnivåtolkningen från sonderingen. Information finns endast från Lambarfjärden och Hägersten i Mälaren, då undersökningslinjen vid Finnroda-Biskopsudden fick dåliga mätresultat och då det inte finns någon användbar referensdata för Kvarnholmen-Blockhusudden. Resultatet i diagrammet visar en spridning av resistivitet-bergnivåtolkningen mellan 7 till -4 meter och för refraktionsseismiken mellan 3 till -9 meter jämfört med sonderingarna. Vid en jämförelse av bergnivåerna måste dock placeringen av sonderingarna jämfört med undersökningslinjerna för de båda metoderna tas till hänsyn. Detta avstånd från undersökningslinjen kan ses i diagrammet som storleken på kloten, ju större klotet är desto längre bort från undersökningslinjen ligger sonderingen.

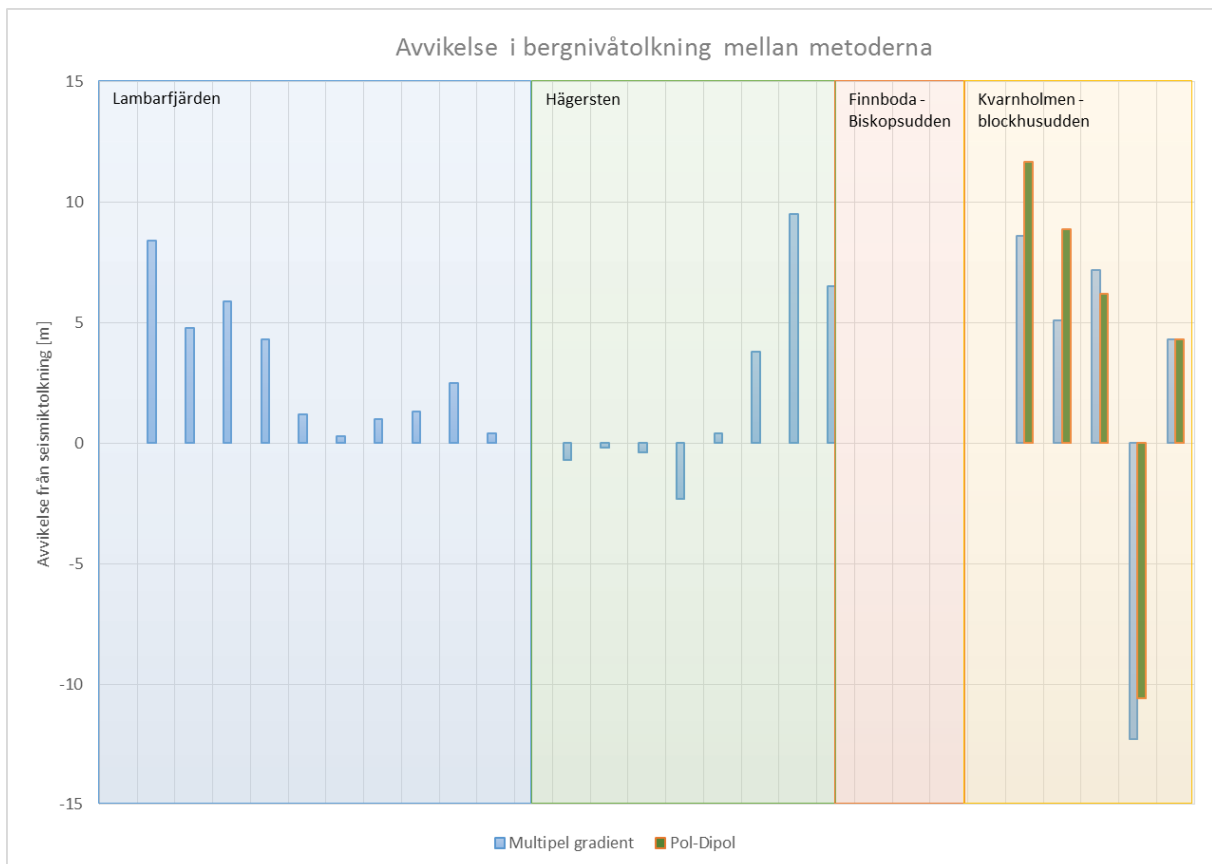


Figur 55 - Avvikelse i bergnivåtolkning mellan sondering och resistivitet respektive refraktionsseismik. Blåa klot representerar resistivitetstolkningarna och röda är tolkningar från refraktionsseismiken.

Diagrammet visar att bergnivåuppskattningen gjord från både seismik- och resistivitet-mätningarna ger ett bra värde på bergnivå även om det är en viss

spridning. Jämförelse har även gjorts med hänsyn till djupet på sedimentlagret, detta för att se om det finns en större avvikelse och osäkerhet beroende på om bergytan ligger på en djupare eller grundare nivå. Jämförelsen redovisas inte då resultatet inte visade något samband. Resultatet är oväntat då ett större mätdjup ger sämre upplösning och därmed sämre uppskattning av bergnivån, anledningen kan vara de knappa antalet punkter vilket gör resultatet osäkert.

I Figur 56 redovisas skillnaden mellan den tolkade bergnivån för de olika geofysiska metoderna. Värdet noll på y-axel representerar seismiktolkningen av bergnivån och längden av pelarna avvikelsen från denna. En positiv stapel betyder att tolkningen av resistiviteten gav ett grundare djup till berg, medan en negativ betyder motsatsen. Vid Lambarfjärden är den största differensen mellan multipel gradientmätning och seismik ca 8 meter och vid Hägersten nästan 10 meter. I och med att ingen bergnivåtolkning gjordes vid Finnboda-Biskopsudden redovisas inte denna i slutsatsen. Det var tre typer av mätningar som gjordes vid Kvarnholmen-Blockhusudden och mätningarna har en jämn spridning. Ju större spridning det är mellan punkterna i diagrammet desto osäkrare är resultatet.



Figur 56 - Avvikelse i bergnivåtolkning mellan resistivitet och refraktionsseismik. Blå staplar – avvikelse från multipel gradient till seismik, gröna staplar – avvikelse från pol-dipol till seismik. Positiva staplar visar ett lägre djup på tolkad bergnivå för resistiviteten gentemot seismiken.

Seismiktolkningen av bergnivån ser ut att ha en generellt djupare tolkning av bergnivån än vad resistivitetsmätningarna har vilket utläses som positiva staplar i diagrammet. Detta kan bero på morän eller uppsprucket berg som ger en lägre hastighet men fortfarande kan ge en hög resistivitet. Detta ger en lägre tolkning av

bergnivån för seismiken och en högre för resistiviteten. Hypotesen är trolig då vi vet från undersökning av områdets geologi att det finns både morän och betydande antal sprickzoner i området. Den stora spridningen i tolkad bergnivå från Kvarnholmen-Blockhusudden kan bero på att rådata för seismiken var svårtolkad på grund av att signalen dämpades av den gasfyllda sediment som finns i området. Kvaliteten på seismikresultatet beror på hur stor erfarenhet processeraren har av att plocka första ankomsttider. Med större störningar från området blir data mer svårtolkad och kvaliteten sänks på resultatet. Spridningen på avvikelserna från resistivetsmätningarna kan i sin tur bero på att mätningarna utfördes i saltvatten. Signalen för mätningen har då svårare att tränga ner på djupet då jonerna i vattnet skapar en högre konduktivitet som signalen dras till. Denna situation är svåranalyserad och programmet som använts kan få problem vid inversionen. En tydlig skillnad kan ses mellan sötvattenmätningarna (Lambarfjärden och Hägersten) och saltvattenmätningarna. Skillnaderna mellan de olika metoderna är konsekvent större för saltvattenmätningarna. Trots att undersökningslinjen Finnboda-Biskopsudden inte kan uppvisa något tolkningsbart resultat stärker faktumet att inget resultat kunde erhållas observationen att saltvattnet gör resistivetsmätningarna mer svårtolkade. Däremot påverkas inte seismikmätningarna av saltvattnet. Finns det däremot gasfyllda sediment i området hämmar det seismikresultatet. Vi rekommenderar därför att använda båda metoder vid komplicerade mätningar som dessa då de både kan stärka varandras tolkningar och öka chansen för en lyckad undersökning.

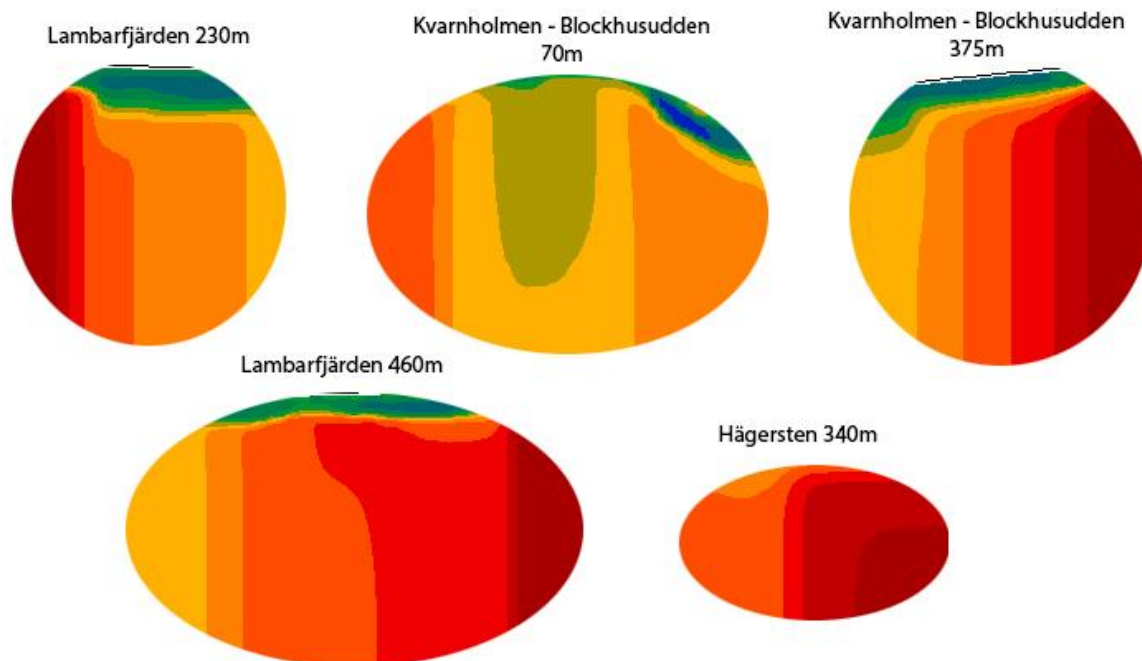
Seismikdata insamlad vid Hägersten var mer lättanalyserad än vid Saltsjön och hade tydligare förstaankomster i rådata. Detta beror troligtvis på att sedimenten inte var lika mäktiga och hade inte lika mycket gasinnehåll som dämpade signalen. Skillnaden i gasinnehåll syns tydligt i jämförelse mellan seismikresultaten i Saltsjön respektive Mälaren då hastigheter lägre än hastigheten för vatten (1450 m/s) indikerar på någon form av dämpande effekt. Området för Saltsjön är även mer centralt och det är troligt att detta bidrar till fler störningar i form av buller, speciellt då gasens dämpande effekt gör signalen svagare så att denna lättare störs. Det mer centrala läget bidrar även till att den elektriska aktiviteten påverkar resistivetsmätningarna (se kapitel 5 om störningar) så att inmätt data får störningsfel. Osäkerheten för seismik-resultatet vid de olika områdena kan också bero på hur signalkällan är placerad vid mätningarna. För att skydda ledningar och rör som undersökningslinjen korsade placerades närliggande signalkälla på ett flöte i form av frigolit med en förlängning på ca fem meter från botten. På grund av detta var rådata sedan tvunget att redigeras, en redigering som bidrar till ökad osäkerhet. Undersökningslinjen vid Kvarnholmen-Blockhusudden hade flera sprängladdningar som placerades på detta sätt.

Refraktionsseismiktolkningen på bergnivån som gjordes i Lambarfjärden, togs fram i samband med förundersökningen till E4 Förbifart Stockholm och denna stämmer bra överens med bergnivåtolkningen från resistiviteten (se Figur 38, Figur 55 och Figur 56). Det finns en viss avvikelse mellan sonderingarna och mätmetoderna vilket dels kan bero på placeringen av sonderingarna jämfört med de olika undersökningslinjerna, för resistivitet och seismik, och dels på osäkerheter hos mätmetoderna.

Bergnivåtolkningen vid resistivitetsmätningarna har en generell god passning med bergnivåtolkningarna från både sonderingar och refraktionsseismiken. Vid en jämförelse mellan multipel gradient- och pol-dipol-mätningarna så är tolkningen av bergnivån mycket god. Båda metoderna verkar ha samma tendenser i spridning gällande avvikelse från bergnivåtolkningen från seismikresultatet, se Figur 56.

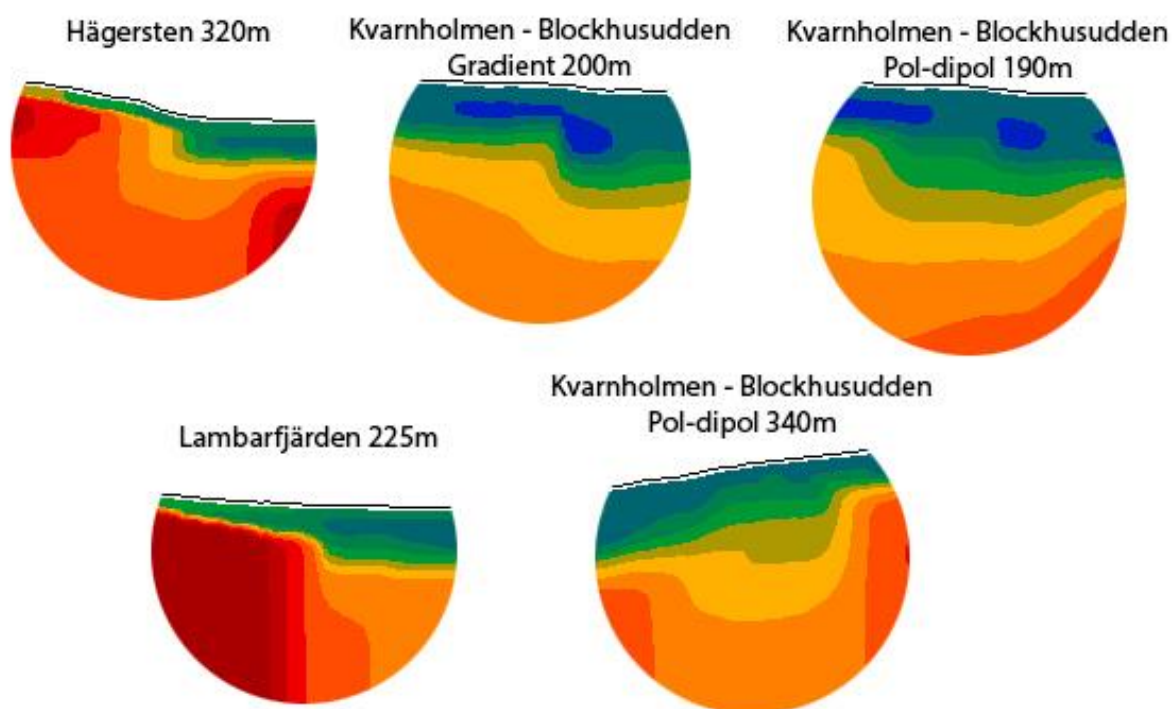
Olika zoner som är intressanta för resistivitet- respektive refraktionsseismik-mätningarna har identifierats. I Figur 38, Figur 43 och Figur 54 finns dessa zoner markerade längs med undersökningslinjerna, vid jämförelse i resultatet. Bilaga 11.5 redovisar en procentuell överlappning i andelen intressanta zoner i längdmeter längs med undersökningslinjen för de olika mätmetoderna. Siffran ger en indikation på hur bra mätmetoderna stämmer överens med varandra. Enligt de få värden som är redovisade så är multipel gradient- och pol-dipol-mätningarna mest överensstämmande. Dessa mätningar bygger på samma metod så zonerna borde få liknande utfall. Jämförelser mellan seismik och resistivitet ger dock en sämre passning. Detta är väntat då de båda metoderna är riktade på olika egenskaper i marken. Vid Lambarfjärden, Figur 38, indikerar tolkningen av refraktionsseismiken på en intressant zon mer än resistivitetsmätningarna. I Figur 43, Hägersten, visar resistiviteten på en zon mer än seismiken. Området Kvarnholmen-Blockhusudden, Figur 54, har överensstämmande anomalizoner mellan multipel gradient och pol-dipol medan tolkningen från refraktionsseismiken saknar en tydlig indikation. Det finns alltså inga tecken på att en metod är bättre än de andra. En viktig slutsats som kan dras från examensarbetet är att undervattensmätningar i urban miljö är svårtolkade och användning av flera olika metoder är att föredra, kanske även nödvändigt.

De program som har använts för inversion, invers numerisk modelltolkning, kan ibland ge osannolika strukturer. Vid mer komplicerade inversioner, vilket ofta förekommer vid undervattensmätningar, är risken för dessa artefakter större. Vid processering av refraktionsseismik används även en utjämningsfunktion i Rayfract. Beroende på hur denna är inställd kan olika resultat framhävas på olika sätt i seismikprofilen och när utjämnningen blir för stor kan vissa anomalier inte urskiljas över huvud taget. Vid observation av resistivitetsresultaten finns tydliga vertikala strukturer, se Figur 57. Dessa uppkommer i samtliga mätresultat och ger antagligen inte en helt korrekt bild av geologin. Anledningen är troligtvis att programmet inte är helt utvecklat för undervattensundersökningar. Det konduktiva vattenlagret gör så att signalnedträngningen blir grundare vilket leder till ett grundare sektionsresultat. Programmet tycks inte ta hänsyn till vattenlagret utan ger istället ett orimligt stort sektionsdjup vilket motsvarar det djup som borde uppstå om vattenlagret inte fanns. Troligt är att dessa vertikala strukturer skapas då programmet försöker fylla ut denna extra djupa sektion med data.



Figur 57 - Vertikala strukturer i resistivitetsresultaten, multipel gradientmätning.

Samma sak gäller för "trappstegsformationerna" som uppkommer i resistivetsprofilerna. Detta är en mindre vertikal struktur som programmet uppvisar och kan bero på svårtolkad bottenstruktur. Dessa "trappsteg" sammanfaller oftast med de tolkade svaghetszonerna i resistivetsprofilerna.



Figur 58 - Trappstegsformation i resistivitetsresultaten.

Med detta sagt är det viktigt att poängtera att erfarenhet och geologisk kunskap om området är mycket viktigt. De sektioner som skapas av programmen är mycket bra och kan vara till stor hjälp, men kräver ett par erfarna, pålästa och kritiska ögon.

Det finns ett antal felkällor som gör att resultatet kan påverkas negativt, många av dem är nämnda ovan. Utöver dessa kan fel ha uppstått under fältarbetet, vid dragning av kablarna. Vid tagning av GPS-punkter är det mycket svårt att få bra noggrannhet då punkten som ska mätas in är under vattnet, på botten. Detta är en punkt som inte kan ses från båten och blir därför mycket ungefärlig. Detta gäller mestadels utläggning av seismik-kabeln då resistivitets-kabeln oftast går mellan strandkanterna, över vattenpassagen, med en start- och slutpunkt som är på land. Punkterna som mäts in påverkar de framräknade hydrofonmellanrummen på kabeln som i sin tur kommer att påverka positionen på inmätt data. Vid utläggning av kablarna så sträcks de ut för att få en så rak dragning som möjligt men även här finns en felmarginal som påverkar positionerna om kablarna till exempel fastnar eller snor in sig på botten.

Generellt kan sägas att geofysiska mätningar fungerar i urbana undervattensmiljöer. Mätningarna är mycket svårare än vanliga landmätningar vid både fältarbetsskedet och analyseringsskedet och kräver därför mer planering och tid. Då det förekommer flera faktorer som påverkar data i områdena negativt är det viktigt att ta höjd för detta. Vi rekommenderar därför att använda starka signalkällor och att planera mätningarna till de "tysta" timmarna på dygnet. Det är även viktigt att styrka resultaten genom att göra flera mätningar på samma plats med olika metoder. Dels fås en bättre tolkning då de olika metoderna ser på olika egenskaper i marken och dels kan resultaten styrka varandra. Tre av de fyra undersökningslinjerna som har undersökts i detta arbete har fått tolkningsbara resultat, detta trots trafikstörningar, saltvatten, elektrisk verksamhet i området och mäktiga, konduktiva och gasdämpande sedimentlager.

8 Slutsatser

- Vid jämförelse av bergnivåtolkningar mellan geofysik och geoteknik är slutsatsen att de geofysiska mätningarna fungerar väl i urbana undervattensmiljöer.
- För att öka kvaliteten på resultatet krävs planering och kunskap om områdets störningskällor och geologi. Detta behövs fastställas innan fältarbetet påbörjas.
- Användning av flera geofysiska metoder är att föredra då de både kompletterar och kontrollerar varandra.
- Gasfyllda sedimentlager påverkar seismikdata genom dämpning av signalen.
- Konduktiva vattenlager påverkar djupnedträngningen negativt vid resistivitetsmätningar.
- Tolkning av bergnivån ger oftast ett djupare resultat för refraktionsseismiken jämfört med resistivitetstolkningarna.
- Vid en jämförelse mellan bergnivån från geotekniken och de geofysiska metoderna kan inget samband fastställas om någon av metoderna ger ett bättre resultat än det andra. Det syntes inte heller någon tendens att någon av metoderna skulle tyda på en konsekvent grundare eller djupare bergnivå jämfört med det geotekniska resultatet.
- De olika geofysiska metoderna, resistivitet-tomografi och refraktionsseismikstomografi, mäter olika egenskaper i marken vilket kan påvisa både likheter och skillnader i tolkning av eventuella svaghetszoner.
- Analyseringsprogrammen kan ge upphov till osannolika strukturer i resultaten vilket kräver ett kritiskt och erfaret öga.

9 Förslag för fortsatta studier

Nedan följer förslag för fortsatta studier

- Utökning med fler referensprojekt och fler områdestyper
- Detaljanalysering av störningar i urbana områden
- Utökning av analysen med "Induced Polarization"
- Utökning av analysen med "Joint inversion"
- Detaljerad utvärdering av undersökningslinjen Finnboda-Biskopsudden
- Modellering av områdena för bedömning av eventuella 3d-effekter
- Utveckling av metod för undersökningsdjup (DOI) vid undervattensundersökningar

10 Referenser

- Allaby, A. & Allaby, M. (2016). *pseudosection – Dictionary definition of pseudosection* | *Encyclopedia.com: FREE online dictionary*. [Online]. 2016. 1999. Available from: <http://www.encyclopedia.com/doc/1O13-pseudosection.html>. [Accessed: 20 January 2016].
- Barton, N. (2002). *Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design*. [Online]. 2002. Available from: http://ac.els-cdn.com/S1365160902000114/1-s2.0-S1365160902000114-main.pdf?_tid=19d5e9aa-9dac-11e5-a9de-00000aab0f6c&acdnat=1449579999_02faa8a5216de40e2fb2b4d8d9fadc72. [Accessed: 8 December 2015].
- Björketun, U. & Carlsson, A. (2005). *Trafikvariation över året*. [Online]. 2005. Available from: <http://www.vti.se/sv/publikationer/pdf/trafikvariation-over-aret-trafikindex-och-rangkurvor-beraknade-fran-matdata.pdf>. [Accessed: 7 December 2015].
- Dahlin, T. (1993). *On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engeneering and Environmental Applications*.
- Dahlin, T., Svensson, C. & Bjelm, L. (1998). *Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden*. [Online]. Lund, Sweden. Available from: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2344575&fileId=4064854>. [Accessed: 14 January 2016].
- Dahlin, T. & Zhou, B. (2005). *A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays*.
- Europa Technologies (2010). *Karta över Stockholm; Google Maps*. [Online]. 2010. Available from: <https://www.google.se/maps/@59.3306583,17.9059909,11.75z>. [Accessed: 18 January 2016].
- Geofysiksamarbejdet (2015). *Vejledning og kravspecifikation for MEP-målinger, data-processing og tolkning*. [Online]. 2015. Available from: http://www.hgg.geo.au.dk/rapporter/Vejledning_mep.pdf. [Accessed: 12 January 2016].
- Igel, H. (2015). *Refraction seismics - the basic formulae*. [Online]. Available from: http://www.geophysik.uni-muenchen.de/~igel/Lectures/AG-I_new/refractionseismics.pdf. [Accessed: 12 November 2015].
- Intelligent Resources, I. (2015). *Rayfract Seismic Refraction Software*. [Online]. 2015. Available from: <http://www.rayfract.com/>. [Accessed: 17 November 2015].
- Jansen, J.R. (2011). *Geophysical methods to map brackish and saline water in aquifers*. [Online]. Available from:

- <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/46031/3.4.3Jansen.pdf>. [Accessed: 12 November 2015].
- Johansson, M. (1993). *Salt Brunnsvatten*. [Online]. 1993. Available from: [file:///C:/Users/Erik/Downloads/salt_brunnsvatten_screen \(1\).pdf](file:///C:/Users/Erik/Downloads/salt_brunnsvatten_screen%20(1).pdf). [Accessed: 19 November 2015].
- Jonsson, P. (2009). *Spridning av föroreningar från Beckholmen - Sedimentundersökning i Stockholms hamn*. [Online]. Djurhamn. Available from: http://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/vp/sal/Sedimentundersokning_Beckholmen_2010.pdf. [Accessed: 10 November 2015].
- Lantmäteriet (2015a). *Avståndsmätning med bärvåg - Lantmäteriet*. [Online]. 2015. Available from: <http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Avstandsmatning-med-barvag/>. [Accessed: 17 November 2015].
- Lantmäteriet (n.d.). *Avståndsmätning med bärvåg - Lantmäteriet*.
- Lantmäteriet (2015b). *Felkällor vid GNSS-mätning - Lantmäteriet*. [Online]. 2015. Available from: <http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Felkallor-vid-GNSS-matning/>. [Accessed: 17 November 2015].
- Lantmäteriet (2015c). *Nätverks-RTK - Lantmäteriet*. [Online]. 2015. Available from: <http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Natverks-RTK/>. [Accessed: 16 November 2015].
- Lidén, M. (2012). *Ground Vibrations due to Vibratory Sheet Pile Driving*. [Online]. KTH. Available from: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:528637/FULLTEXT02>. [Accessed: 16 November 2015].
- Loke, M.H. (2011). *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. H. K. Gupta (ed.). [Online]. Dordrecht: Springer Netherlands. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-8702-7>. [Accessed: 10 November 2015].
- Loke, M.H. (2010). *Res2Dinv manual*. [Online]. 2010. Available from: [http://web.gps.caltech.edu/classes/ge111/2010Data/Resistivity/Res2dinv 2.pdf](http://web.gps.caltech.edu/classes/ge111/2010Data/Resistivity/Res2dinv%202.pdf). [Accessed: 23 November 2015].
- Loke, M.H. (2004). *Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys*. [Online]. Available from: https://www.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf. [Accessed: 9 November 2015].

- Matula, R.. (1979). *Electrical resistivity of copper, gold, palladium and silver*.
[Online]. 1979. Available from: <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd155.pdf>.
[Accessed: 18 January 2016].
- Milsom, J. & Eriksen, A. (2011). *Field Geophysics, 4th ed.*
- Nilsson, P. (2008a). *Förbifart Stockholm seismik*.
- Nilsson, P. (2008b). *Sjömätning i tre passager under Mälaren , Förbifart Stockholm 2008*.
- Parasnis, D.S. (1997). *Principles of applied geophysics, fifth edition*.
- Rohdewald, S.R. (2011). *Interpretation of first-arrival travel times with wavepath eikonal travelttime inversion and wavefront refraction method*. [Online].
Vancouver, Canada. Available from: <http://rayfract.com/pub/SAGEEP11.pdf>.
[Accessed: 13 January 2016].
- SGF (2001). *SGF Beteckningsystem.pdf*. [Online]. Available from:
[http://www.linkoping.se/Global/Bygga_och_bo/Hitta_bostad/Tomtk%C3%B6/Nykil,Ullstorp/SGF Beteckningsystem.pdf](http://www.linkoping.se/Global/Bygga_och_bo/Hitta_bostad/Tomtk%C3%B6/Nykil,Ullstorp/SGF_Beteckningsystem.pdf).
- SGU (2015a). *Bergarter*. [Online]. 2015. Available from: <http://www.sgu.se/om-geologi/berg/bergarter/>. [Accessed: 20 November 2015].
- SGU (2015b). *SGU Kartvisaren*. [Online]. 2015. Available from:
<http://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berggrund-1-miljon-sv.html>. [Accessed: 10 November 2015].
- Sheehan, J.R. (2005). *An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis*. [Online]. Available from:
http://rayfract.com/pub/srt_evaluation.pdf. [Accessed: 13 January 2016].
- Stockholms lokaltrafik (2015a). *Stockholms lokaltrafik*. [Online]. 2015. Available from:
<http://sl.se/sv/info/om-sl/om-sl/>. [Accessed: 14 January 2016].
- Stockholms lokaltrafik (2015b). *Tunnelbana, tidtabell*. [Online]. 2015. Available from:
<http://sl.se/ficktid/vinter/tbanadec.pdf>. [Accessed: 7 December 2015].
- StockholmVatten (2015). *Om projektet | Stockholms Framtida Avloppsrening*.
[Online]. 2015. Available from:
<http://www.stockholmwater.se/framtidensavloppsrening/om-projektet/>.
[Accessed: 7 December 2015].
- Svensson, C. (1996). *Vad är metamorfism?* [Online]. 1996. Available from:
<http://connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/Metamorfabergarterdokument/vadmetamorfism.html>. [Accessed: 20 November 2015].
- Trafikverket (2014). *Vatten och geologi - Trafikverket*. [Online]. 2014. Available from:

<http://www.trafikverket.se/nara-dig/Skane/projekt-i-skane-lan/Hallandsas/Byggnation/Vatten-och-geologi/>. [Accessed: 14 January 2016].

Vass, A. (2012). *Structural Model of the Lambarfjärden Area from Surface and Subsurface Data in Connection with the E4 Stockholm Bypass Structural Model of the Lambarfjärden Area from Surface and Subsurface Data in Connection with the E4 Stockholm Bypass Structural Model*. Uppsala universitet.

Weyhenmeyer, G. & Rydin, E. (2003). *Sedimentens bidrag till fosforbelastning i Mälaren*. [Online]. Uppsala SLU Institutionen för miljöanalys. Available from: <http://media.malaren.org/2013/06/sedrapport.pdf>. [Accessed: 20 November 2015].

Öhrner, P. (1994). *601G1201 Karta sonderingar*. Stockholm.

11 Bilagor

11.1 Bilaga – Matlab-skript för uträkning av z-koordinat längs mätlinjen

```
format long
Xq=linspace(x(1),x(2),10000000);
Yq=linspace(y(1),y(2),10000000);

dist=[0,cumsum(sqrt(diff(Xq).^2+diff(Yq).^2))];
Dist=[0,cumsum(sqrt(diff(East).^2+diff(North).^2))];
depint=interp1(Dist,Depth,dist);
distcurv=[0,cumsum(sqrt(diff(depint).^2+diff(dist).^2))];

max(distcurv)

con=0;
index=[];
value=[];

while con<=max(distcurv)+0.5
    [val,id]=min(abs(distcurv-con));
    value=[value;val];
    index=[index;id];
    con=con+(max(distcurv)/96);
end

value
Coord=[Xq(index)',Yq(index)',depint(index)']

grid on
plot3(Coord(:,1),Coord(:,2),Coord(:,3)*-1,'*')
hold on
plot3(North,East,Depth*-1,'+')
daspect([1 1 1])

arclength(Coord(:,1),Coord(:,2),Coord(:,3))

avs=sqrt((diff(Coord(:,1))).^2+(diff(Coord(:,3))).^2+(diff(Coord(:,2))).^2)
std(avs)
mean(sqrt((diff(Coord(:,1))).^2+(diff(Coord(:,3))).^2+(diff(Coord(:,2))).^2
))
```

11.2 Bilaga – Utrustning, inställningar samt programvara för seismikmätningarna

Analog 48-channels hydrophone streamer with five metres spacing.

HTI-96 hydrophones with a frequency response of 5 Hz-2 kHz

17 blasting outlets every 20 metre

Two Geometrics Geode, 24 channels

One blastbox 310 with scanner

Detonator: Unitronix 600, Preci: ± 30 ms

Explosives: Pentex 25, 25-100 gram

Record length: 1023.9375 ms

Delay: 10 ms

Sample rate: 0.0625 ms

11.3 Bilaga - Inställningar ABEM Terrameter LS - multipel gradientmätning

Project name: OSTLIG FORB E GD
 Task name: GD128plus_1
 ArrayCode: 15
 Time: 2015-10-14 19:03:06
 Smallest electrode spacing: 0
 BaseReference: 0;0;0
 ProtocolFile: /home/root/protocols/GD128plus.xml
 SpreadFile: /home/root/protocols/4X32.xml
 Measurement mode: Resistivity
 InstrumentSerial: LS209000001
 InstrumentSoftware: 1.14.12(2589)
 Has IP Measures: No

Acquirement settings in use from time 2015-10-14 19:03:06

AGC_TimeSec: 0.06	Acq_DelaySec: 0.8	Acq_TimeSec: 0.6	AutoStack: 1
BaseFreqHz: 50	CurrentLimitHighAmpere: 1	CurrentLimitLowAmpere: 0.01	DoInitialAGC: 0
ElectrodeResistanceBadLimitHighOhm: 600000	ElectrodeResistanceBadLimitLowOhm: 5000	ElectrodeTest: 1	ElectrodeTestCurrentAmpere: 0.02
ErrorLimit: 0.01	Fullwaveform: 1	IPSP_TimeSec: 0.5	IP_MinOffTimeSec: 0.5
IP_OffTimeSec: 1	IP_WindowSecList: 0.01 0.06 0.06 0.06 0.06 0.12 0.12 0.18 0.24	LogFluidResistivity: 1	LogLateral18foot: 1
LogLongNormal: 1	LogSelfPotential: 2	LogShortNormal: 1	LogTemperature: 2
MarginLimitHigh: 1.25	MeasureMode: 2	Measure_SNR: 0	PowerLimitHighWatt: 250
PowerLimitLowWatt: 0	PowerLossLimitHighWatt: 25	SNR_TimeSec: 0.02	SP_TimeSec: 1
SampleRateHz: 3750	StackLimitsHigh: 2	StackLimitsLow: 2	StackNorm: 0
VoltageLimitHighVolt: 600	VoltageLimitLowVolt: 0		

11.4 Bilaga – Inställningar ABEM Terrameter LS - pol-dipol-mätning

Project name: OSTLIG FORB E

Task name: PD128Fwd_1/PD128Rev_1

ArrayCode: 6

Time: 2015-10-14 22:16:03/2015-10-15 00:35:26

Smallest electrode spacing: 0

BaseReference: 0;0;0

ProtocolFile: /home/root/protocols/PD128Fwd.xml / /home/root/protocols/PD128Rev.xml

SpreadFile: /home/root/protocols/4X32RemoteC2.xml / /home/root/protocols/4X32RemoteC2.xml

Measurement mode: Resistivity

InstrumentSerial: LS209000001

InstrumentSoftware: 1.14.12(2589)

Has IP Measures: No

Acquirement settings in use from time 2015-10-14 22:16:03 / 2015-10-15 00:35:26

AGC_TimeSec: 0.06	Acq_DelaySec: 0.8	Acq_TimeSec: 0.6	AutoStack: 1
BaseFreqHz: 50	CurrentLimitHighAmpere: 1	CurrentLimitLowAmpere: 0.01	DoInitialAGC: 0
ElectrodeResistanceBadLimitHighOhm: 600000	ElectrodeResistanceBadLimitLowOhm: 5000	ElectrodeTest: 1	ElectrodeTestCurrentAmpere: 0.02
ErrorLimit: 0.01	Fullwaveform: 1	IPSP_TimeSec: 0.5	IP_MinOffTimeSec: 0.5
IP_OffTimeSec: 1	IP_WindowSecList: 0.01 0.06 0.06 0.06 0.06 0.12 0.12 0.18 0.24	LogFluidResistivity: 1	LogLateral18foot: 1
LogLongNormal: 1	LogSelfPotential: 2	LogShortNormal: 1	LogTemperature: 2
MarginLimitHigh: 1.25	MeasureMode: 2	Measure_SNR: 0	PowerLimitHighWatt: 250
PowerLimitLowWatt: 0	PowerLossLimitHighWatt: 25	SNR_TimeSec: 0.02	SP_TimeSec: 1
SampleRateHz: 3750	StackLimitsHigh: 2	StackLimitsLow: 2	StackNorm: 0
VoltageLimitHighVolt: 600	VoltageLimitLowVolt: 0		

11.5 Bilaga – Sammanställningstabell över samtliga undersökningslinjer

Plats	Position [m]	Sond g [m]	Bergnivå sond	Savstånd från linjen [m]	Bergnivå Gradient [m]	Bergnivå pol-dipol [m]	Bergnivå seismik [m]	Bergnivå gradient [m]	Avvikelse geofysikmedel - seismik [m]	Avvikelse geofysikmedel - pol-dipol [m]	Avvikelse del - seismik [m]	Överensstämmande intressanta zoner mellan seismik och multipel gradient [%]	Överensstämmande intressanta zoner mellan seismik och pol-dipol [%]	Överensstämmande intressanta zoner mellan seismik och pol-dipol [%]
Lambarfjärden														
	200				-25.9		-34.3		4.2		-4.2	41.3		
	274.2	08F388	-47.4	-15.8	-40.2		-45.0	7.2	2.4	2.4	-2.4			
	284.0	08F351K	-36.9	0.0	-39.7		-45.6	-2.8	-8.7	3.0	-3.0			
	307.3	08F389	-39.9	-13.5	-39.8		-44.1	0.1	-4.2	2.2	-2.2			
	377.0	08F352K	-37.0	0.0	-34.7		-35.9	2.3	1.1	0.6	-0.6			
	400.0				-31.6		-31.9		0.15		-0.15			
	461.6	08F391	-26.3	-3.7	-26.9		-27.9	-0.6	-1.6	0.5	-0.5			
	500.0				-29.6		-30.9		0.65		-0.65			
	600.0				-14.3		-16.8		1.25		-1.25			
	650.0				-14.3		-14.7		0.2		-0.2			
Hägersten												45.5		
	100.0				-11.9		-11.2		-0.35		0.35			
	150.0				-14.3		-14.1		-0.1		0.1			
	200.0				-16.7		-16.3		-0.2		0.2			
	245.5	13W23	-23.8	9.9	-24.8		-22.5	-1.0	1.3	-1.2	1.2			
	260.3	13W22	-29.2	12.5	-26.5		-26.9	2.7	2.3	0.2	-0.2			
	300.0				-31.0		-34.8		1.9		-1.9			
	350.0				-43.8		-53.3		4.75		-4.75			
	400.0				-45.2		-51.7		3.25		-3.25			
	458.6	13W27	-48.6	1.6	-52.2		-3.6							
Finnboda - Biskopsudden														
Bergnivåtolkning saknas														
Kvarnholmen - Blockhusudden												0.0		
	100.0				-22.0	-18.9	-30.6		1.8	4.9	-6.8		0.0	79.0
	150.0				-46.3	-42.5	-51.4		0.4	4.2	-4.7			
	200.0				-58.1	-59.1	-65.3		2.7	1.7	-4.5			
	300.0				-43.8	-42.1	-31.5		-4.7	-3.0	7.6			
	400.0				-19.7	-19.7	-24.0		1.4	1.4	-2.9			
Medelvärde							0.5	-1.1	1.1	1.9	-1.5	29.0	0.0	79.0



Lunds tekniska högskola

MSc Thesis, VTG820

ISRN LUTVDG / (TVTG-5145) / 1-85 /(2016)