



Optimering av geofysiska undersökningar: Syntetiska modellers potential

Effektivisering av undersökningsmetodik inom järnvägsprojektering genom syntetisk modellering, geofysiska mätningar och enkätstudie

Isak Johansson
Oskar Löfsved

Master of Science Thesis 30HP
ISRN LUTVDG(TVTG-5186)/1-152/(2024)

Engineering geology
Faculty of Engineering
Lund university



Optimering av geofysiska undersökningar: Syntetiska modellers potential

Effektivisering av undersökningsmetodik inom järnvägsprojektering genom syntetisk modellering, geofysiska mätningar och enkätstudie

Isak Johansson & Oskar Löfsved



LUND
UNIVERSITY

THESIS

Submitted to the Division of Engineering Geology, Faculty of Engineering, Lund University in
Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil
Engineering.

Lund 2024

Lund University, Faculty of Engineering
Division of Engineering Geology

Optimization of Geophysical Surveys: The Potential of Synthetic Models
Streamlining Survey Methodology in Railway Design through Synthetic Modeling, Geophysical Measurements, and Survey Study

Optimering av geofysiska undersökningar: Syntetiska modellers potential
Effektivisering av undersökningsmetodik inom järnvägsprojektering genom syntetisk modellering, geofysiska mätningar och enkätstudie

Authors: Johansson, Isak; Löfsved, Oskar

Supervisors: Mendoza, Alfredo (Teknisk Geologi); Robygd, Joakim (Teknisk Geologi)

Examiner: Johansson, Sara (Teknisk Geologi);

ISRN LUTVDG/(TVTG--5186)/1-152/(2024)

Keywords: ERT, Refraktionsseismik, Syntetisk modell, Infrastruktur, Markundersökningar, Effektivisering

Language: Swedish

The work is performed in collaboration with Engineering Geology at LTH

Digital edition Lund 2024

Abstract

The need for sustainability is increasingly pressing, imposing significant demands on infrastructure and its fossil footprint. The Swedish railway network currently fails to meet future requirements, while new high-speed rail lines struggle to be established. Tight economic constraints necessitate significant time and cost savings to ensure successful project implementation.

To take a step closer to achieving the transportation policy goals, this report investigates how the planning of a high-speed rail line can be optimized, with a focus on improving the efficiency of site investigations. This investigation supports the REICOR project by providing supplementary geophysical measurements of two survey areas within a potential corridor along the route between Lund and Hässleholm. The geophysical surveys were planned using synthetic models, enabling digital simulations of the measurements to pre-select the most informative setup for each site. To draw conclusions regarding the implementation of synthetic models, a current state analysis was conducted through a survey with 49 responses from experienced industry professionals. The survey revealed a strong interest and potential for using geophysics, although opinions on its reliability remain varied. Nearly half of the respondents indicated that they have used some form of synthetic model, estimating that 1-10% of the time and less than 5% of the budget for the site investigation phase is allocated to geophysics. The extent to which synthetic models can reduce costs and unnecessary work will vary from project to project. However, the overall perception is that there is significant potential, especially after an initial model has been created and tested. The initial time required to install, construct, and familiarize oneself with the software was considerable, but approximately 80% of this time could be saved when creating new models.

Additionally, the study examined how a combined resistivity and seismic refraction survey could save time in the field. This approach showed great potential by utilizing the data collection time during the resistivity survey to prepare the seismic equipment.

Sammanfattning

Behovet av hållbarhet blir allt större vilket sätter stora krav på infrastruktur och dess fossila avtryck. Det svenska järnvägsnätet når idag inte upp till de krav som framtiden ställer, samtidigt som nya höghastighetsspår har svårt att etableras. Hårda ekonomiska ramar gör behovet för tids- och kostnadsbesparingar stor om de ska kunna gå av stapeln.

För att ta ett steg närmare de transportpolitiska målen som ställs kommer rapporten utreda hur planeringen av ett höghastighetsspår kan effektiviseras, med fokus på optimering av markundersökningar. Detta gjordes som stöd till REICOR-projektet i form av kompletterande geofysiska mätningar av två undersökningsområden, inom en möjlig korridor längs sträckan mellan Lund och Hässleholm. De geofysiska undersökningarna planerades med hjälp av syntetiska modeller, vilket gjorde det möjligt att digitalt simulera mätningen, för att i förhand ge underlag till valet av det mest informationsrika upplägget för varje plats. För att kunna dra några slutsatser kring implementeringen av syntetiska modeller, gjordes en nulägesanalys genom en enkät med 49 svar från erfarna personer inom branschen. Enkäten visade på en stor vilja och potential för användandet av geofysik, men att det ofta råder spridda åsikter kring dess pålitlighet i dagsläget. Lite under hälften av svarsgruppen hävdar att de har använt en syntetisk modell av nått slag samtidigt som de uppskattar att 1-10% av tiden och mindre än 5% av budgeten för markundersökningsfasen går åt geofysik. Huruvida syntetiska modeller kan användas för att minska kostnader och mängden onödigt arbete, kommer att variera från projekt till projekt. Men den slutliga uppfattning är att det finns god potential, efter det att en initial modell har skapats och undersökts. Tiden det tog att installera, konstruera och bekanta sig med programmet i första skedet var omfattande, men cirka 80% av denna tiden kunde sparas vid skapandet av nya modeller.

Utöver detta så undersöktes hur en kombinerad resistivitets och seismisk refraktionsmätning, kan spara tid i fält. Vilket visade god potential genom att utnyttja datainsamlingstiden under resistivitetsmätningen till att förbereda den seismiska utrustningen.

Förkortningar

- EM - Electromagnetic
- ERT - Electrical Resistivity Tomography
- FEM - Finita Element Metoden
- GNSS - Global Navigation Satellite System
- GPR - Ground Penetrating Radar
- IP - Induced Polarization
- LTH - Lunds Tekniska Högskola
- MUMY - Meter Under Mark Ytan
- NATO - North American Treaty Organisation
- OXA - Oexploderad Ammunition
- REICOR - Rational and efficient ground investigations for industrialised construction of new railways
- SGU - Sveriges Geologiska Undersökning

Innehåll

Abstract	I
Sammanfattning	II
Förkortningar	III
Innehållsförteckning	V
1 Introduktion	1
1.1 Syfte	1
1.2 Frågeställning	1
2 Bakgrund	2
2.1 Järnvägens framtid	2
2.2 Järnvägens lönsamhet	3
2.3 REICOR projektet	3
3 Litteraturstudie	4
3.1 Markundersökningar	4
3.2 Utformning av höghastighetsjärnvägar	5
3.2.1 Bank	5
3.2.2 Skärning	5
3.2.3 Bro	5
3.2.4 Tunnel	6
3.3 Geofysiska metoder	6
3.3.1 Refraktionsseismik	6
3.3.2 Resistivitetsprofilering	8
3.3.3 Inducerad polarisation	8
3.3.4 Magnetometri	9
3.4 Geofysik i infrastruktur	9
3.4.1 Exempel på tillämpning	9
3.4.2 Geofysikens begränsningar	10
3.5 Konceptuell modell	11
3.5.1 Områdesbeskrivning	13
3.6 Syntetisk modell	14
4 Metod	15
4.1 Konceptuell modell	15
4.1.1 Ladugårdsmarken	15
4.1.2 Viderup	25
4.2 Materialparametrar	37
4.3 Syntetisk modell	38

4.4	Fältmätningar	39
4.4.1	Förberedelser	39
4.4.2	Mätning	40
4.4.3	Utrustning	42
4.5	Enkät till branschen	42
5	Resultat	43
5.1	Konceptuella modellerna	43
5.1.1	Ladugårdsmarken	43
5.1.2	Viderup	44
5.2	Syntetisk modellering	45
5.2.1	Ladugårdsmarken	45
5.2.2	Viderup	52
5.3	Fältundersökningarna	59
5.3.1	Ladugårdsmarken	59
5.3.2	Viderup	63
5.3.3	Tidsprotokoll	67
5.4	Enkät svar	71
5.4.1	Respondanterna	71
5.4.2	Kännedom	71
5.4.3	Användning	72
5.4.4	Projekt	73
5.4.5	Förarbete och modellering	73
6	Diskussion	74
6.1	Korrelation mellan syntetisk och verklig modell	74
6.1.1	Ladugårdsmarken	74
6.1.2	Viderup	77
6.1.3	Geologisk tolkning och kompletteringar	81
6.1.4	Ladugårdsmarken	81
6.1.5	Viderup	84
6.2	Finns det någon tidsbesparing?	86
6.3	Rekommendation för uppföljningsstudier	88
7	Slutasats	89
8	Uppmärksammande	90
	Källförteckning	91
	Bilagor	
	A Sektion 1-3: Ladugårdsmarken	
	B Sektion 1-3: Viderup	
	C Enkätens utformning	
	D Enkätens svar	
	E pyGIMLi-koder	

1 Introduktion

1.1 Syfte

Examensarbetets syfte är att undersöka om syntetiska iversionsmodeller kan användas inför geofysiska mätningar för att effektivisera markundersökningar i infrastrukturprojekt. Genom att införa syntetisk modellering i ett tidigt skede, så försöker examensarbetet utreda om tidsåtgången för modellering kan rättfärdigas mot den optimeringsmöjlighet som skapas vid utförandet av framtida mätningar. För att motivera om den allokerade tiden och investeringarna är försvarbara, undersöks synen på geofysik och syntetisk modellering genom en enkätstudie till branschkunniga. Examensarbetet kommer utöver detta utföra fältmätningar i syfte att förankra antaganden från modelleringsskedet, ge en förbättrad bild av geologin i mätområdet och utvärdera en möjlig optimering av geofysik genom att undersöka tidsbesparing av en kombinerad mätning.

1.2 Frågeställning

Examensarbetet utförs genom att besvara följande frågeställningar:

1. Undersöka markförhållandena, med fokus på geologin, vid två områden utanför Lund med hjälp av geofysiska metoder.
2. Utreda nyttan av syntetisk modellering vid marktekniska förundersökningar.

Ytterligare delfrågor som undersöks är:

- Hur omfattande är geofysik som metod i branschen och hur stort är behovet?
- Hur lång tid tar det för någon med grundläggande kunskap att installera, konstruera och implementera en syntetisk modell inför en geofysisk undersökning?
- Går det att spara tid genom att utföra resistivitets- och refraktionsseismiska mätningar samtidigt?

2 Bakgrund

2.1 Järnvägens framtid

Förslagen om att Sverige ska investera i höghastighetståg har varit en delande fråga. Ett behov av ett modernt järnvägsnät som kan jämföra sig med övriga industriländer har länge funnits på agendan, men på grund av budget och lönsamhetsfrågor har beslutet präglats av kritik (Lundberg, 2022).

Det som idag talar för höghastighetstågens framtida relevans baseras främst på FN:s globala mål om framtidens hållbara samhälle (UN, 2023). 2011 beslutade Europakommisionen att sätta ett ambitiöst mål, kallat *Transport 2050*, där Europas samlade transportnät ska kunna vara ekonomiskt konkurrenskraftiga och minska utsläppen av fossila bränslen. Visionen faller främst inom följande tre globala hållbarhetsmål:

- Mål 8. Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt.
- Mål 9. Hållbar industri, innovationer och infrastruktur.
- Mål 13. Bekämpa klimatförändringar.

EU (2011) vill uppnå detta genom att öka tillgänglighet, minska restider, barriärefekter och koldioxidutsläpp. Av Europa kommissionens 40 konkreta initiativtaganden, fram till år 2050, nämns följande två delmål relaterat till järnvägssektorn:

1. *For intercity travel: By 2050, the majority of medium-distance passenger transport, about 300km and beyond, should go by rail.*
2. *By 2050, connect all core network airports to the rail network, preferably high-speed; ensure that all core seaports are sufficiently connected to the rail freight and, where possible, inland waterway system.*

Utöver transportpolitiska mål så anslöts Sverige, den 7e mars 2024, till försvarsalliansen NATO (Krisinformation, 2024). Inträdet ställer krav på att infrastruktur kan transportera NATO-trupper mellan de 17 baser regeringen undertecknade om den 5 december 2023 (Regeringen, 2023). Försvarsmakten har därmed ställt krav på regeringen om att rusta upp det befintliga svenska järnvägsnätet för att kunna nå upp till de krav som ställs på materialtransport (From m. fl., 2023). Trafikverket (2024) beskriver i artikeln Järnkoll att "idag har vi en järnväg som till stor del är byggd för mindre trafik, dessutom för lättare och långsammare fordon". Detta beror på nedprioriteringar under decennier och kräver fokus på innovation och effektivisering av järnvägen för att nå upp till de krav som ställts.

2.2 Järnvägens lönsamhet

Från Trafikverket (2017) *samhällsekonomisk analys av järnvägsinvesteringar*, poängteras att lönsamheten vid projekt är anknuten till relationen mellan dess samhällsekonomiska nytta och investeringskostnaden. För att järnvägsprojekt ska bli mer samhällsekonomiskt lönsamma krävs därmed en ökning i de sammanlagda nyttorna eller en minskning av kostnaderna.

Riksrevisionen (2021) konstaterade att medelvärdet av de senaste fyra årens budgetar överskreds med 39%. Enligt Trafikverket beror detta på brist av kostnadskontroll vid förändrade förutsättningar inom planeringsfasen. I samband med rapporten *Nationell plan för perioden 2022–2033* presenterar Trafikverket (2021), som svar på budgetkritiken, förslag på kostnadseffektivisering inom infrastrukturprojekt. Utifrån rapporten framgår det att fokus på att upprusta bland annat södra stambanan mellan Lund och Hässleholm för höghastighetståg prioriteras. Detta ska ske genom att kostnadseffektivisera projektering och produktion genom att optimera tätortspassager, stationsutformningar, fordon, tekniska standarder, landbroar, masshantering och industrialisering.

2.3 REICOR projektet

Till följd av den problematik som det svenska järnvägsnätet står inför krävs kostnadseffektivisering av dagens anläggningsmetodik. REICOR (Rational and efficient ground investigations for industrialised construction of new railways) är ett projekt som strävar efter att uppnå en mer optimerad utgångspunkt för anläggandet av järnvägar. Med inspiration från den kinesiska strategin, med fokus på viadukter (brokonstruktion), siktar REICOR för att hitta ett effektivt sätt att kartera och planera lämpliga pelarpositioner och typ av grundläggning med hänsyn till korridor och kritisk geologi. Genomförandet går ut på att utnyttja arkiverad data där det är möjligt för att sedan värdera förhållandena i en kontrollerad och strukturerad miljö. Vid etapperna där det finns bristfällig information, används drönare utrustade med geofysisk utrustning (Radar & EM) för att snabbt kunna mäta en stor yta. Där det krävs mer information utförs sedan lokala markbundna geofysiska undersökningar (Robygd, 2024).

Det är vid de kompletterande markundersökningarna som detta examensarbetet inriktar sig. Från en utförlig förstudie av en korridor mellan Lund och Hässleholm har etapper med bristfällig information undersökts med drönarmätningar, från dessa mätningar har sedan två platser (Ladugårdsmarken och Viderup) valts ut för markundersökningar. Detta bidrar både till kalibrering, men ger också upphov till jämförelse mellan drönarmätningarna och markmätningarna. Med hänsyn till den digitaliserade arkivdata, som sträckan kommer att byggas upp av, är det av intresse att se hur en syntetisk konceptuell modell av markförhållandena kan användas för att ge en förbättrad bild av hur markundersökningarna kommer representeras. Från denna kunskap kan en optimerad undersökningsplan göras i förväg, vilket kan bidra till ytterligare besparingar på tid och kostnader för framtida järnvägsprojekt.

3 Litteraturstudie

3.1 Markundersökningar

De senaste stora tillskotten till järnvägssektorn har varit i form av modernisering av det befintliga nätet och förbifarter i centrala delar av städer. Information om val av markundersökningar och skapandet av borrplaner inför nya järnvägar är något begränsat och ej anpassade för industriellt byggande av landbroar. Ett vägprojekt har generellt sätt ett liknande geologiskt- och hydrogeologiskt informationsbehov som ett järnvägsbygge och är ofta mer omskrivet. Detta gör markundersökningar för vägar lämpliga att undersöka för att få en bra bild av hur järnvägsprojektering kan förbättras.

Utifrån offentliga marktekniska undersökningsrapporter, samt de förslag som redovisas i fälthandboken av Svenska Geotekniska Föreningen (2013), kan i breda drag en sammanfattning framställas. I en traditionell borrplan sker en utredning ofta genom geotekniska sonderingar som utförs för att ge projektörerna information om de rådande markförhållandena längs med utvalda korridorer. Samtliga marktekniska undersökningsrapporter för byggandet av vägar prioriterar geotekniska undersökningar som CPT (cone penetration test), ViM (viktsondering) och Jb (Jordbergsondering). Dessa metoder ger information om markens hållfasthet och är välkända inom branschen, vilket kan förklara dess prioritering. Av hydrogeologiska tester är grundvattenrör absolut vanligast. Användningen av geologiska kartor är även vanligt, speciellt i ett inledande skede.

En tidigare undersökning av Alm m.fl. (2007) gällande användningen av geofysik i branschen (mer inriktat åt bergbyggande), visade en begränsad användning av många av de geofysiska undersökningsmetoder som finns idag. I rapporten framgår det att mer traditionella borrhningar prioriteras, där metoder som ger någon form av mekanisk egenskap anses mer givande än de som kräver högre grad av tolkning. Refraktionsseismik och resistivitetsprofilering värderades dock relativt högt, där refraktionsseismikens förmåga att ge information om P-vågshastighet kan bidra till styvhetsberäkningar. Ytvågsseismiken ger en bättre representation för styvheten men på bekostnad av mätningens djup. Frågan om förundersökningarna använts fullt ut, visade på att ett flertal av de intervjuade ansåg att det fanns brist på information i förundersökningen. För de mer detaljerade prognoserna av hydrogeologin ansågs det råda otillräcklig kunskap på grund av för få undersökningar eller brister i valet och/eller utformningen.

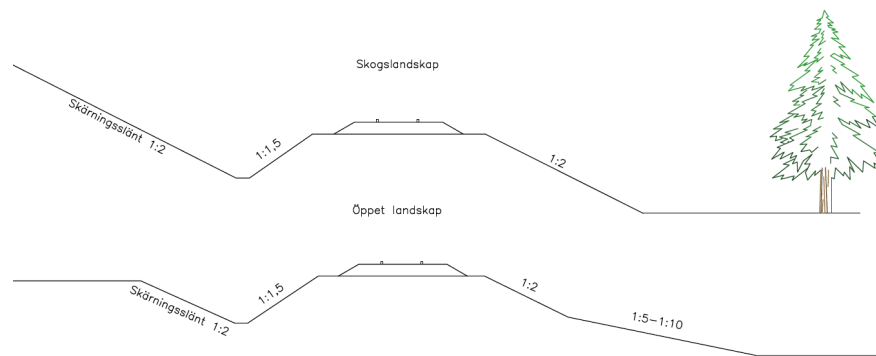
Mycket har hänt sedan undersökningen utfördes och det är intressant att veta om det skulle finnas ett mer utökat förtroende/användning av geofysiska metoder för geotekniska situationer i dagsläget.

3.2 Utformning av höghastighetsjärnvägar

I Sverige syftar en höghastighetsjärnväg på en bana som är anpassad för tåg med hastigheter över 250 km/h. Detta ställer större krav på utformningen av järnvägsbanan vid olika landskapsförutsättningar. De konstellationer som är relevanta för svenska förhållanden är främst tunnel och bro, där bank och skärning kommer utnyttjas efter behov. Beroende på utformningen så kommer olika geotekniska problem att uppstå, vilket påverkar val av grundläggning.

3.2.1 Bank

Trafikverkets rekommendation för höghastighetsjärnväg på bank i öppet respektive skogslandskap redovisas i figur 3.1 nedan (Trafikverket, u.å.).



Figur 3.1: Rekommendation av höghastighetsbank/skärning i skog och öppet landskap. Modifierad illustration ur Trafikverket (u.å.).

Vid höga halter av finkorniga sediment som ler och silt kan förstärkningsåtgärder som kalk-cement pelare och pålgrundläggning vara viktiga för att säkerställa en stabil grundläggning. Pålning används oftast vid mäktigare lösa lager medans tryckbankar, utskiftning, förbelastning eller lättfyllning är mer användbart vid mindre jorddjup.

3.2.2 Skärning

Vid kuperat landskap och ingång till tunnel kommer järnvägen ibland behöva gå i skärning enligt figur 3.1 ovan. De geotekniska svårigheterna vid järnväg i skärning är främst vattenföring via sorterade grovkorniga jordar som har stor permeabilitet. Därav är en god förståelse över de rådande grundvattenförhållandena viktigt, samt hur avledning av vattenflöden ska ske. Stor vattenföring kräver omfattande förstärkningsåtgärder för att öka släntstabiliteten.

3.2.3 Bro

Pelarbrolösningen inom höghastighetsjärnvägar är vanligt förekommande internationellt. Enligt en teknisk rapport från Trafikverket (u.å.) över sträckan Sundsvall-Härnösand

påpekas det att en pelarbro ofta krävs vid dalgångar där förekomsten av finsediment och torv är vanligt. Detta ger upphov till geoteknisk problematik med instabilitet och sättningar. Pålning och plattgrundläggning är vanligt förekommande lösningar vid dessa problem.

3.2.4 Tunnel

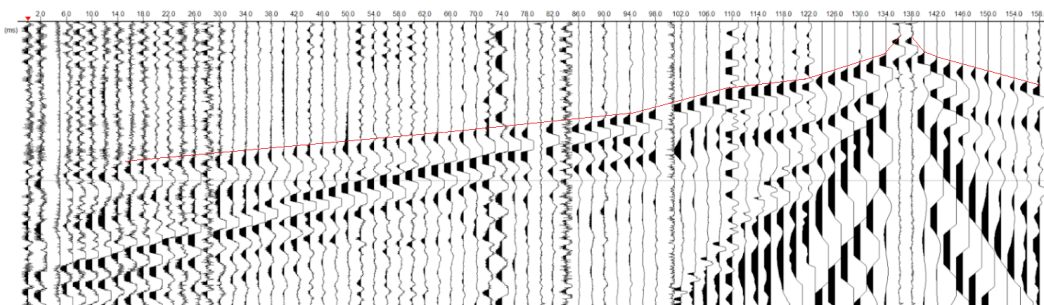
Vid kraftigt varierande topografi kan tunnelbaserade lösningar krävas. Om bergtäckningen är liten, måste överliggande massor förstärkas, medans större bergtäckning kan skapa spänningssvärigheter vid känsliga tunnelgeometrier. En detaljerad berggrundsanalys är viktigt för att säkerställa tunnelns geometriska utformning och förstärkningsdimensioneringar. I projektet Sundsvall-Härnösand anmärkte trafikverket på att gångbergarter med en annan bergkvalitet såsom bland annat diabsgångar kan orsaka problem vid anläggning beroende på orientering och frekvens (Trafikverket, u.å.).

3.3 Geofysiska metoder

Globalt sett har användningen av geofysik under de senare åren blivit ett allt mer populärt undersökningsalternativ. För att ge en bättre förståelse om dess potential och förbättringsmöjligheter krävs en grundläggande förståelse om hur de vanligaste metoderna fungerar.

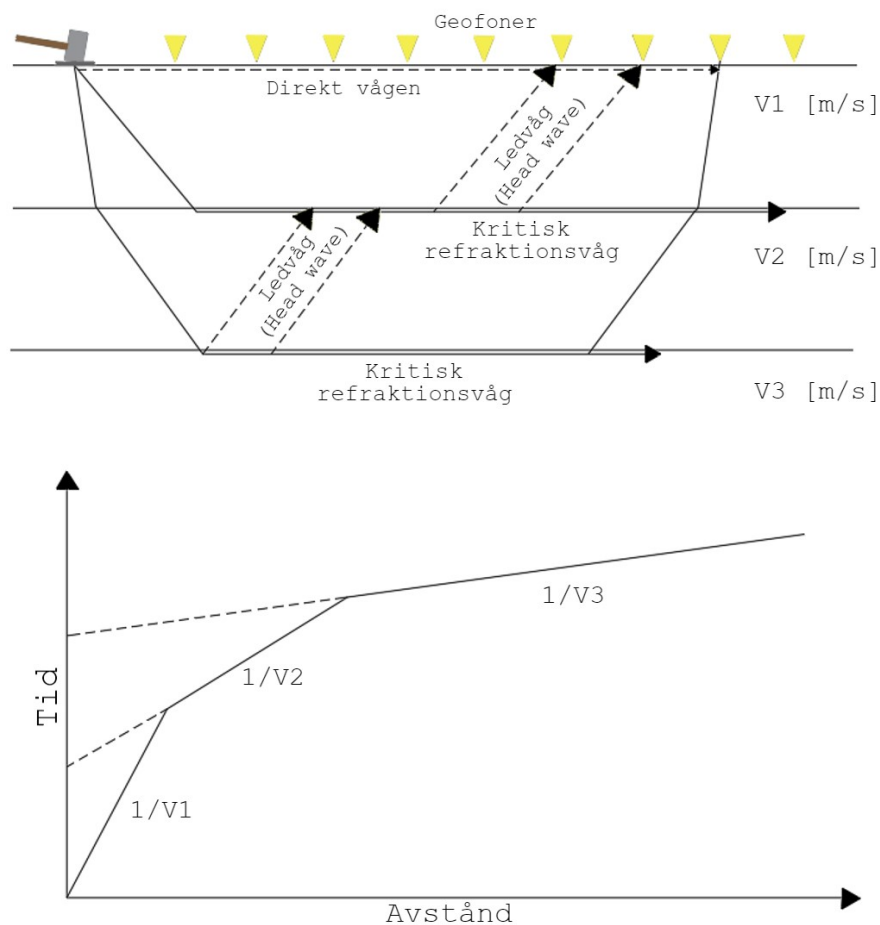
3.3.1 Refraktionsseismik

Refraktionsseismik fungerar genom att generera en seismisk våg och därefter mäta dess utbredning med hjälp av geofoner (mikrofon för marken). Signalen skapas generellt sett med släggslag för mätningar ner till 15 meters djup och med sprängladdning för mätningar ner till 30 meters djup (CFLHD, 2003). Den signal som är av intresse för refraktionsseismik är kompressionsvågen, vilket är den snabbaste (Triumpf, 1992). Genom att placera geofonerna längs en linje med ett bestämt intervall (t.ex 2 meters mellanrum) så kan de mäta den seismiska vågens utbredning. Därefter kan den första ankomsttiden urskiljas från mätningen, vilket i sin tur kan ställas i relation till geofonernas avstånd för att ge en hastighet på kompressionsvågen, se figur 3.2.



Figur 3.2: Seismisk refraktionsdata från fältmätningar i Ladugårdsmarken, bearbetad i Geogiga. Röd linje markerar P-vågens första ankomsttid.

Hastigheten för kompressionsvågen är oftast starkt relaterad till materialets densitet, där hårdare lager möjliggör en högre hastighet. Lagrens densitet tenderar att öka med djupet vilket gör att ett intressant fenomen inträffar. När den initiala kompressionsvågen breder ut sig, i ögonblicket direkt efter initieringen, så kommer energin att spridas i alla riktningar, både ner och längs med marken. De första geofonerna kommer registrera denna direkta våg, men en del av energin kommer fortsätta ner i marken till ett potentiellt snabbare lager. Tryckvågen kommer då att spridas igenom detta nya lager med en refrakterad vinkel enligt brytningslagen. Om vinkeln på den utbredande vågen, genom det hårdare lagret, går längs med dess gräns, så har den kritiska vinkeln uppnåtts, 3.3. Från den kritiska refrakterade vågen kan en snabbare väg till geofonerna uppnås genom att en snabbare våghastighet tillåts. Om ytterligare ett snabbare lager finns kan detta bli den nya snabbaste vägen, enligt figuren nedan, givet att mätlinjen är lång nog och signalen tillräckligt tydlig (RSK-Geophysical, u.å.).



Figur 3.3: Visualisering av refraktionsseismikens utbredning med horisonella lager. Modifierad illustration ur RSK-Geophysical (u.å.) rapport *STATS Geophysical: A reference for geophysical techniques and applications*

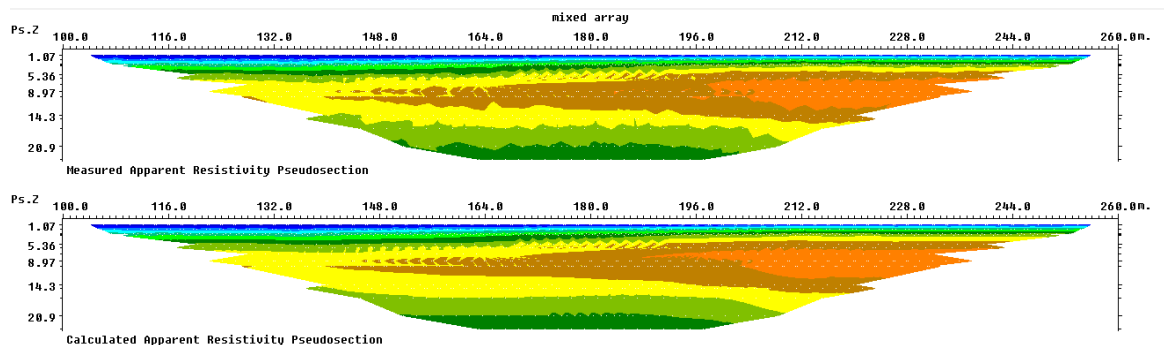
Från tidsmätningarna kan invertering genomföras för att iterativt få fram en modell vars resultat bäst representerar den mätta datan, alltså minst avvikelse. Detta görs digitalt med hjälp av datorprogram såsom Geogigas DWTomo. Resultatet kan bland annat användas för att tolka lagermäktigheter och bergkvalitet.

3.3.2 Resistivitetsprofilering

Med elektrisk resistivitetstomografi (ERT) kan markens resistivitetsvariation modelleras, för att särskilja mellan olika geologiska enheter eller anomalier som ledningar och föroreningar. Teorin går ut på att man, likt refraktionsseismiken, kopplar upp sensorer i form av elektroder (metallstavar) längs en linje med förbestämt avstånd. Därefter kommer en ström att föras mellan två elektroder genom marken, samtidigt som ett par andra elektroder mäter spänningskillnaden, för att med hjälp av Ohms lag kunna beräkna resistansen för den unika konfigurationen (RSK-Geophysical, u.å.).

Potentialskillnaden mellan två intilliggande elektroder ger en hög upplösning, men ytlig mätning, medans två avlägsna elektroder ger en djup men lågupplöst mätning. Detta upprepas därefter för en elektrodarrangemang tills en komplett uppsättning resistanser i marken har samlats. Vanliga elektrodkonfigurationer som används är till exempel Wenner, dipol-dipol och gradient.

Resistansen kan ses som motståndet oberoende på markens geometri, vilket gör resistansen olämpligt för att bedöma djup för objekt. Om resistansen tilldelas en geometrisk faktor, baserad på elektrodavstånd och konfiguration, så kan den skenbara resistiviteten beräknas. Den skenbara resistiviteten från vald konfiguration bygger upp en pseudosektionen av marken. Denna sektion sammanfattar den insamlade datan enligt figur 3.4 där valet av elektrodkonfiguration och elektrodavstånd som används påverkar faktorer som upplösning, djup, mättid och känslighet. Pseudosektionen enligt nedan är en grafisk representation av skenbara resistivitetvärden. Den visar fördelningen av elektrisk resistivitet under markytan i ett homogent material. Genom inverteringsmodellering beräknas den verkliga resistiviteten vilket resulterar i en modell (Guideline Geo, 2022).



Figur 3.4: Exempel på en pseudosektion i res2Dinv med mätt data ovanför och den beräknade under. Datan är från en av fältmätningarna.

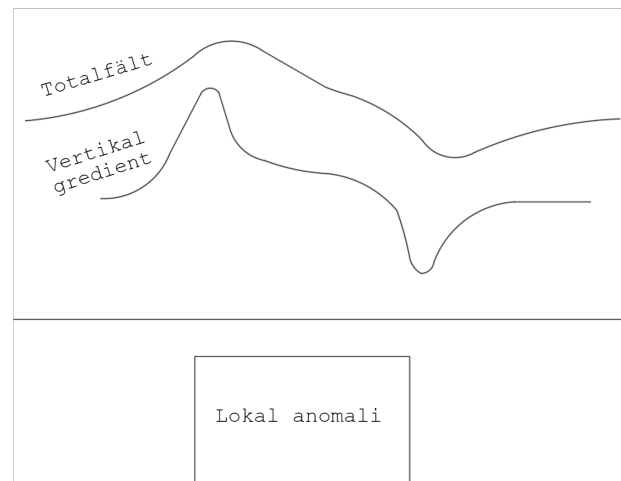
3.3.3 Inducerad polarisation

Inducerad polarisation (IP) är ytterligare en mätning som kan göras tillsammans med ERT mätningen för att ge kompletterande data till resistiviteten. Om två material har liknande resistivitet kan IP eventuellt frångilja dem. IP mäter markens uppladdningsförmåga, det vill säga förmåga att lagra elektrisk laddning, genom att mäta spänningsavklingningen i marken efter att en ström har tillförts (RSK-Geophysical,

u.å.). Mätmetoden är populär vid prospektering av malm men är även väl lämpad vid kartläggning av avfall och föroreningar.

3.3.4 Magnetometri

Magnetometri med en gradiometer är ett beprövat sätt att snabbt mäta skillnaden i totalfältet, storleken på den magnetiska fältvektorn, längsmed marken. Som namnet föreslår så mäter en gradiometer den vertikala gradienten i totalfältet genom att två mätare är monterade på ett känt avstånd ovanför varandra, där ett större avstånd ger känsligare mätningar. På grund av att två sensorer (på relativt litet avstånd) mäter samtidigt, så kan regionala variationer i magnetfältet försvinna då dess skillnad över sensoravståndet är försumbar (Breiner, 1999). Föremål som påverkar totalfältet utgör ofta formen av en sinuskurva vid gradiometermätning, se figur 3.5. Men formen på gradienten är högt varierande och beror på anomalins form, lutning, djup, riktning och mycket annat, vilket försvårar tolkningen.



Figur 3.5: Illustration av hur totalfältet och den vertikala gradienten kan se ut efter passage över ett lokalt anomali. Modifierad illustration ur Breiner (1999).

3.4 Geofysik i infrastruktur

3.4.1 Exempel på tillämpning

I Portugal användes refraktionsseismik flitigt i prospekteringen inför integrationen av det europeiska höghastighetsnätet. Metoden var lämplig för att bestämma jordlagrens mäktighet och bergets vittringsgrad med hjälp av tomografisk inversion. Med hjälp av empiriska grafer för gräv- och rivbarhet i relation till kompressionsvågshastighet så kunde djup till angiven hastighetsgräns anges för olika geologiska enheter. Detta var i sin tur relevant för järnvägsprojektets schaktarbete i Portugals bergiga områden (Moura och Ribeiro, 2009).

När den nya Damhusledningen skulle borras i Köpenhamn bestämdes det att borrhningen (i form av en liten tunnelborrmaskin) skulle ske i toppen av kalkstenen, vilket

gjorde borringen känslig för variationer i kalkstenens topografi. Sättningar uppkom vid ett tillfälle när bormaskinen stötte på permeabelt grus, vilket ledde till att refraktionsseismik implementerades för att lokalisera variationen i bergytan och där injektera för förstärkning. Där bormaskinen bröt igenom bergytan, hade en tidigare geoteknisk borring gjorts för att bedöma bergytans läge. Denna borring visade på att täckningsgraden skulle vara inom tolerans, men med hjälp av den inverterade seismiska datan, visade det sig att en dramatisk sänka fanns precis vid tunnelns stråk. Efter seismikens framgångar beslutades det att metoden också skulle tillämpas i den kritiska passagen under en sexspårig järnväg med höga krav på sättningar. Den seismiska undersökningen resulterade i en sänkt risk för tunnelprojektet, men bidrog också till att få tillstånd från myndigheter innan start (Bagger m. fl., 2016).

Efter ett skred nära Enniscorthy, längs sträckan mellan Dublin till Wexford i Irland, utfördes en utredning för att avgöra orsaken. Till denna utredning ingick både geotekniska och geofysiska undersökningar i form av ERT och GPR (ground-penetrating radar). Resultatet från ERT:n och borrhningarna visade att ett löst packat svämsediment av lera i form av ett väldigt lågresistivt område befann sig ihop med ett varierat bergdjup, under banken. Inversionen från ERT:n visade även ett tjockare högresistivt område, vilket antogs vara ballasten, som uppgav en tydlig kontrast till den underliggande leran. Området hade varit sättningsbenäget sedan tidigare vilket antagligen hade lösts med tillskott av ballast. På grund av ett elektrodavstånd på tre meter så var upplösningen på de tunnare lagren i inverteringen osäkra, framförallt moränens och ballastens mäktigheter. Dessa uppskattades därmed tillsammans med borrhningar och GPR, för att skapa en helhetsbild av de geologiska och geotekniska förutsättningar som bidrog till skredet (Donohue m. fl., 2010).

3.4.2 Geofysikens begränsningar

Problematik med trovärdigheten av resultaten, vilket oftast behöver kontrolleras med tilläggsborringar, är något som hämmar geofysiska undersökningar. Ett uppenbart problem med ERT och refraktionsseismik är bristen på entydiga resultat. Det vill säga att olika material kan ha samma fysiska egenskaper. Detta fenomen är tydligt redovisat i Triumf (1992) *Geofysik för geotekniker* där en högre halt joner och fukt i jorden kan öka den elektriska konduktiviteten, vilket gör resistiviteten för olika geologiska material högt varierande. Kompressionsvågshastigheten har ett liknande problem där högre vattenkvot ger högre hastigheter. Detta gör det svårt att dra slutsatser om geologins sammansättning från enbart geofysik då flera olika material kan uppvisa samma data.

Gourdol m. fl. (2021) beskriver i deras rapport elektrodavståndens inverkan på relationen mellan upplösning och djup. För att få en representativ bild av grunda lager krävs ett kortare elektrodavstånd. Ett bredare avstånd görs på bekostnad av upplösningen och visade på att kunna ge en överskattning av djupet. Denna överestimering amplifierades när resistivitetskontrasten ökade, vilket kan försvåra valet av avstånd ytterligare. Vid mätningar av resistivitets och IP kan kontakten med marken vara dålig om den är för torr, men framför allt så kan metalliska objekt nära ytan påverka datan.

För seismiken råder ett liknande problem där avståndet mellan geofonerna avgör upplösningen. Lokala variationer i ankomsttid mellan geofoner går att utmärka ur data

om de är belägna runt samma geofoner för olika slagpositioner. Även plats för första ankomsttid blir mer exakt med mindre avstånd då det alltid kommer att ske någonstans mellan två geofoner, och därmed kommer ett mindre avstånd ge en mindre osäkerhet. Haeni (1988) påpekar vikten i att ha rätt geofonupplägg för sin avsiktliga undersökning. Rapporten rekommenderar att undersöka ett område med någorlunda känd geologi för att se om det går att urskilja likheter/skillnader ur den konceptuella modellen. För att se samtliga refraktorer från den konceptuella modellen, så ska geofonavståndet justeras tills de uppenbarar sig.

Valet av metod kan också vara kritiskt då dess effektivitet är väldigt begränsad till geologin och förhållandena på plats. I Central Federal Lands Highway Division CFLHD (2003) *Application of geophysical methods to highway related problems*, tas det upp ett flertal relevanta begränsningar med de ovannämnda geofysiska metoderna. För att refraktionsseismik ska fungera väl krävs att kompressionsvågens hastighet ökar med djupet. Om detta inte är fallet så kommer det långsammare lagret inte att göra sig synligt vid val av första ankomsttid och kommer att påverka djupbedömningar på djupare lager. En grundvattenyta nära bergytan kan skymma eller försvåra tolkningen av bergytan då vattenmättad jord har högre hastighet vilket i sin tur sänker kontrasten mot bergytan. Seismik är också känslig mot störningar från trafik och annat buller, vilket kan begränsa mätningens längd/djup eller lämplighet.

3.5 Konceptuell modell

I den inledande fasen av planeringen för markundersökningar inom ramen för anläggningsprojekt, spelar en konceptuell modell en central roll för att ge en övergripande bild av markens hydrologi och geologi. Syftet med denna modell är att skapa en tydlig och generaliserad representation av markförhållandena i ett tidigt skede för att underlätta framtida undersökningar. Genom att tillämpa denna metodik kan geologiska och hydrologiska egenskaper synliggöras på ett sätt som underlättar tolkningen av komplexa underjordiska förhållanden. För om det är något som är säkert, så är det att marken är komplex.

Unfortunately, soils are made by nature and not by man, and the products of nature are always complex... - Karl von Terzaghi .

För att utveckla en representativ konceptuell modell, är informationsinsamling en kritisk process, fundamental för att skapa en djup förståelse över området i fråga. Däremot är frågan om vad som bör ingå i en konceptuell modell tvetydig.

Fookes (1997) presenterar en generell metod om hur en geologisk modell bör byggas upp och vikten i dess användning. Enligt Fookes ska en geologisk erfaren och utbildad person kunna göra en god uppskattning av markförhållandena i en förstudie (desk study). Detta kan tolkas som skapandet av en konceptuell modell av områdets geologi och hydrologi från tillgänglig dokumentation om området och platsbesök. Genom att komplettera förstudien med mark -och laboratorieundersökningar bör en väldigt nära

bild av de verkliga markförhållandena kvarstå (minst 95 procent av geologin enligt Fookes erfarenhet). För att nå en hög noggrannhet i ett tidigt skede antas det finnas god tillgång till geologiskt material så som kartor och data från tidigare undersökningar.

Norbury (2020) förklarar översiktligt definitionen av markmodeller samt hur de används och iterativt förbättras. Norbury nämner hur en preliminär markmodell (konceptuell modell) bör konstrueras innan några vida invasiva mätningar utförs. Denna konceptuella modell rekommenderades att innehålla:

- Gränserna för platsen och potentiella källor utanför platsen;
- Lokal topografi, geologi, hydrogeologi, ytmönster för dränering och möjliga kontaminationsvägar i marken;
- Nuvarande användning av marken och dess omedelbara omgivning;
- Omfattningen och typ av befintlig infrastruktur; och
- Platsens historiska användning.

Norburys artikel bygger delvis vidare på Fookes arbete samt tar upp Storbritanniens Code of practise for ground investigations (British Standards Institute, 2015). I dokumentet anmärks att en markmodell ska formuleras i ett tidigt skede (innan mätningar sker) och hur den framförallt ska belysa de brister i kunskap som finns inom projektområdet. Dessa brister ska sedan markundersökningar, hjälpa till med att förklara och på så vis tillföra markmodellen. I rapporten står det tydligt vad som förväntas av en förstudie och fältbesök vilket är att beskriva områdets:

- Topografi;
- Geologi, hydrogeologi och geomorfologi;
- Grundvatten;
- Preliminär geoteknisk problematik;
- Nuvarande och tidigare användning;
- Rör, ledningar och annat dylikt;
- Förutsägbara konstruktionsfaror; och
- Undersökningsförslag.

Den brittiska standarden är välutvecklad och följer de bredare kraven som Eurocode 7 ställer (EU, 2004).

3.5.1 Områdesbeskrivning

För att få en god uppfattning av geologin och de processer som har bidragit till dess utformning behövs en generell sammanfattning. Sydvästra Skåne har en väldigt unik geologi som är central i förståelsen av markförhållandena kring undersökningsområdena Viderup och Ladugårdsmarken enligt figur 3.6.



Figur 3.6: Undersökningsområdenas läge, berggrund (övre högre) och jordlager (nedre) från ett regionalt (vänstra) till ett lokalt (högra) perspektiv. Bildkälla: SGU (Bergarts- och jordartskartan) & ©Lantmäteriet.

Ising m. fl. (2019) har i sin rapport *Hässleholm–Lund – uppgraderad geologisk information inför projektering av höghastighetsjärnväg*, gjort utförliga undersökningar längs den relevanta korridoren. För att summera undersökningarna med fokus på området intill Viderup och Ladugårdsmarken så finns det en tydlig gräns där den lågbaltiska moränleran går över till den leriga eller sandiga nordostmoränen. Som namnet antyder så går det att urskilja denna morän i nordöstra delen av Skåne enligt figur 3.6. Anledningen till denna formation är omdiskuterad, men processen anses ha resulterat i att sydvästliga delen av inlandsisen drog med sig en yngre lerigare morän/moränlera som många ställen, överlagrar den äldre moränen som dominerar resten av Skåne. Detta har lett till unika förhållanden där isälvsavlagringar och glacial lera kan förekomma mellan den äldre nordostmoränen och den yngre lågbaltiska moränleran. I området kring Kävlingeån har den lågbaltiska moränleran eroderats bort och exponerat äldre lager samt sorterat nya postglaciala sediment.

Mellan områdena övergår lerstenen från yngre trias vid Viderup till den betydligt äld-

re skiffen vid Ladugårdsmarken. Ising m. fl. (2019) beskriver den triassiska lerstenen som plastisk och innehållande svagt konsoliderad sandsten, vilket gör att övergången kan vara enkel att missta som jordlager. Rapporten nämner även hur trias lerstens avsättning lagrades i lågzonen (träget) genom colonusskiffen som stack upp vid området runt Ladugårdsmarken enligt figur 3.6. Skiffen anses vara spröd och uppsprucken med tydliga diabasgångar.

3.6 Syntetisk modell

Vid valet av elektrod- och geofonavstånd kan syntetiska modeller användas för att i förhand ge en bild av hur olika sensoravstånd påverkar inversionernas djup, känslighet och upplösning. Genom att visualisera markförhållandena för undersökningsområdet, utifrån konceptuella modeller, digitalt så kan man skapa en grund för hur de geofysiska mätmetoderna och uppläggen kommer avspegla geologin. Dessa modeller genereras med hjälp av datorprogram som tex PyGimli och möjliggör konstaterande av samband mellan förväntad geofysisk data, baserad på fysikaliska tilldelningar till den konceptuella modellen och dess simulerade inversion.

Gourdol m. fl. (2021) använde sig av syntetiska modeller för att mäta hur stor påverkan elektrodavstånd har på skillnaden i effektivvärde mellan inversionsmodellen och den ursprungliga syntetiska resistivitetsmodellen. Rapporten fokuserar främst på avbildningen av tunna grundliga lager men tar även upp hur djupare lager får en mer otydlig gräns med större elektrodavstånd. Alltså kunde olika utlägg och dess inverteringar tolkas och jämföras digitalt för att tillslut komma fram till en lämplig mätstrategi. Rapporten poängterar att deras resultat är anpassade för en specifik förenklad modell och att mer arbete krävs för en generell anpassning till mer komplexa geologier. Vilket gör tillämpningen och vidareutvecklingen av den syntetiska modellens användning, högst intressant.

Haeni (1988) motiverade en strategi där iterativ anpassning av geofonavstånd kan krävas för att uppnå representativ resultat. Resultat som då är baserade på grova beräkningar och den konceptuella modellen. Istället för att göra detta på plats, så skulle den konceptuella modellen tilldelas fysikaliska egenskaper och grova fältberäkningar ersättas med FEM-simuleringar.

PyGimli är ett open-source program skapad av Rücker m. fl. (2024), för modellering av syntetiska geofysiska undersökningar, med möjlighet för invertering av både uppmätt och simulerad data. Programmet använder sig bland annat av finita element metoden och kan på egen hand bygga upp olika meshstrukturer för forward- och inversmodeller. PyGimli är skriven i python med koder för simulering av bland annat ERT och refraktionsseismik med relaterade exempelkoder. Forwardmodellen är den simulerade datan vilket bygger på modellens geometri, fysikaliska egenskaper (t.ex resistivitet eller hastighet), sensoravstånd, meshstruktur och brus. Forwardmodellen kan därmed justeras till hög grad och i kontrollerad miljö. Därefter kan forwardmodellen inverteras i pyGimli eller med andra inverteringsprogram såsom Geogiga och res2Dinv med hjälp av Bert, som ger tillgång till ett flertal användbara funktioner (Rücker, 2018).

4 Metod

4.1 Konceptuell modell

Uppbyggnaden av de konceptuella modellerna som vidtas i Ladugårdsmarken och Viderup utgår ifrån den fakta som belysts i litteraturstudien. För att få mer information, som är specifikt för rapportens frågeställning, har de mer generella rubrikerna enligt avsnitt 3.5 konkretiserats för att belysa den konceptuella modellens grundläggande byggstenar mer i detalj. De komponenter som rapportens konceptuella modell bör vara uppbyggd av visas nedan:

- Områdesbeskrivning
- Brukning/historia
- Fältbesök
- Ledningskollen
- Topografi
- Berggrund
- Jordlagerföljder
- Hydrogeologi
- Geoteknisk förutsättning

Rapporten behandlar två undersökningsområden (Ladugårdsmarken och Viderup). Dessa kommer beskrivas i separata kapitel med motsvarande konceptuella modeller.

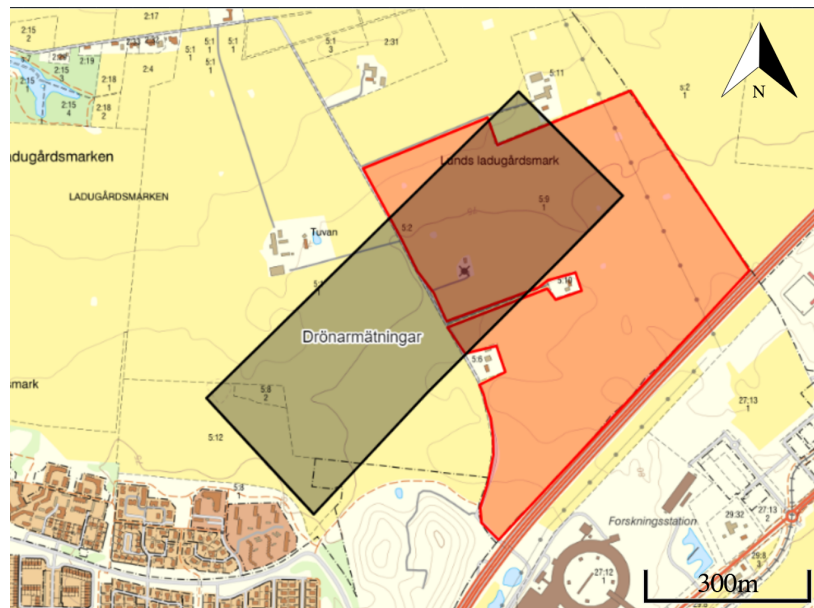
4.1.1 Ladugårdsmarken

Områdesbeskrivning

I detta kapitel kommer fokus ligga på området som är känt som Ladugårdsmarken, beläget strax norr om staden Lund. Fastigheten har den identifierande beteckningen Lund Ladugårdsmarken 5:9 och ägs av Lunds Domkyrka.

Valet av Ladugårdsmarken som undersökningsområde motiverades av flera faktorer, där lokalgeologins relativa välkändhet och förekomsten av moränenheter, både horisontellt och vertikalt, spelade en central roll. Platsen har tidigare varit en del av

en drönburen geofysisk undersökning som utfördes av SGU¹, vilket motiverade att undersöka området som är täckt av drönarens flyglinjer i syfte att jämföra båda resultaten. Drönmätningarna täcker i stort två fastigheter där den sydvästra delen ansågs vara extra intressant från de resistivitmätningar som gjorts av SGU. Området beviljades ej tillstånd av markägare för vidare undersökningar vilket ledde till att Ladugårdsmarken blev det ända rimliga alternativet. Den geografiska positionen för Ladugårdsmarken 5:9 (röd) och drönmätningarna (skuggat) presenteras i Figur 4.1 nedan.



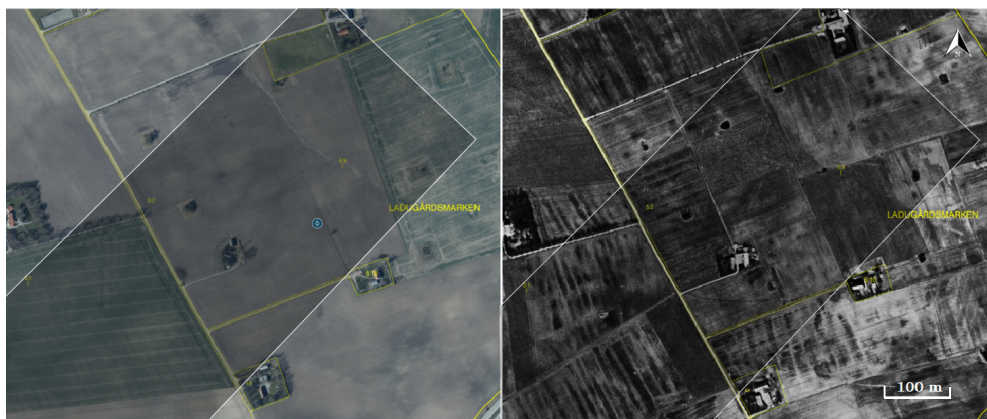
Figur 4.1: Fastighetens Ladugårdsmarkens position i skärning med drönmätningar gjorda av SGU. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Platsen som är intressant att bygga en konceptuell modell på är således det område som är i snitt med fastigheten 5:9 och drönmätningarna.

Bruk/historia

Det berörda området har historiskt sett använts som jordbruksmark av olika slag. Enligt information från Lantmäteriets kartunderlag har marken dessutom varit indelad i flera olika åkrar och haft anslutande vägar till dessa mindre åkermarker. Beroende på hur dessa vägar och avgränsningar mellan åkermarkerna är konstruerade kan de orsaka lokala anomalier i mätresultaten, vilket är viktigt att beakta redan i skapandet av den konceptuella modellen, särskilt i de övre lagren. Enligt kartunderlaget från Lantmäteriet finns det en markering inom undersökningsområdet som benämns "Övriga kulturhistoriska lämningar", Kulturminnet är inte specificerat och saknar information. Detta beaktas ifall fältundersökningens mätlinje skulle skära igenom kulturminnet. Flygfoton från nutid och 1960-talet samt kulturminne presenteras nedan i figur 4.2

¹SGU, personlig kommunikation, mars, 2024



Figur 4.2: Flygfoto 2023 (Vänster) i jämförelse med 1960 (Höger). Blå markering visar platsen för ett ospecificerat kulturminne. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Fältbesök

Efter att ha bekantat sig med platsen genom digitala hjälpmedel gjordes ett fältbesök den 23:e januari 2024 på Ladugårdsmarken, för att få en bättre bild av hur förutsättningarna för fältarbetet och den konceptuella modellen kan förbättras. Observationer på plats visade på följande förutsättningar:

- Mild vegetation, lättåtkomlig med mätutrustning.
- Lerrik organiskt toppjord med bedömd hög vattenkvot, motiverar torrare väder inför fältundersökningen.
- Förekomst av två vattenhål, diken och brunnar för dränering (täckdikningssystem) vilket möjliggör en eventuell bedömning av grundvattennivåer på platsen.

Bilder tagna från fältbesöket presenteras nedan i figur 4.3.



Figur 4.3: Mild vegetation och blöt mark (vänster), dikesföretag (centrum) och vattenhål (höger).

Utifrån det som beskådades från fältbesöket, gjordes justeringar av linjedragningen för att inte försvåra fältmätningarna.

Ledningskollen

Ett ärende på Ledningskollen utfördes för att ge en förhöjd förståelse för placering och typ av ledningar i och kring undersökningsområdet. Detta ger undersökningsgruppen möjlighet att anpassa sina metoder och tekniker för att undvika konflikter eller störningar. Dessutom kan det bidra till att identifiera potentiella områden där tidigare ingrepp har skett och därmed ge en mer korrekt tolkning av geofysiska data i ett senare skede. Genom att integrera ledningsinformation i den konceptuella modellen får man en bättre helhetsbild av området, vilket i sin tur kan leda till mer noggranna och tillförlitliga resultat från de kommande syntetiska modelleringarna och geofysiska undersökningarna. Resultatet från Ledningskollen visade på att det kommunalt ägda energibolaget Kraftringen har en högspänningsledning samt två mindre lågspänningsledningar som skär genom undersökningsplatsen (Ledningskollen.se, 2024). Placering illustreras i figur 4.4 nedan.



Figur 4.4: Högspänningsledning (röd) samt Lågspänningsledning (grön) inom undersökningsområdet. Bildkälla: ©Lantmäteriet (information från Ledningskollen)

Topografi

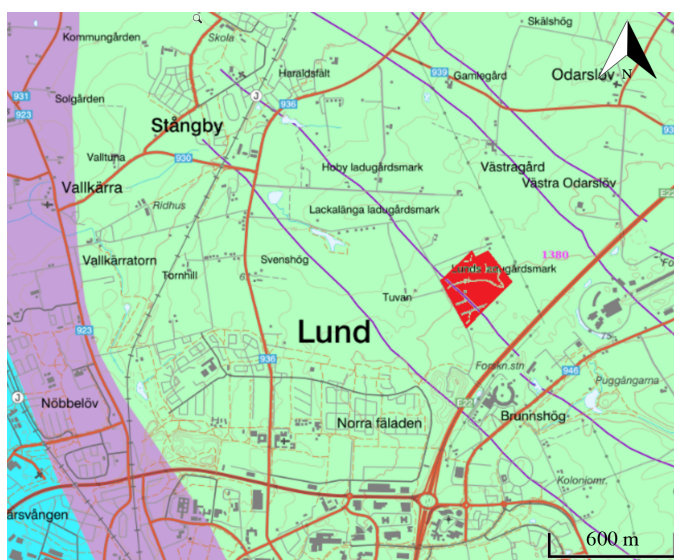
Information om områdets topografi var nästa steg. Ladugårdsmarken befinner sig på en plåtå i nordvästra sluttningen av Romeleåsen, vilket gör att omgivande landskap i stort är mer låglänt och svagt lutande (Persson och Göransson, 2010). Topografien över platsen som undersöks redovisas i figur 4.5, där ett tvärsnitt parallellt med drönarmätningarna illustrerar en möjlig linjedragning utan större hinder samt dess topografiska variation.



Figur 4.5: Höjdkurvs-karta av Ladugårdsmarken med möjlig linjedragning. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

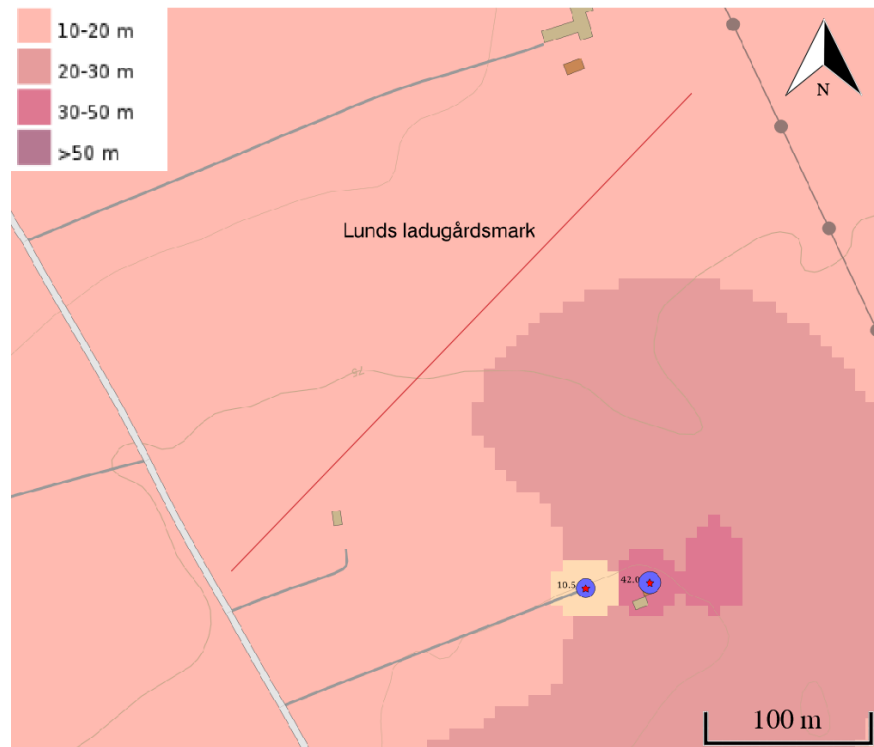
Berggrund

Det översta lagret av berggrunden omkring fastigheten Ladugårdsmarken har den litologiska benämningen colonusskiffer och förekommer i ett stråk genom Skåne från sydost till nordväst. Bergarten som är lokal för området i Ladugårdsmarken benämns skiffer och har en bergartskemi bestående av silikatmineral (SGU, u.å.). Diabasgångar återfinns i samma riktning som skiffern utbreder sig i och har rimligtvis liknande mäktigheter som omkringliggande bergart. Diabas har enligt en undersökning av SGU (2007) generellt både högre resistivitet och seismisk ljudvågshastighet än omkringliggande bergart vilket motiverar tyngden av att representera gångbergarten i den konceptuella modellen. Nedan i figur 4.6 illustreras situationen för det rödmarkerade undersökningsområdet.



Figur 4.6: Colonusskiffer (grön) med inslag av diabas (lila) inom Ladugårdsmarken. Bildkälla: SGU (berggrundskartan).

Enligt SGU (u.å.) bedöms jorddjupet på Ladugårdsmarken vara minst 10-20 m. Borrhålsdata från närliggande hus visar på jordmäktigheter mellan 10,5 och 42 m. Även om huset ligger strax utanför undersökningsområdet, fungerar dess borrhålsdata som värdefullt underlag för att uppskatta jordmäktigheterna i omgivningen. Enligt figur 4.7 förväntas jordmäktigheten vara i intervallet 10-30 m beroende på placeringen. Denna bedömning stöds av både SGU:s kartvisare och borrhålsdata från närliggande områden.



Figur 4.7: Jordmäktigheten för Ladugårdsmarken med preliminär linjedragning. Bildkälla: SGU (Jorrdjupskarta).

Jordlagerföljder

Jordlagerföljden på området baseras främst på data från följande källor:

- SGU:s geologiska kartunderlag för lagerföljder (SGU, u.å.).
- Brunn och borrhålsdata från SGU (SGU, 2024) & (SGU, u.å.).
- Geologisk utredning av området Hässleholm-Lund (SGU, 2020).

Inom området Ladugårdsmarken dominerar ett övre mineraljordlager av moränfinlera som tidigare beskrivits som lågbaltisk moränlera. Utbredningen är stor och sträcker sig till området runt Norra Eslöv där den övergår till en lerig morän. Ingen större variation förekommer ytligt på undersökningsplatsen (SGU, u.å.).

Borrhålsdata i tabell 4.1 nedan presenterar en sammanfattning av jordlagerföljder och berggrund från 13 borrhål i och runt fältundersökningsområdet via kartunderlaget av SGU, 2024. Lokaliseringen av borrhålen visas i figur 4.8.



Figur 4.8: Lokalisering av borrhål. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Borrhålen visade på att de övre lagren består av moränlera som vilar på en lerskiffer. Nivån på jordlagren var spridd men tolkades för undersökningsområdet genom interpolering av angivelserna från omkringliggande mätningar. Från Ising m. fl. (2019) noterades en överliggande yngre lågbaltisk moränlera med en lerhalt på 20-30% och en mycket låg halt av block. Moränleran är överkonsoliderad och ska enligt rapporten vara stabil med undantag av flytning vid stora vattenflöden. Mäktigheten kan variera från 5-10 m beroende på topografi. Eftersom den lågbaltiska moränleran enligt litteraturstudien är bildad i en issjö finns ofta linser av issjösediment som glacial lera, silt och finsand upp till grus. Detta kan bekräftas av borrhålsloggningarna i tabell 4.1 där borrhålen BMW182122 och BMW182005 visar på finsandig silt på 6-7 m djup. Borrhålet 22400589 är precis som tidigare nämnda brunnar lokaliserat nordost om undersökningsplatsen och påvisar sorterat grus på 7-8 m djup. Detta tyder på att en lins av sorterat sediment kan lokaliseras straxt norr om undersökningsområdet och skulle möjligtvis kunna representera den undre gränsen för den lågbaltiska moränleran. Under dessa lager ner till berggrunden, som enligt borrhålen består av skiffer, finns enligt utredningen ett lager av den äldre Nordostmoränen, som dominerar längre norrut. Lagret består vanligen av en lerig, sandig morän med en lerhalt på 10-20% som är hårt konsoliderad och homogen. Mäktigheten där bedöms enligt SGU vara markant större än den lågbaltiska moränen och kan underlagras av äldre jordarter. Detta påstående stöds ej av de borrhållningar som gjorts på platsen och utesluts därmed från den konceptuella modellen.

Nedan i tabell 4.1 presenteras brunn- och borrhålsdata.

Tabell 4.1: Borrhålsdata i närområdet Ladugårdsmarken.

Borrhål-ID	Djup (m)	Nivå (m.ö.h)	Lagerföljd
BMW182004	0–2,5	77–74,5	Sandig moränlera
	2,5–6,3	74,5–70,7	Moränlera
MGN2013012924	0–6	66–60	Stenig lera
	6–7	60–59	Blå skiffer, tämligen mjuk
BMW182005	0–0,3	75–74,7	Mulljord
	0,3–6,3	74,7–68,7	Moränlera
	6,3–7	68,7–68	Finsandig silt
BMW182122	0–0,3	74–73,7	Mulljord
	0,3–6,5	73,7–67,5	Moränlera
	6,5–7	67,5–67	Finsandig silt
MGN2015060905	0–4	63–59	Lera
	4–4,2	59–58,8	Grov grus
915546183	0–10,5	80–69,5	Moränlera
	10,5–15	69,5–65	Skiffer (uppsprucken övergång)
22400754	0–11	66–55	Lera
	11–55	55–11	Lerskiffer
999074255	0–1	64–63	Torv
	1–27	63–37	Moränlera
	27–103	37–(-39)	Lerskiffer
22400589	0–7	65–58	Brunn
	7–8	58–57	Grus
	8–57	57–8	Lerskiffer
913524432	0–10	77–67	Moränlera
	10–28	67–49	Skiffer
	28–29,5	49–47,5	Diabas
	29,5–33	47,5–44	Skiffer
916103517	0–2	85–83	Grusig lera
	2–18	83–67	Lera
	18–20	67–65	Lersten/skiffer
	20–200	65–(-115)	Skiffer
913084626	0–42	81–39	Jord
	42–65	39–16	Berg
22400009	0–14	79–65	Stenig lera
	18,3–40	60,7–39	Skiffer

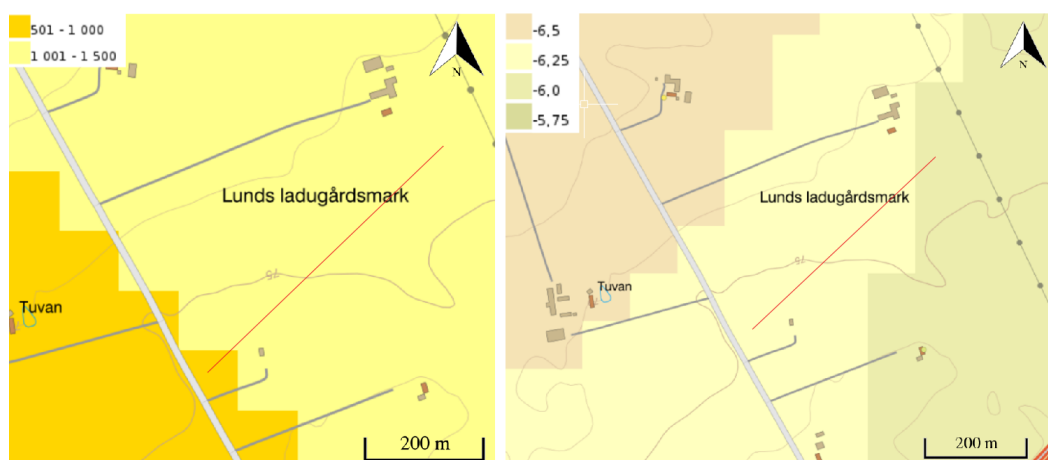
Hydrogeologi

För att få en bra tolkning av markförhållandena, och därmed resistivitet och seismisk hastighet i marken, behövdes en hydrogeologisk tolkning. Grundvattenytan i området baserades på borrhålsdata från 8 av de 13 borrhålen som tidigare presenterats i tabell 4.1. Grundvattennivå, flöde och tidpunkt för mätning presenteras nedan i tabell 4.2. Från sammanställningen av tabell 4.2 ovan följer grundvattennivån topografin på ett jorddjup av 3-8 meter över det stora område som är mätt. Borrhål 91554618 i utkanten av undersökningsområdet visar ett artesiskt flöde vid 11,5 m. Detta betyder att den piezometriska tryckhöjden är betydligt närmare markytan, enligt mätningar 0,7 m. Anmärkningsvärt var att borrhålet hade loggningen “Skiffer (uppsprucken övergång)”.

Tabell 4.2: Grundvattennivåer och flöden.

Borrhål (ID)	Grundvattendjup (m)	Grundvattennivå (m.ö.h)	Vattenmängd l/h
915546183	0,7	79,3 (2015-04-21)	Artesisk vid 11,5 m djup
22400754	5	61 (1987)	600
999074255	3	61 (1999-08-18)	180 (manganrikt vatten)
22400589	4	61 (1982-09)	240
913524432	5,4	71,6 (2013-03-27)	3000 (gradborrning 30)
916103517	8,8	76,2 (2016-08-15)	600
913084626	9	72 (2012-11-07)	1200
22400009	8	71 (2005-11-01)	2400

Grundvattenmagasinen i området bedöms enligt figur 4.9 kunna transportera vatten inom intervallet 500-1500 l/dygn/ha med majoriteten av arealen inom intervallet 1000-1500 l/dygn/ha. Som ovan nämnt uppstod det vid borrhål 915546183 i tabell 4.2 ovan ett artesiskt flöde (trycksatt vatten) som sträcker sig upp till 0,7 m under markytan. Eftersom marken här består av moränlera, kan det tyda på att brunnen kom i kontakt med en vattenfylld sprickzon i berggrunden. Enligt figur 4.6 sträcker sig en diabasgång märkbart nära borrhålet. Detta kan innebära en mer uppsprucken, vattenförande zon, vilket togs med i den konceptuella modellen. Figur 4.9 visar dock inte på några större hydrauliska variationer i området. Nedan presenteras variationen och storleken på den hydrauliska konduktiviteten i området. Den hydrauliska konduktiviteten i berggrunden visar sig generellt vara inom spannet log (6,0 - 6,5) m/s. Brunnarna 22400754 och 913084626 enligt figur 4.8 , visar på en hydraulisk konduktivitet snarlikt berggrundens.



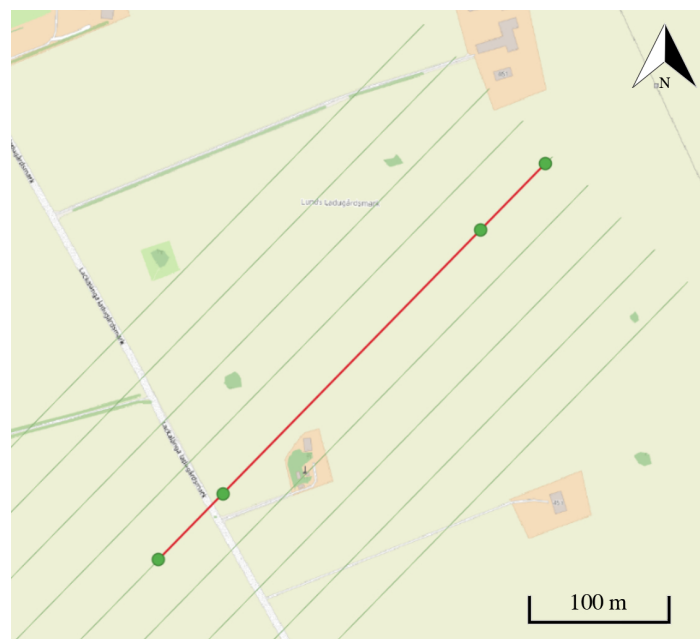
Figur 4.9: Grundvattenmagasin (l/dygn/ha) i området (vänster). Hydraulisk konduktivitet (Log-K) i brunn och berggrund (höger). Preliminär linjedragning i rött. Bildkälla: SGU (Grundvattenmagasin, små & Hydraulisk konduktivitet i berg).

Geoteknisk förutsättning

De geotekniska förutsättningarna vid Ladugårdsmarken antogs vara goda då moränerna enligt litteraturstudien var hårt konsoliderade. Från borrhål går det däremot att se spår av grövre kornfraktioner, vilket kan tyda på att det finns intermoräna permeabla lager. Om dessa lager är starkt vattenförande kan dräneringsåtgärder vara nödvändiga vid djupare grundläggning som skärning.

Sammanställning

För att konstruera en visuell modell över marken valdes ett tvärsnitt som går längs med en av de drönarflygningar som tidigare har gjorts av SGU, för att på så sätt kunna koppla tidigare drönarburen geofysik till de kommande fältmätningarna. Eftersom ytgeologin i området inte förändras märkbart inom undersökningsområdet valdes därmed en sträcka som var praktisk och tillräckligt lång för att ha marginal på minst 100 meter utanför den verkliga mätlinjen. Detta gjordes för att ge möjlighet för justering av mätområde om något oförväntat skulle uppstå. Linjen skulle om möjligt undvika att skära hinder och problematiska objekt samtidigt som den skulle ge intressant data, vilket enligt SGUs rekommendation var mer sydväst. De linjer som drönaren flugit längs med är presenterade i figur 4.10 nedan (tunna gröna linjer) medan den föreslagna tvärsektionen till den geologiska modellen markerats i en fetare röd linje.



Figur 4.10: Drönarflygningar (grön) och föreslagen mätlinje (röd). Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Linjen markeras av gröna punkter som illustrerar gränserna för de yttre periferierna av den konceptuella modellen, där de inre representerar mätområdet. Tabell 4.3 visar koordinaterna för start och slutpunkt. Samtliga koordinater i rapporten anges i SWEREF 99 TM.

Tabell 4.3: Start- och slutkoordinaterna för den konceptuella modellen vid Ladugårdsmarken.

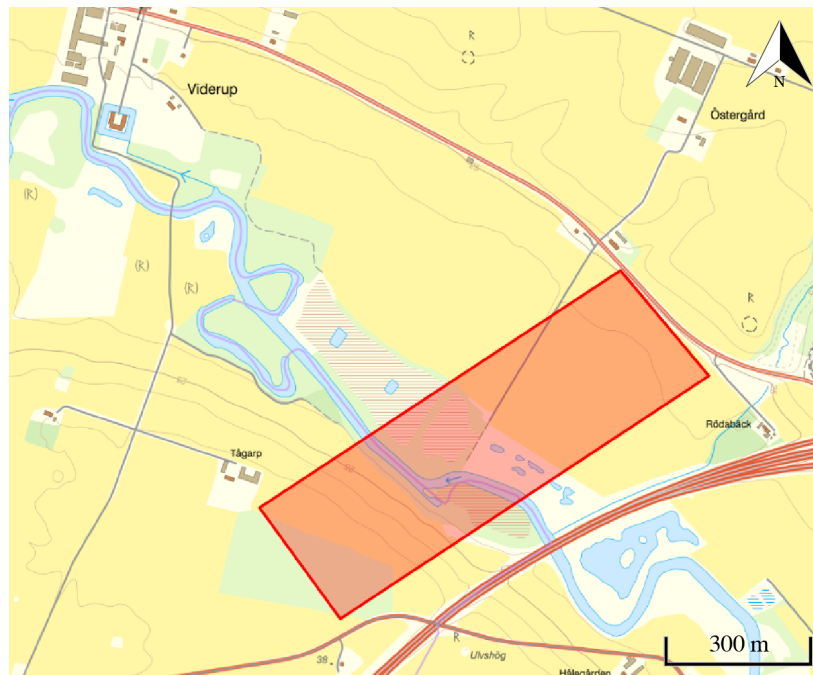
Start	Slut
E: 388647	E: 388926
N: 6177942	N: 6178228

Eftersom inga borrhålsloggningar finns tillräckligt nära mätlinjen finns det utrymme för olika tolkningar av den information som finns tillgänglig över geologin. Därav kommer 3 alternativa modeller presenteras nedan i bilaga A för att kunna jämföra och utesluta geometrier och antaganden vidare i arbetet.

4.1.2 Viderup

Områdesbeskrivning

Det andra området som undersöks är beläget vid Kävlingeån, nordväst från E22:an och sydost om Viderup slott. Området omfattas av åkermark till nord och syd om ån samt ett mindre skogsområde precis vid ån som har en betydelse vid häckningssäsongen för vissa fågelarter. Även här har det utförts drönarmätningar vilket visas i figur 4.11 nedan.



Figur 4.11: Området kring Kävlingeån med Viderup slott i nordväst. Drönarmätningarna var utförda innanför rektangeln (rödmarkerat). Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Valet av detta undersökningsområde hade att göra med dess intressanta geologi vilket från geologiska kartor antydde varierande avlagringar längs med ån. Betydande mängder fina sediment och förekomsten av mer permeabla lager gjorde att området bedömdes vara av intresse. Området som valdes att utredas är inom den rödmarkerade zonen i figur 4.11, nordost om Kävlinge ån. Detta valdes då marken ägdes av en och samma markägare och för att SGU:s drönarmätningar tydde på mer variation.

Bruk/Historia

Från Lantmäteriets kartvisare undersöktes flygbilder från ungefär 1975 och 1960, se figur 4.12 (Lantmäteriet, 2024). Från dessa bilder gick det att urskilja ett område på åkermarken i nordöstradelen av mätområdet, som tidigare verkar ha varit igenvuxen. Flygbilden från 1960 visar även en tidigare järnväg som gått igenom området som sedan har tagits bort. Det tillvuxna området intill ån verkar också ha varit vattenfyllt på 60-talet och de träd som kan ses idag är borta. Enligt folk i området fungerar detta som en urdikning åt omkringliggande åkrar.



Figur 4.12: Flygbilder från området vid Viderup från 2023 längst upp, ca. 1975 i mitten och ca. 1960 längst ned. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Fältbesök

Ett fältbesök genomfördes den 26 januari 2024. På dagen var vattennivån i Kävlingeån, ovanligt hög. Dagarna innan besöket hade stora mängder snö smält i Skåne vilket kan förklara den höga vattennivån. Området intill ån var totalt översvämmat tillsammans med några lägre områden på åkern, vilket begränsade möjligheten att utforska längs hela den planerade linjedragningen. Ett staket noterades även gå längs den nedre delen av åkern, vilket förhindrar den kontinuerliga mätningen från ån utmed fältet.

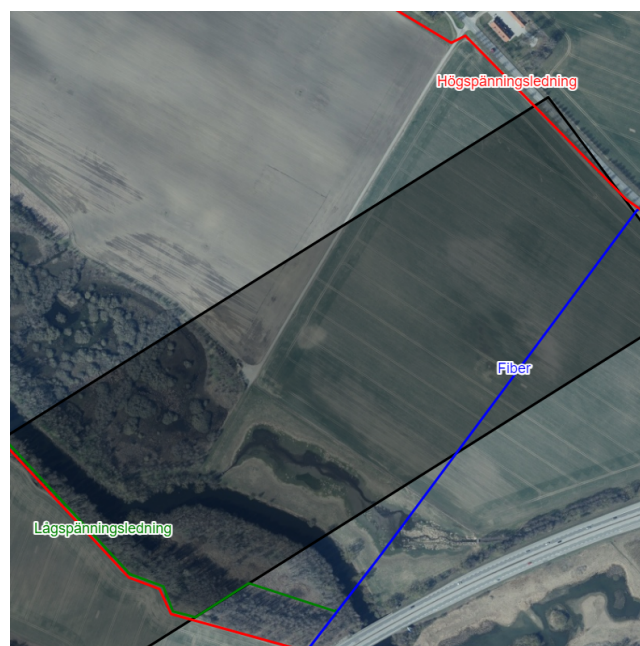
En uppsättning brunnar tillhörande ett täckdikningssystem noterades även vilket inte anmärktes från flygbilderna, figur 4.13.



Figur 4.13: Bilder tagna från fältbesöket på översvämningen och diktningssystem.

Ledningskollen

Ett utdrag ur Ledningskollen.se (2024) beställdes även för Viderup och sammanfattas i figur 4.14. Undersökningen visade att Skånska energi har elledningar i området men dessa verkade inte påverka projektet då de är belägna på södra sidan av Kävlingeån samt precis utanför det anmärkta området i norr intill vägen. Geomatikk uppgav även en fiberledning som går genom undersökningsområdet, men denna utgjorde ingen vidare risk att påverka några av mätningarna då den består av glas.



Figur 4.14: Sammanställning av Ledningskollens undersökning vid Viderup där lågspänning (grön), högspänning (röd) och fiberkabel (blå) har markerats. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

Topografi

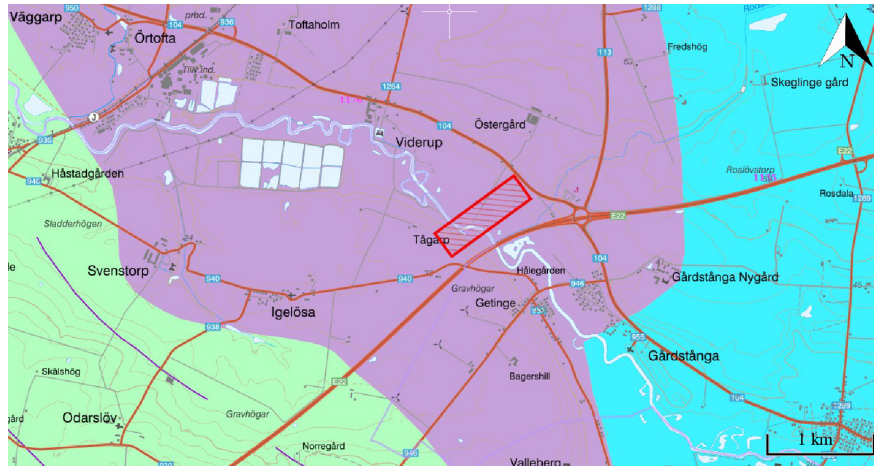
Topografin undersöktes med hjälp av Lantmäteriets kartverktyg (Min karta), på samma sätt som vid Ladugårdsmarken. Resultaten av den topografiska analysen visade en generellt plan terräng norr om Kävlingeån, med en markant brantare lutning åt söder. I figur 4.15 illustreras höjdkurvan för den valda sektionen, som sträcker sig från sydväst till nordost inom det undersökta området. Höjdkurvan har sin lägsta punkt på 16 m.ö.h. precis vid Ån och den högsta punkten på 24 m.ö.h. i sydväst.



Figur 4.15: Vald linjedragning för konceptuell modell med tillhörande topografi, uppritad i Min Karta från Lantmäteriets hemsida. Bildkälla: ©Lantmäteriet.

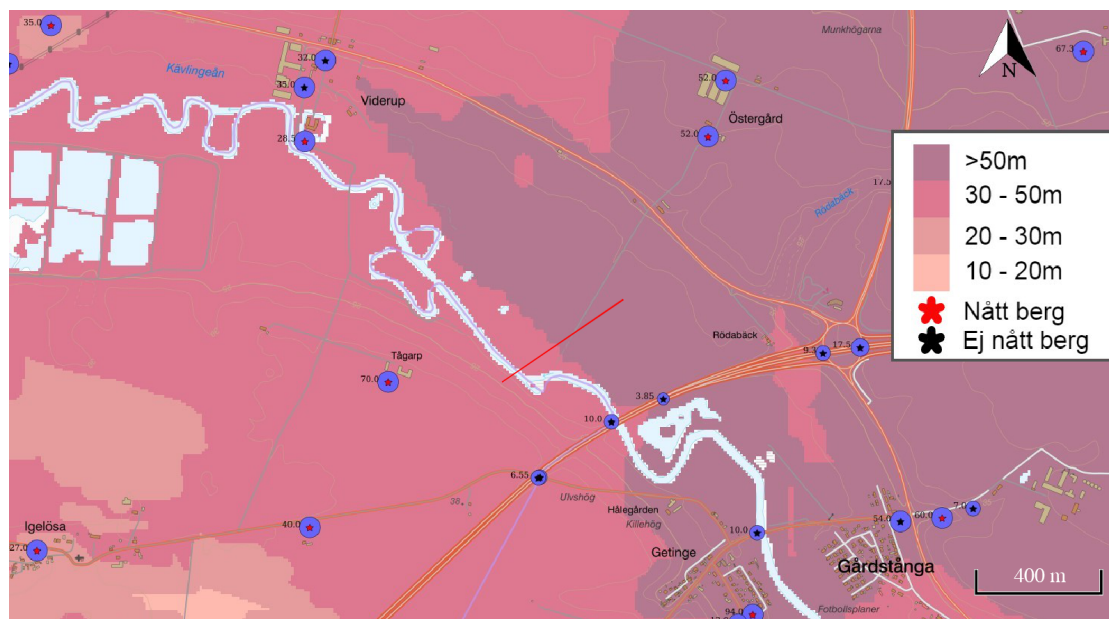
Berggrund

Berggrunden vid Viderup undersöktes även här utifrån geologiska kartor (SGU, u.å.). Bergartskartan antydde att området utgörs av lersten från yngre trias (lila), som är omringad av en yngre lersten från äldre jura (turkos), vilket ses i figur 4.16. Sydväst om undersökningsområdet framträder den äldre colonuskiffern i grönt. Denna skiffer är en del av den betydligt äldre berggrunden som sticker upp ur marken. I Ising m. fl. (2019) uppskattas den triassiska berggrunden till 20 - 50 m tjock och innehållande dåligt konsoliderad sandsten och på sina ställen konglomerat. Lerstenen har på sina ställen benämnts som innehållande/efterliknande plastisk lera. Den varierande hårdheten i berget gjorde bergytans tolkning komplicerad.



Figur 4.16: Berggrunden med undersökningsområdet markerat i rött. Bildkälla: SGU (Berggrund).

Från SGU:s jorddjupskarta och data från brunnar i området uppskattades berggrundens läge (SGU, u.å.). Figur 4.17 visar jorddjupskartan tillsammans med samtliga brunnar i området. En djupare berggrund verkade finnas till nordost om ån, som gradvis avtar till sydväst. Från brunnarna och djuplinjerna i figur 4.17 urskiljdes en djupare dalgång från sydost mot Vombsänkan som sedan jämnas ut längs med ån mot nordväst/väst.

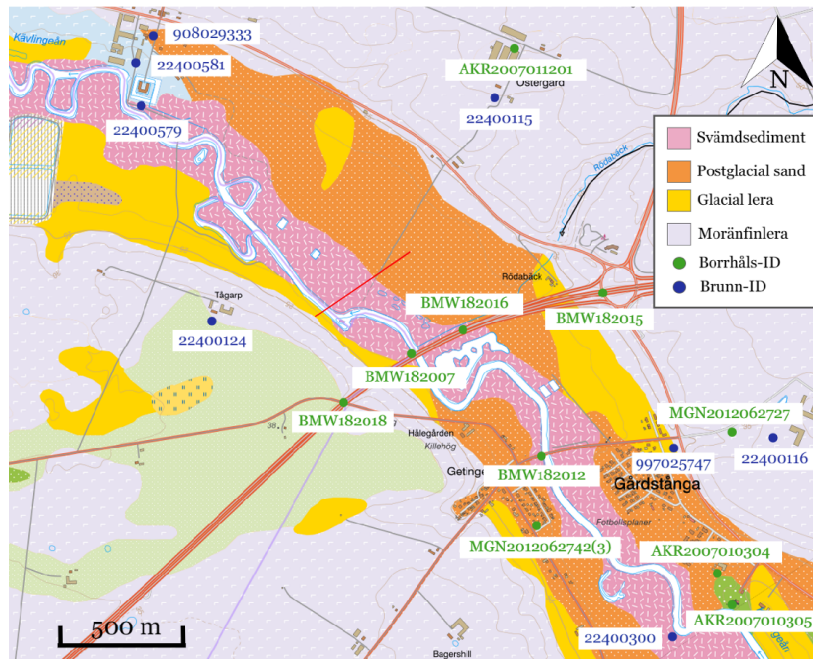


Figur 4.17: Jorddjupskarta över Viderup området med tillhörande jorddjup från brunnborrningar. Preliminär linjedragning är inkluderad i rött. Bildkälla: SGU (Jorddjup)

Topografin antydde också på att dalens mittpunkt kan ha varit mer nordost om ån och Vattenatlas (2024) karta från 1810-talet visade på att delar av ån har legat något mer nordöst. Jämförelser drogs även mellan sektionerna ur Ising m. fl. (2019) som är rekonstruerade i figur 4.20, vilket visade på en påtaglig ökning i jorddjup mellan sektion 1 och 2.

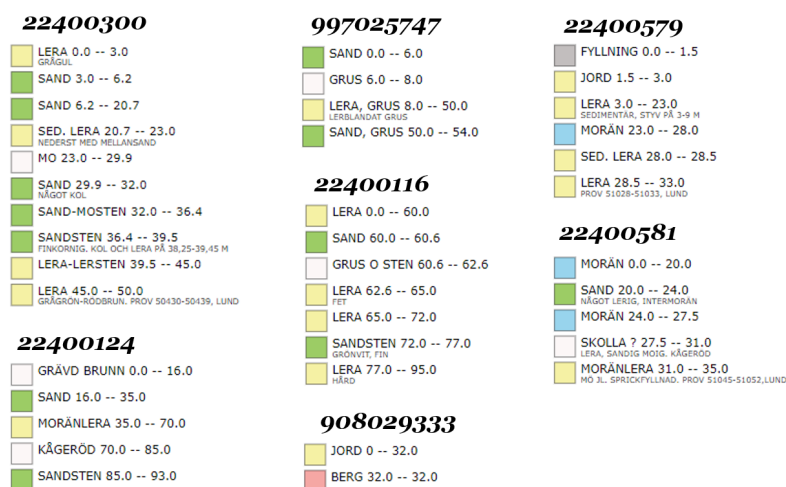
Jordlagerföljder

När Viderups jordlager skulle undersökas konstaterades lagerföljdens komplexa variation längs med ån. Jordlagren är formade efter den senaste istiden med den karakteristiska lågbaltiska moränleran synlig i närområdet, men inte i dalgången längs med Kävlingeån där den har eroderats bort. En blandning av både yngre och äldre sediment är blottade. Figur 4.18 visar jordarter från SGU:s kartvisare. De brunnar och borrhåls-ID som ansågs vara relevanta är också angivna.



Figur 4.18: Jordarter vid undersökningsområdet. Bildkälla: SGU (Jordarter)

Brunndata från Geologi i 3D av SGU (2024) användes för att bygga vidare på den litologiska uppfattningen av området. De mest intressanta brunnarna sammanfattas i figur 4.19.



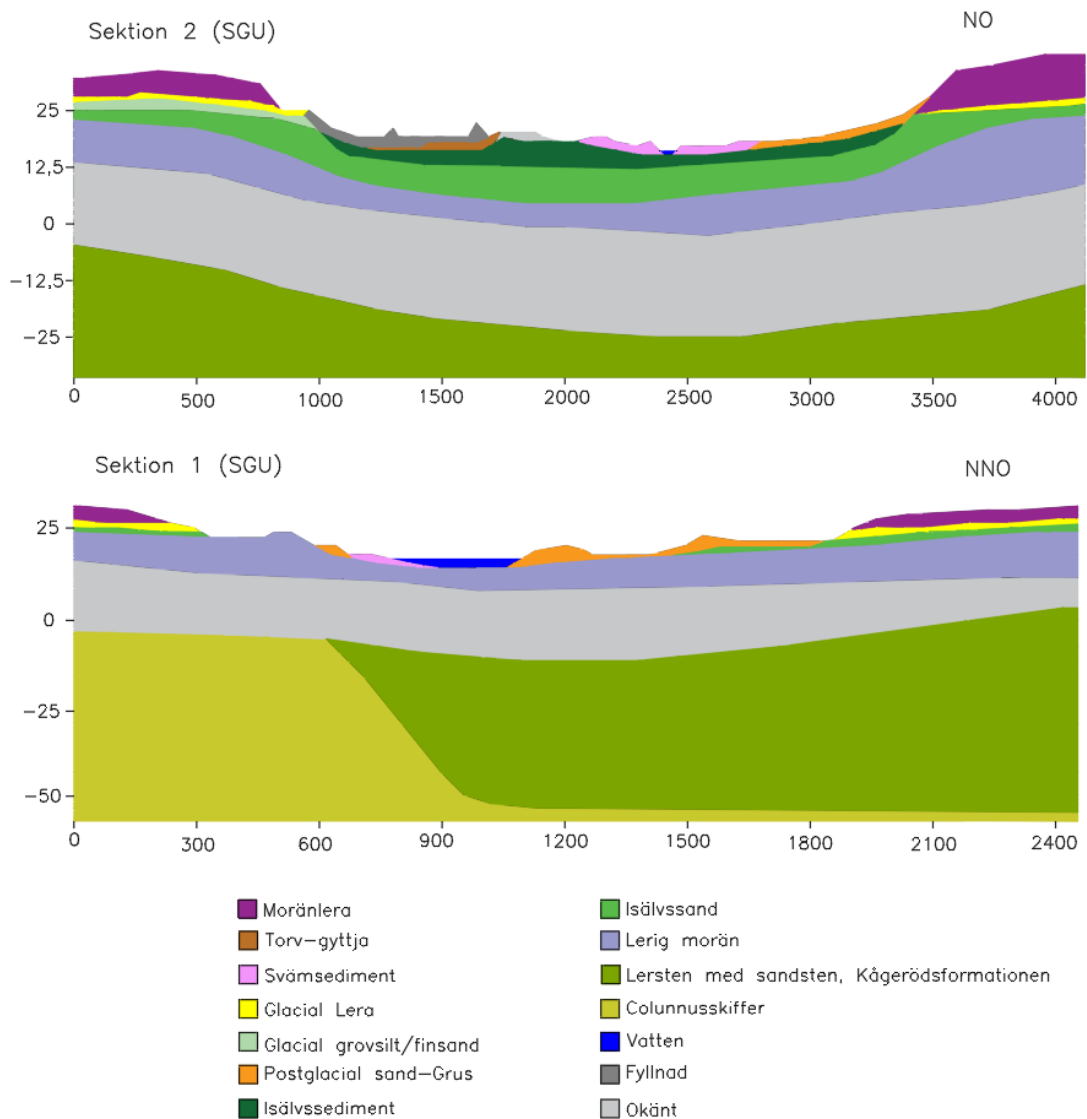
Figur 4.19: Brunndata från SGU:s Geologi i 3D program, med tillhörande brunn-ID.

De angivna borrhningarna runt området sammanställdes i tabell 4.4 för att få fram en så välutvecklad bild av jordlagerföljden som möjligt. Borrdatan var för det mesta yttlig med några undantag uppströms vid Gårdstånga där prover ner till 30 meters djup gick att erhålla.

Tabell 4.4: Sammanfattad och tolkad borrhålsloggning av de intressanta mätpunkterna från SGU:s jordlagerfölds karta.

Borrhål (ID)	Djup (m)	Nivå (m.ö.h)	Lagerföljd (Antagningar)
BMW182007	0–1.6	16–14.4	Svämsediment
	1.6–5.0	14.4–11	silt–finsand
BMW182016	0–3.35	20–16.65	Svämsediment (Växtdelar)
	3.35–3.85	16.65–16.15	Sand (Postglacial)
BMW182015	0–4.3	29–24.7	Moränlera
	4.3–5.1	24.7–23.9	Lera
	5.1–6.3	23.9–22.7	Siltig finsand
	6.3–8.3	22.7–20.7	Moränlera (Äldre?)
BMW182018	0–2.5	32–29.5	Glacial lera
	2.5–6.55	29.5–24.45	Moränlera
BMW182012	0–1.65	16–14.35	Svämsediment
	1.65–5.2	14.35–10.8	Silt-finsand
MGN2012062727	0–2.5	34–31.5	Fyllnad
	2.5–7.0	31.5–27	Varvigfinsand
	7.0–	27–	Sand och grus
MGN2012062743	0–3.75	21–17.25	Sand
	3.75–13.6	17.25–7.4	Fin sand med lerlager (Glacial lera)
	13.6–25	7.4–(-4)	Sandig och grusig lera
	25–81	(-4)–(-60)	Sand fin med lerlager, isälvssand
	81–100	(-60)–(-79)	Skiffer
AKR2007010304	0–3.9	18–14.1	Sand
	3.9–13.6	14.1–4.4	Glacial lera
	13.6–16.2	4.4–1.8	Sand
	16.2–17.8	1.8–0.2	Sandig lera
	17.8–24.6	0.2–(-6.6)	Finsand
	24.6–25.2	(-6.6)–(-7.2)	Mellansand
	25.2–27.1	(-7.2)–(-9.1)	Lerig grovsilt
	27.1–29.1	(-9.1)–(-11.1)	Morän
	29.1–31.1	(-11.1)–(-13.1)	Finsand
	31.1–31.7	(-13.1)–(-13.7)	Sandig Lera
AKR2007010305	0–3.0	20–17	Lera (svämsediment)
	3.0–20.7	17–(-0.7)	Sand
	20.7–30	(-0.7)–(-10)	Lerig Grovsilt-finsand (Glacial)
MGN2012062742(3)	0–4	21–17	Å-sediment
	4–12.3	17–8.7	steniglera (Nordostmorän)
	12.3–40	8.7–(-19)	Fet lera (styv och stenfri (Grå))
	40–54	(-19)–(-33)	Hård lera
	54–63.5	(-33)–(-42.5)	Sand, lerig siltig sand, morän
	63.5–70	(-42.5)–(-49)	Lera, moränlera
	70–	(-49)–	Sand till morän med urbergsfragment

Från den tidigare undersökning som gjordes av Ising m. fl. (2019) där geologin mellan Hässleholm och Lund undersöktes visade det sig att isälvssediment kan finnas under Kävlingeån. Sammanställningen av geologin visas i sektion 2, figur 4.20 med tillhörande läge enligt figur 4.22.



Figur 4.20: Sektion 1 & 2 från SGUs rapport 2019:03 Hässleholm–Lund – uppgraderad geologisk information inför projektering av höghastighetsjärnväg. Sektionerna var återskapade utifrån Jonas Isings arbete.

Den karakteristiska moränleran som beskrevs i kapitel 3.5.1 går att se överst i utkanten av sektionerna. En betydande mängd isälvssediment uppströms i Vombsänkan noterades, vilket motiverade teorin. Dessa avlagringar kan nå ner till bergrunden eller vila ovanpå en äldre morän. De har antagligen avlagrats från en stor isälv som forsade längs med dalgångens bergrund (SGU, 2020).

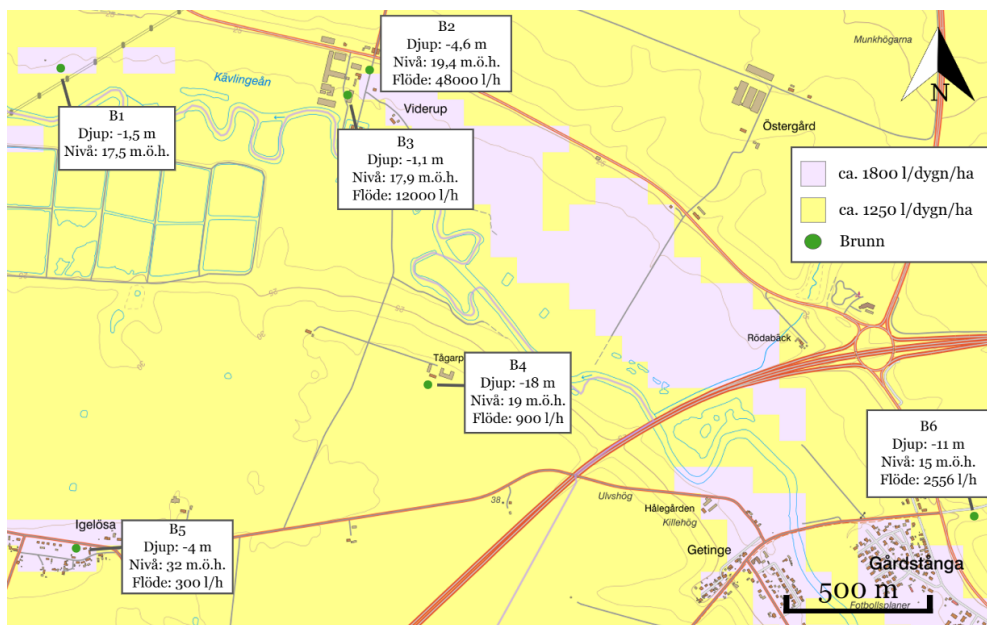
Från berggrundsundersökningen ovan noteras ett betydande djup till berg intill området som stärkte antagandet. För att underlätta förståelsen om lagerföljden vid Kävelingeån, så bröts den upp utifrån ålder från äldst till yngst enligt nedan:

- Morän: är generellt den äldsta av de lager som förväntas finnas i området och brukar vara direkt beläget mot bergrunden. I detta fall kan det handla om den sandiga/leriga nordostmoränen som kan befinna sig under samtliga lagerföljder, men det kan finnas en ännu äldre morän.

- Isälvssediment/isälvssand: Bildades efter stora mängder vatten från när isavsmältningen transporterade större sediment i gångar och mynningar. De återfinns i låga områden och kan vara beläget rakt på bergrunden.
- Glacial lera: Kännetecknas av att vara varvig (uppvisar distinkta lager) till skillnad från postglaciala leror, och har antagligen varit en tidigare sjö- eller havsbotten (SLU, 2020).
- Postglacial sand: Har avlagrats efter senaste istiden och kan ha kommit ifrån ursvallad morän eller vittrat berg, men antagligen har det transporterats från isälvavlagringarna uppströms i Vombsänkan. Sanden går att urskilja längs med hela Kävlingeån med en stor ansamling vid mynningen i Bjärred. Denna transport är kontinuerlig och sker fortfarande men på grund av att de är tyngre än de finare partiklarna transporteras de långsammare och lägger sig längre ner.
- Svämsediment: Bildas vid vattendrag som tar med sig och avlagrar sediment längs med vägen. Svämsediment har en stark koppling till vattenflödet vilket gör det vanligt att se avlagringar av svämsediment efter översvämningar, som är återkommande vid Kävlingeån. Avlagringarna är finkorniga (främst ler & silt), sorterade och är de yngsta av jordlagren då det krävs mindre energi för att suspenderas.

Hydrogeologi

Hydrogeologins tolkning inleddes med att uppskatta grundvattenytans nivå i området. Detta gjordes med hjälp av SGU:s brunndata samt interpolering med hänsyn till vattennivån i Kävlingeån. I figur 4.21 visas den grundvattendata som användes från brunnsarkiv i området runt Viderup (SGU, u.å.) . Notera att både djup och nivå på grundvattnet är angivna i figur 4.21, tillsammans med flödet och grundvattentillgången. Kävlingeåns vattennivå antogs kunna motsvarar den grundvattennivå som marken precis intill ån bör ha. Denna nivå blev en riktlinje att utgå ifrån när grundvattenytan sedan skulle interpoleras. Flödet ur brunnarna är också relevant för att ge en förståelse kring hydrogeologin i området, där brunn B2 och B3 sticker ut med höga flöden. Grundvattennivån i figur 4.21 kan ses stiga mot sydväst längs med den topografiska höjningen. Nivåerna närmast ån (B1 och B2) är mellan 17-18 meter över havet med en avvikelse för brunn B6 där den är lägre på 15 meter över havet. Den postglaciala sanden borde fungera som en öppen akvifer vilket tillåter en god vattentillgång vilket antyds av brunn B2 i figur 4.21. Flödena norr om ån är också markant högre än brunn B4 och B5 vilket antagligen beror på de sorterade sedimenten vid B2, B3 och B6 samt att de södra brunnarna är betydligt djupare vilket tolkades som att de borades för bergvärme och inte vattentillförsel. Datum för grundvattennivåmätningarna är: 1961-11 (B1), 2007-04-26 (B2), 1981-09 (B3), 1958-05 (B4) och 2008-08-22 (B5), där brunn B6 saknade datum. Notering kring osäkerheten gällande antaganden med grundvattennivåer från skilda säsonger och decennier gjordes, men med brist på mer uppdaterad och noggrann data, togs ändå dessa värden i beaktande.



Figur 4.21: Brunnndata kring området runt Viderup. I rutorna står generell brunnbetäckning, vattendjup från marknivå, nivå över havsytan genom subtraktion från Lantmäteriets angivna nivåer, samt flöde i liter per timme. Bildkälla: SGU (Brunnar).

Grundvattentillgången i området varierar något vilket illustreras i figur 4.21 från SGU (u.å.). Området med högre tillgång matchar partiet med postglacial sand enligt figur 4.18, vilket har högre permeabilitet än de material som innehåller finare sediment.

Den hydrauliska konduktiviteten i berget överensstämde väl med brunn B4 och relativt väl för B5. B4 har en ledningsförmåga på $\log K = -6.14$ och berget på $\log K = -6.17$ medans B5 har $\log K = -7.1$ och berget $\log K = -6.31$ (SGU, u.å.). Liknelserna i den hydrauliska konduktiviteten för brunn B4 och B5 stärkte antagandet om att brunnarna används för bergvärme.

Geoteknisk förutsättning

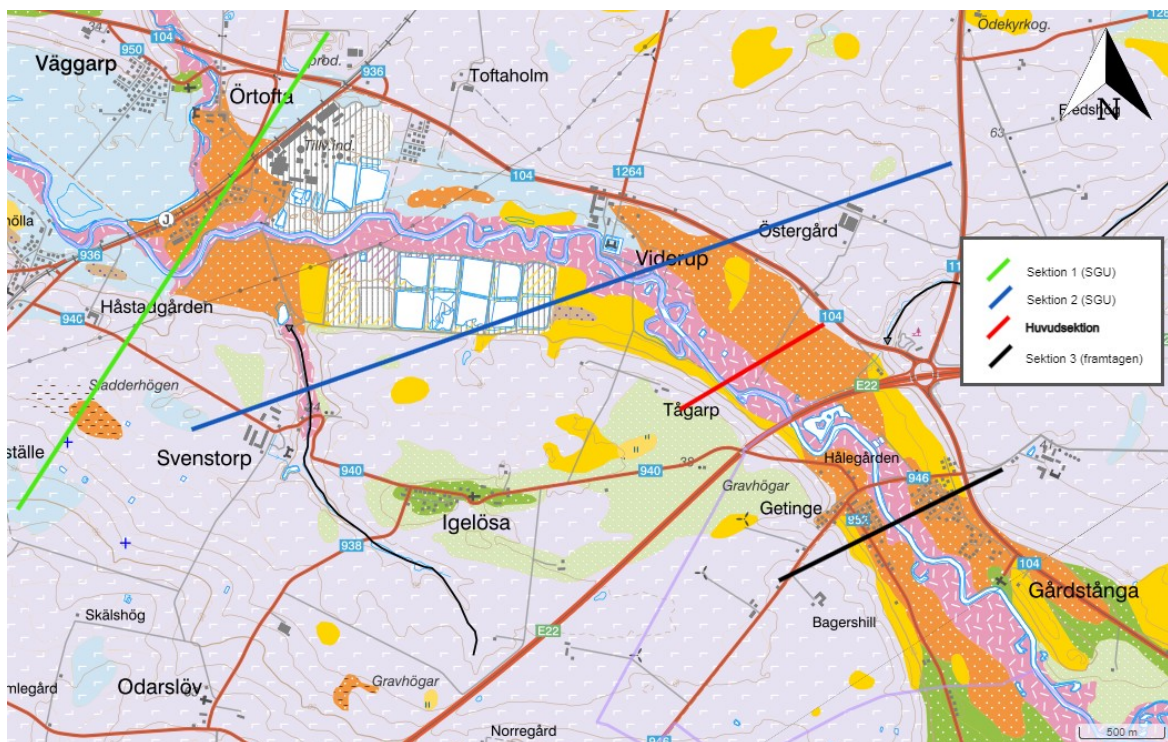
Inför sammanställningen gjordes tillsist en lätt geoteknisk tolkning med hänsyn till höghatighetsjärnvägen. Då området är i en dalgång och spåret måste korsa en å, så utgick resonemanget från en brokonstruktion. Den underliggande moränen anstågs vara väl konsoliderad och därmed ha goda geotekniska förutsättningar. Lerstenen i det regionala området verkade däremot inte särskilt fast och kan ha misstolkats som jord i vissa brunnborrningar, vilket SGU (2019 Ising m. fl., 2019) påpekar är korrekt ur en geoteknisk synvinkel. Därför kan djup till fast berggrund vara betydligt mäktigare än djup till berg. De finare materialen från svämsedimenten och den glaciala leran har dåliga geotekniska förutsättningar. Svämsedimenten kan gå att schakta bort men underliggande lerlager kan vara av intresse att identifiera. Underliggande permeabla lager så som sand kan också skapa problem, särskilt med överliggande finsediment, då schaktingsarbetet kan orsaka påtagliga dräneringsbehov. Från SGU (u.å.) råder ett aktsamhetsområde kring Kävlingeån för skred i finkornig jordart.

Sammanställning

I detta skede samlades den information om området som var relevant för att sedan sammanställa allt till de konceptuella modellerna som undersökningarna kommer att bygga på till den slutliga geologiska modellen.

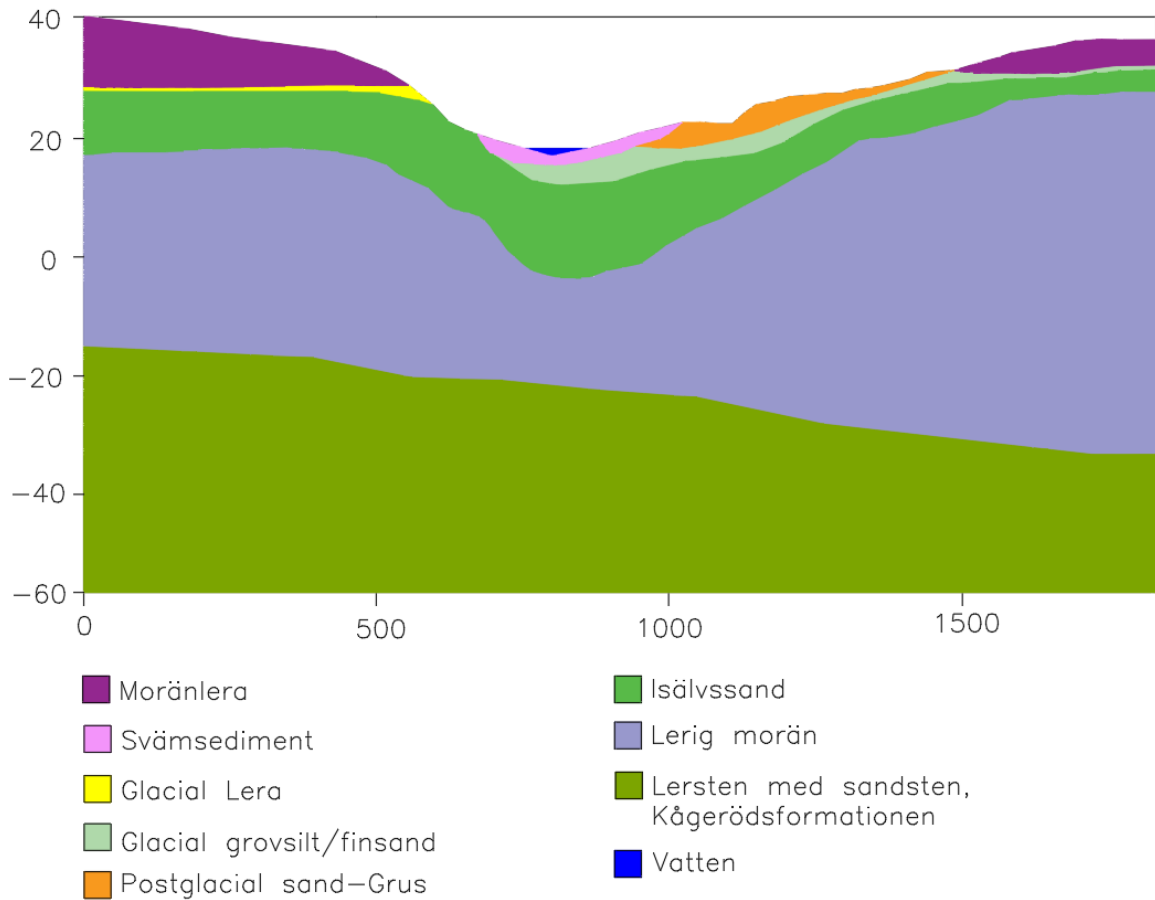
De olika komponenterna i den konceptuella modellen byggdes upp separat för att sedan kombineras till en detaljerad uppskattning av markförhållandena. Sektionerna inleddes med val av skala avseende relevant djup och längd av sektionen. Därefter infördes topografin följt av en uppskattad berggrund längs den valda sektionen som lämnar plats åt den varierande lagerföljden att införas. Grundvattenytan uppdaterades utifrån fältbesöket, då extremt våta förhållanden gjorde att marken i stort sätt ansågs vara vattenmättad. Sist beaktades områdets användning, så som befintliga vägar som korsar sektionen.

Figur 4.22 visar läget för huvudsektionen samt de befintliga sektionerna 1 och 2 från Ising m. fl. (2019) som visade lagerföljden genom Kävlingeån nedströms. Sektion 1 och 2 nedströms utnyttjades tillsammans med sektion 3 uppströms, för att interpolera fram huvudsektionen. Detta gjordes för att i 3D försöka visualisera hur jordlagren fluktuerade under marken längs med Kävlingeån.



Figur 4.22: Jordartskartan med sektionerna som bidragit till framställandet av huvudsektionen i rött, Bildkälla: SGU (Jordarterskarta & Geologi i 3D).

Figur 4.23 nedan visar den tolkade lagerföljden längs sektion 3, där det fanns mer tillgänglighet till borrh- och brunn-data från SGU. Beteckningarna varierade däremot i noggrannhet och trovärdighet, men försöktes sammanfattas i generella termer utifrån de beteckningar som användes för sektion 1 och 2.



Figur 4.23: Uppskattad litologisk tolkning av sektion 3 utifrån brunn- och borrhdata från SGU

I och med att osäkerheten i huvudsektionen var så stor, så gjordes tre tolkningar för hur jordlagren och berggrunden fördelar sig under marken. Likadant som för Ladugårdsmarken skapades samtliga sektioner i Auto CAD och presenteras i figur 5.2 under kapitel *Resultat, Konceptuella modellerna, Viderup*. Koordinaterna för huvudsektionens tolkningar är angivna i tabell 4.5 nedan.

Tabell 4.5: Start- och slutkoordinater för den konceptuella modellen vid Viderup. från linjen i figur 4.15

Start	Slut
E: 393265	E: 393761
N: 6181753	N: 6182093

4.2 Materialparametrar

Efter de konceptuella modellerna hade sammanställts, behövde fysikaliska egenskaper för samtliga lager undersökas. Värden uppskattades bland annat från resistivitmätningar i närområdet av Leveen och Palm (2000) vid Tornhill och SGU:s SkyTEM mätningar över vombsänkan (SGU, 2024). Även mindre specifika mätningar där figur 4-2 och 4-3 i Triumphs bok Geofysik för geotekniker gav generella intervall över resistivitet och P-vågshastigheter för olika jord- och bergarter, med hänsyn till grundvatten (Triumpf, 1992). Vatten och packningsgrad påverkar dessa värden kraftigt, och med tanke på hur vått det var under fältbesöken ansågs inget lager vara klassat som torrt. Därför är skillnaden i p-vågshastighet och resistivitet under och över grundvattenytan åt det lägre hållet än intervallen som Triumpf uppgav.

För de fall då det fanns tidigare mätningar i närområdet eller mer specifika uppskattningar från liknande geologiska enheter, så prioriterades dessa värden. Det togs även hänsyn till lagerföljden, fuktighet och packningsgrad. Samtliga materialparametrar för Viderup och Ladugårdsmarken presenteras i tabell 4.6 och 4.7, med tillhörande källor.

Tabell 4.6: Ladugårdsmarkens litologi och dess tillhörande fysikaliska parametrar.
(R=resistivitet, S=seismik)

Lager	Res [Ohm-m]	Hast [m/s]	Källa	Anmärkningar
Mulljord	40	400	R: Triumpf, 1992, Leveen och Palm, 2000 S:Triumpf, 1992	R: Värden i Leveen och Palm, 2000 var tagna i närområdet. S: Ansågs lösast och därmed långsamast.
Lågbaltisk morän	25	1700	R: Leveen och Palm, 2000 S:Triumpf, 1992	R: Som ovan S: Relativt lös moränlera
Lågbaltisk morän (vattenmättad)	15	2000	R: Leveen och Palm, 2000 S:Triumpf, 1992	R: Något lägre än torr. S: Något snabbare.
Intermoräna sediment	500	700	R: Triumpf, 1992 S:Triumpf, 1992	Värden från Triumpf, 1992 för sand.
Nordostmorän	50	2000	R: Leveen och Palm, 2000 S:Triumpf, 1992	R: Värden i Leveen och Palm, 2000 var tagna i närområdet. S: Mer konsoliderad (snabbare än den lågbaltiska).
Diabas	20000	6500	R: Nwachukwu m. fl., 2017 S:Triumpf, 1992	R: Ansågs vattenledande i skiktet mellan diabasen och lerstenen (lägre resistivitet). S: Övre gränsen för prekambrisk bergarter.
Lerskiffer (colonusskiffer)	200	3500	R: SGU, 2024 S:Wilke m. fl., 2012	R: Uppskattad från SkyTEM. S: Från Wilke m. fl., 2012s lerskiffer.

Tabell 4.7: Viderups litologi och dess tillhörande fysikaliska parametrar. (R=resistivitet, S=seismik)

Lager	Res [Ohm-m]	Hast [m/s]	Källa	Anmärkingar
Mulljord	40	400	R:(Triumf, 1992), Leveen och Palm (2000), Williams m. fl. (2018) S:Triumf (1992)	Som för Ladugårdsmar- ken.
Svämsediment	50	700	R:SGU (2024), Williams m. fl. (2018) S:Triumf (1992)	Antaget våt lerig/siltig sand.
Postglacial sand	300	600	R:Triumf (1992), Jeppsson och Dahlin (2013) S:Triumf, 1992	R: Från SGU (2024) vid Vombsjön. S: Mellan vått och torrt (ytnära).
Postglacial sand (vattenmättad)	100	1400	R:SGU (2024), Triumf (1992) S:Triumf (1992)	Lägre resistivitet högre hastighet.
Isälvs sediment	70	1000	R: SGU (2024) S:Triumf (1992)	Ansågs finkornig i brunnar och borrhningar i området. R: Inspererad från isälvs- sediment i vombsänkan.
Isälvs sand	150	1500	R: Williams m. fl. (2018) S:Triumf (1992)	Lagret har antagligen en del finare korn i sig från ovanliggande lager (lägre resistivitet än postglaciala sanden).
Lerig morän (vattenmättad)	100	2000	R: Leveen och Palm (2000), SGU (2024) S:Triumf (1992)	Välkonsoliderad och lik- nande nordostmoränen från ladugårdsmar- ken.
Kågeröd (lersten/ sandsten)	60	3000	R: SGU (2024) S:Ahokangas m. fl. (2021), Triumf (1992)	R: Visar på låg resistivitet SGU (2024). S:Ahokangas m. fl. (2021) mätte hastigheter på 2000-3000m/s för vittrad sandsten i en sänka.
Okänt lager	80	2500	-	Interpolering mellan NO och lersten. Sandrikt inne- håll ger ca [80] ohm.

4.3 Syntetisk modell

Den syntetiska modelleringen gjordes i PyGimli. Programmets nedladdnings- och inläringstid bokfördes för att kunna ge en tidsuppfattning av hur lång tid det kan ta för en oerfaren konsult att börja använda syntetisk modellering. Med hjälp av exempelkoder för både refraktionsseismik och ERT, utvecklades anpassade koder med bland annat ny geometri, materialparametrar och optimerbar sensorplacering (pyGimli, 2024b) & (pyGimli, 2024a).

Geometrin byggdes upp utifrån de konceptuella modellernas nodkoordinater, som redan fanns tillgängliga i CAD. Varje lager skapades som en polygon med hjälp av

nordkoordinater. Varje lager fick därefter en markör för att senare kunna bli tilldelad en materialparameter. Samtliga lager adderades ihop för att skapa geometrin för en sektion. Sensorerna placerades därefter längs med topografin (översta lagrets randgeometri) med hjälp av interpolering av de övre noderna. Val så som elektrodkonfiguration, antalet sensorer och önskvärt sensoravstånd görs för att sedan generera en mesh med önskvärd detaljgrad. Här var det viktigt att inga sensorer befann sig i samma meshpolygon, då detta gav upphov till opålitlig data. Därefter tilldelades materialparametrar och när varje polygon i sektionen hade sin tillhörande resistans/hastighet så kunde simuleringen av forward modellen genomföras. Invertering av den genererade datan genomfördes tillslut i pyGimli, men också i Geogiga och Res2Dinv (genom export och anpassning av datan till rätt format) vilka är mer bransch använda inverteringsprogram. Men på grund av tidspress genomfördes enbart inverteringar i pyGimli inför fältmätningarna.

De syntetiska modellerna justerades iterativt för de samtliga sektionerna med hänsyn till de valda materialparametrarna och sensoravstånden för att, i kontrollerad miljö, hitta rätt upplägg för avsiktlig mätning. Sensoravstånden som testades var 0,5, 1, 2, och 5 m där 0,5 m som geofonavstånd inte konfigurerade med rapportskrivarnas modelleringskunskaper och därmed inte kommer vara representerade i resultatet. Modelleringen resulterade i många simuleringar då samtliga avstånd valdes att undersökas för flera sträckor, i samtliga sektioner från undersökningsplatserna.

Samtliga syntetiska modeller presenteras i kapitel *Resultat, Syntetiska modelleringen* i figurerna 5.3-5.14.

4.4 Fältmätningar

4.4.1 Förberedelser

Med hjälp av de syntetiska modellerna som skapats, för att se vilka geofon/elektrod-avstånd som skapar bäst möjligheter för att se intressanta strukturer, kunde sedan en preliminär position för mätlinjerna bestämmas. För vardera område placerades dessa mätlinjer parallellt med SGU:s drönarmätlinjer, vid geologiskt intressanta områden. Upplägget för respektive plats och antalet relevanta mätningar, redovisas i tabell 4.8 nedan.

Tabell 4.8: Plats, mätmetod och upplägg inför fältmätning.

Metod	Sensor avstånd	
	Ladugårdsmarken	Viderup
ERT	2 m	2 m
	1 m	5 m
Seismik	2 m	2 m
	-	5 m

Linjedragningarnas koordinater dokumenterades inför fältmätningen i samband med

kontroll av utrustning och mjukvaruinställningar. Markägare informerades slutligen med uppdaterad information om mätningen.

4.4.2 Mätning

Fältmätningarna utfördes efter initial planering. Nedan presenteras ett övergripande utförande av seismik och ERT:

Seismik

1. Utrustning packas i fordon och körs ut till närliggande plats intill mätlinjen.
2. Tidtagning och anteckning sker löpande av utförandet för att kunna dra slutsatser kring omfattning och effektivisering.
3. Mätlinjen sätts ut med GNSS-enhet enligt tidigare planering. Markeringspinnar placeras med ca 100 m avstånd. Markeringar utanför mätlinjen sätts ut på ca 3x geofonavståndet för yttre skott.
4. Måttband placeras ut längs linjen för att få rätt geofonavstånd. Därefter trycks geofoner ned i marken och kopplas ihop med respektive remote unit som gör om ljudvågen från analog till digital signal.
5. 2 st signalkablar läggs ut så att båda ändar möts i mitten och ansluts till en data insamlare.
6. Geofonerna kopplas till signalkabeln.
7. Batteri ansluts till både dator och datainsamlaren (Summit X One).
8. Slägga och slagplatta kopplas in. Brusinspelning görs för att kunna filtrera bort bakgrundsljud i databehandlingen.
9. Inspelning påbörjas med 3 slag per station för att möjliggöra signalförstärkning (stacking). Varje station placeras ut med dubbla geofonavståndet.
10. Samtliga geofoners och stationers läge mäts med GNSS-enheten för att kunna få exakt position inför redovisning.
11. Mätning avslutas och samtlig information sparas innan inlastning och hemvändning.
12. Datan från mätningarna förs över till hårdisk och kontrolleras.
13. Tillvägagångssätt inför nästkommande mätning fastställs och dokumenteras.

ERT

1. Utrustning packas i fordon och körs ut till närliggande plats intill mätlinjen.
2. Tidtagning och anteckning sker löpande av utförandet för att kunna dra slutsatser kring omfattning och effektivisering.
3. Mätlinjen sätts ut med GNSS-enhet enligt tidigare planering. Markeringspinnar placeras med ca 100 m avstånd.
4. Kablar placeras ut och sträcks för att elektroderna ska hamna i en rät linje. Elektroder placeras ut efter kabeln tillsammans med *jumpers* som kopplas mellan kabel och elektrod.
5. Styrenheten (ABEM Terrameter) kopplas till mätkablarna som i sin tur sammankopplas med *joint connectors*.
6. Batteri ansluts till styrenheten som sedan ställs in på rätt inställningar för *roll along*. Därefter påbörjas datainsamlingen med gradient konfigurationen.
7. Under mätningen inhämtas placeringen av samtliga elektroder med GNSS-enheten för att kunna få exakt position inför redovisning. Samt uppställning av kablar och elektroder inför nästkommande *roll along*.
8. Mätning avslutas och den kvarstående utrustningen samlas in.
9. Datan från mätningarna sparas över till hårddisk och kontrolleras inför nästkommande mätning. En snabbinversion av mätdatan i Res2Dinv utförs även, för att kunna göra eventuella justeringar inför nästkommande mätningar.
10. Tillvägagångssätt inför nästkommande mätning fastställs och dokumenteras.

Eftersom mätningarna iterativt ger mer information om undersökningsplatsen beslutades det i Ladugårdsmarken att göra en kompletterande resistivitetsmätning parallellt med första mätlinjen då en anomali i både resistivitets- och IP-mätningen upptäcktes. Två magnetometrimätningar med en gradiometer utfördes även, för att ge mer data kring anomalin och geologin.

För att besvara frågeställningen angående tidsbesparing i fält gjordes sist den kombinerade mätningen med resistivitet- och refraktionsseismik, för att få mer övning med metoderna och säkerställa att utrustningen fungerade väl. Mätlinjerna var 160 meter långa med två meters sensoravstånd. Sensorerna placerades intill varandra för att slippa använda måttband för geofonerna, samt upprepad GNSS-mätning.

4.4.3 Utrustning

Samtlig utrustning som använts för fältarbetet redovisas i tabell 4.9 nedan.

Tabell 4.9: Utrustning för samtliga fältmätningar.

Seismik	ERT	Magnetometri	Utsättning
Data collector	ABEM Terrameter Ls 2	Gradiometer G-858G	Topcon HIPER HR
Summit X One	Kabel 40 m (6st)	24V blybatteri (2st)	Topcon FC-5000
Kabel 150 m (2st)	Kabel 5 m (4st)		Utsättningsstav 2 m
Sunfull geofon 4,5 Hz (80st)	Elektrod (90st)		Markeringspinne (6st)
Remote unit (80st)	Jumper (90st)		Måttband 50 m (4st)
Slägga	Joint connector (2st)		
Slagplatta	12V bilbatteri (1st)		
Fältdator			
12V bilbatteri (2st)			

Resultatet av samtliga fältmätningar redovisas nedan i figurerna 5.16-5.24 under resultatkapitlet *fältundersökningarna*. Redovisat tidsprotokoll presenteras under kapitel *Resultat, Fältundersökningarna, Tidsprotokoll, Tabell 5.4-5.5*

4.5 Enkät till branschen

För att få en bild av hur användningen av geofysik och syntetisk modellering i marktekniska förundersökningar ser ut, gjordes en enkätstudie där 418 personer kopplade till infrastrukturbranschen tillfrågades. Syftet med studien var att kunna dra slutsatser kring behovet och användningen av syntetisk modellering, för att senare kunna motivera en framtida implementering. Målgruppen innefattade personer från följande områden:

- Myndighet (tillståndsgivare, kontrollant)
- Beställare
- Entreprenör/byggare
- Forskare
- Konsult

Enkäten heter *Geofysik i projektering* och presenteras i **bilaga C**. Sammanställda svar redovisas i **bilaga D** och sammanfattas under kapitlet *Resultat, Enkät svar*.

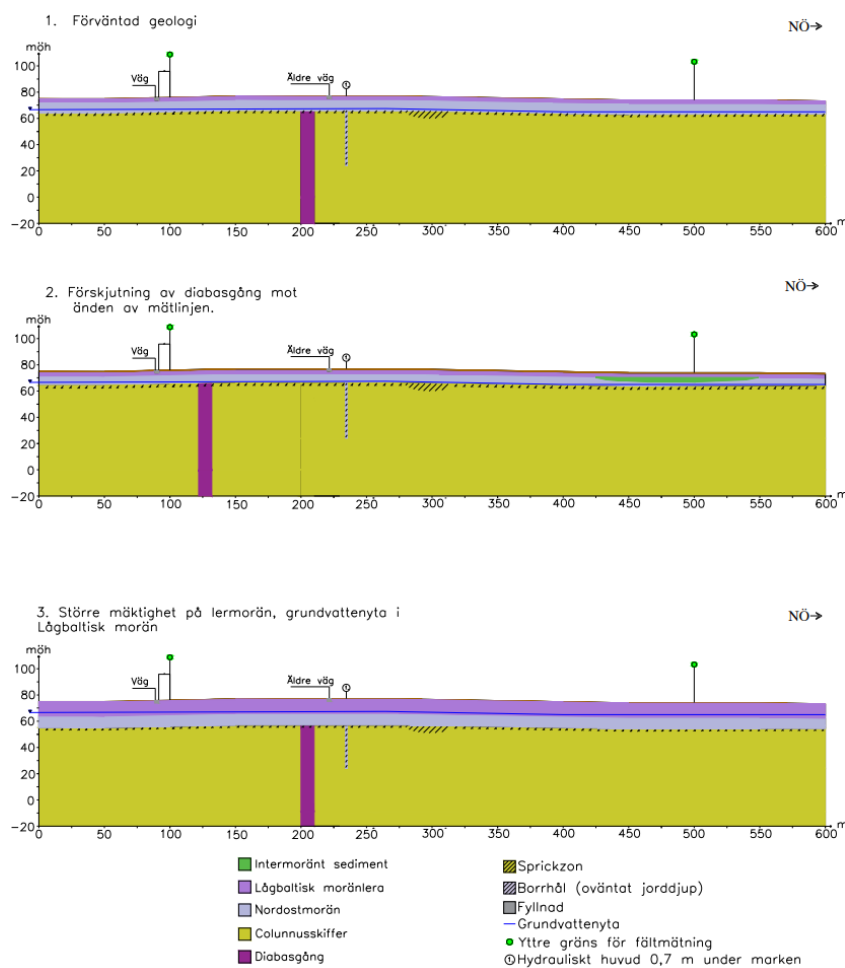
5 Resultat

5.1 Konceptuella modellerna

Under avsnittet kommer sammanställningen av tre typsektioner för geologin i Ladugårdsmarken och Viderup presenteras under separat kapitel. Samtliga illustrationer är skapade i AutoCAD.

5.1.1 Ladugårdsmarken

De tre tolkningarna av geologin för området vid Ladugårdsmarken är visualiserade i figur 5.1. Vad som skiljer sektionerna åt är osäkerheten kring lokalisering av diabasgången som är markerad i lila, där sektion 2 fick en mer sydlig skärning med gångbergarten.

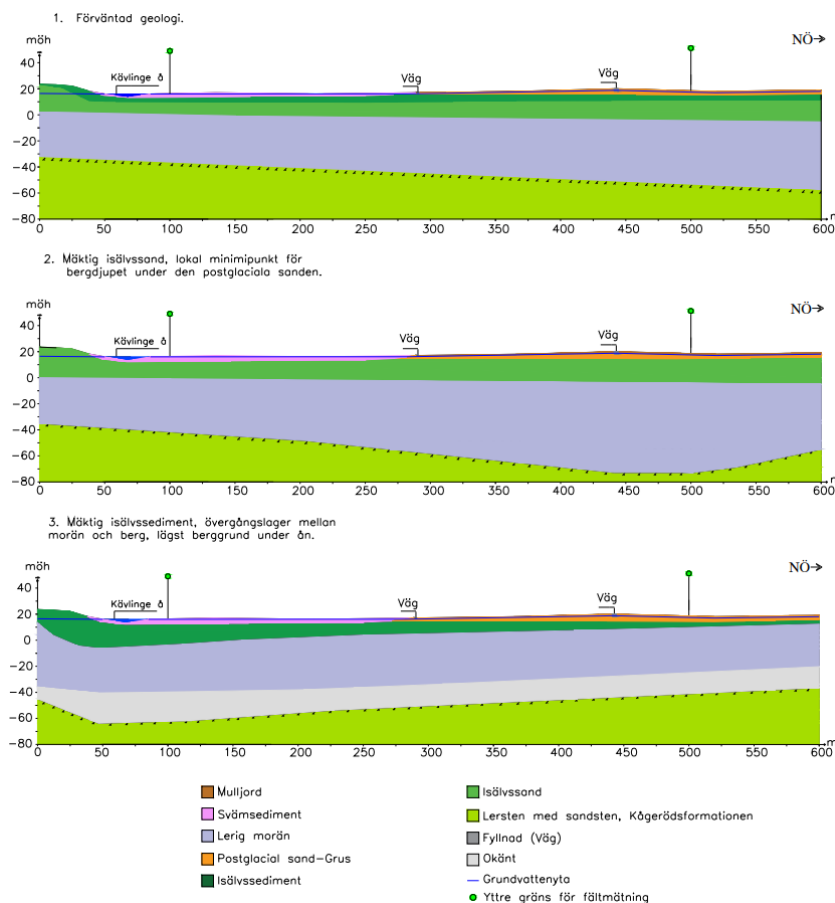


Figur 5.1: Konceptuella modeller (1-3) för hur sektionen vid Ladugårdsmarken kan se ut utifrån förstudien.

Sektion 2 har ett lager av intermoräna sediment som kan tolkas från borrhålsdata. Placering av bergytan är djupare ner på sektion 3 då intervallet på jorddjupet från boorhålsdata och kartunderlag varierade. Lermoränen har här blivit mäktigare och grundvattenytan når upp i den lågbaltiska moränen.

5.1.2 Viderup

De tre tolkningarna av geologin för området vid Viderup presenteras i figur 5.2 nedan. Utifrån brunn- och jorddjupsdata finns betydande djup i området som stiger från båda hållen om ån. Tre variationer på djupet till berg skapades med lägsta punkt mot ändan av sektionen (vid mitten av dalen), under ån och sista någonstans där emellan. Från Ising m. fl. (2019) om geologin inför höghastighetsjärnvägen är det antytt i sektion 2 att det finns isälvssediment på tre till fyra meter följt av isälvssand med ungefär 10 meters mäktighet, medans sektion 1 visar isälvssediment i ringa omfattning. Båda visar även en mäktig underliggande morän, se figur 4.20 .



Figur 5.2: Konceptuella modeller (1-3) för hur sektionen vid Viderup kan se ut utifrån förstudien.

Brunn och borrhålsdata runt sektion 3 visar finsandiga till sandiga lager strax under svämsedimenten som avtar längre från ån. Upp till 20 meter mäktig sand går att urskilja, men lagerföljderna är mycket skiktade och en tydlig gräns är svår att urskilja. En grov indelning har därför gjorts med finare isälvssediment på morän, isälvssand på

morän och isälvssediment följt av isälvssand på morän. I en av tolkningarna har även ett ospecificerat lager mellan moränen och berggrunden angetts och representeras av ett äldre hårt konsoliderat övergångslager. Svämsedimenten på 1.5 - 3 m och postglacial sand på 3 - 4 m erhöles från flera av borrhörens, därför är denna tolkning konstant mellan sektionerna. Grundvattenytan från mätningarna intill ån varierar inom någon meter från den uppskattade vattenytan i ån på 16 meter över havet. Grundvattenytan uppskattas vara därför vara relativt konstant och ytnära, med en svag variation längs den flacka topografiska stigningen mot nordost.

5.2 Syntetisk modellering

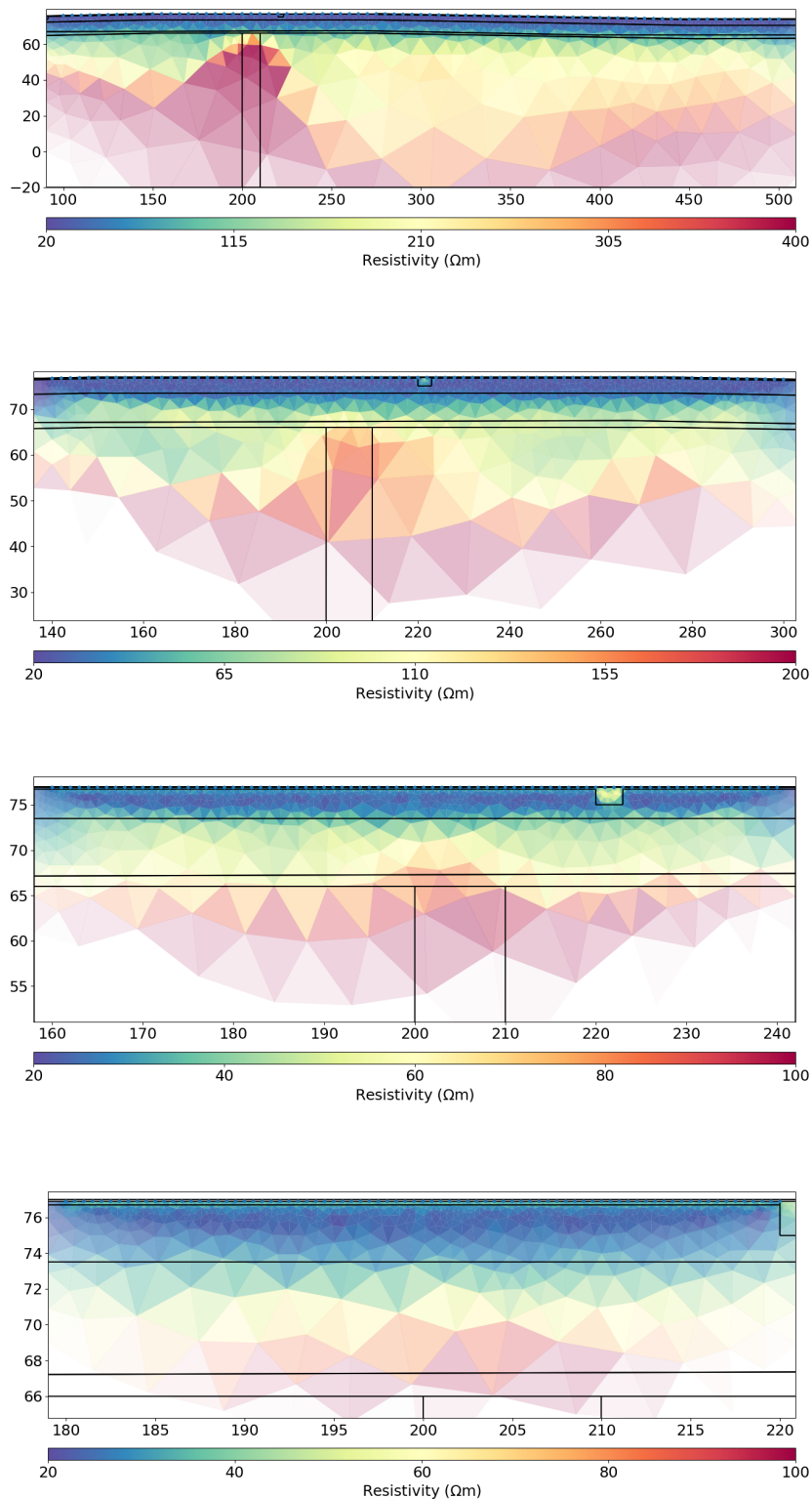
5.2.1 Ladugårdsmarken

Resistivitet

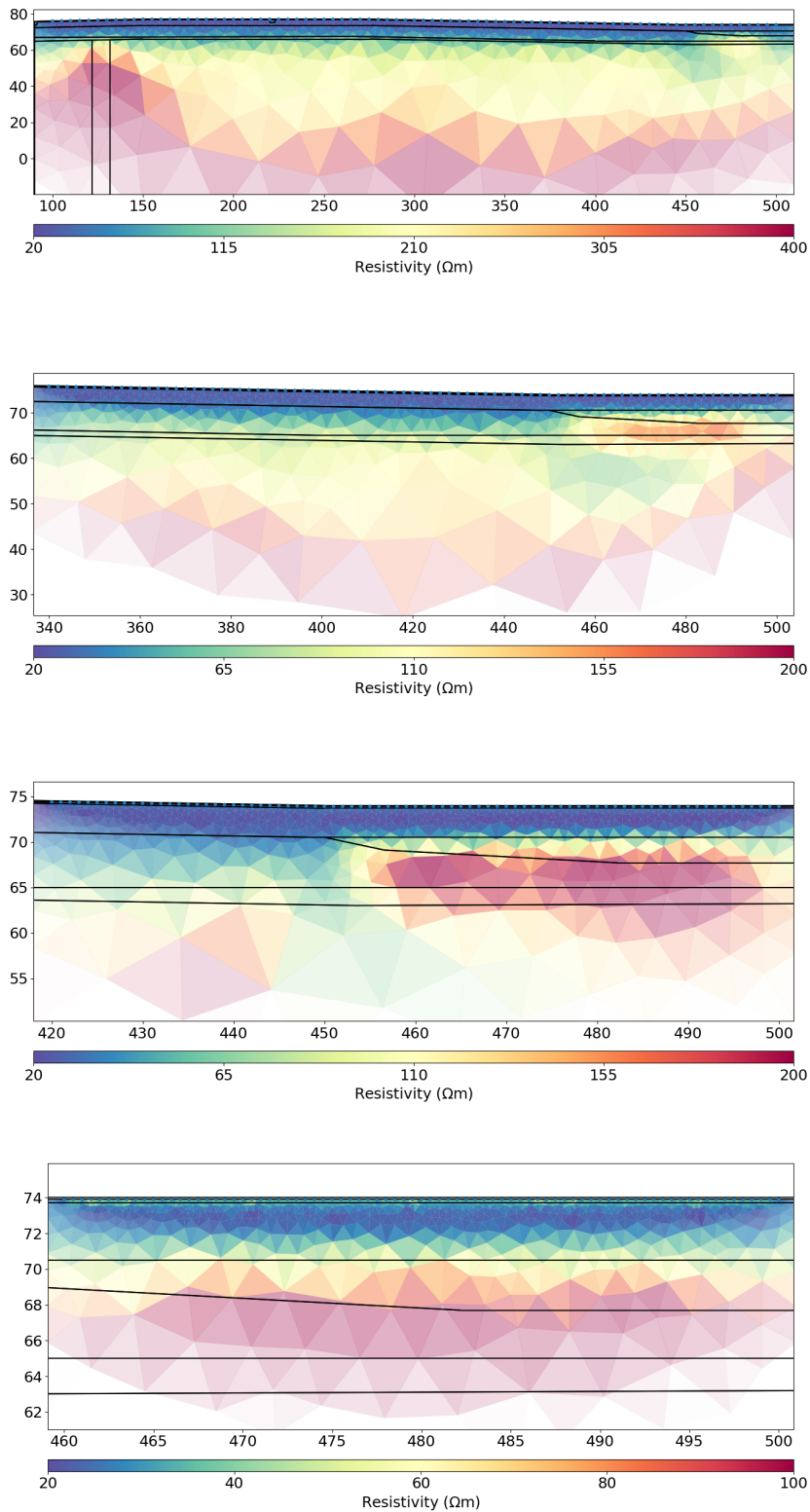
De slutliga syntetiska inversionsmodellerna för resistiviteten gjordes med gradient konfigurationen och är presenterade i figur 5.3 - 5.5. Inversionerna gjordes med ett chi-kvadrat på 0,7. För resistivetsmätningarna framgick det att bergytan var tydligt synlig med ett elektrodavstånd på två meter för samtliga sektioner, samtidigt som det gick att se det intermoräna sandlagret i sektion 2, se figur 5.4. Med denna uppenbarelse motiverades att ett elektrodavstånd på fem meter, inte skulle medföra mer än tvåmetersmätningen, förutom en djupare bild av lerskiffern och diabasgången. För fallet med ett intermoränt lager i Ladugårdsmarken så gav 0,5 och 1 meters intervall en god upplösning utifrån sektion 2, 5.4. Skillnaden i upplösning mellan 0,5 meter och 1 meters elektrodavstånd var inte stor nog för att motivera bristen på djupupplösning samt mängden arbete som skulle krävas för samma mätlängd. Sammanfattningsvis valdes det att utföra en linje med 2 m respektive 1 m elektrodavstånd.

Seismik

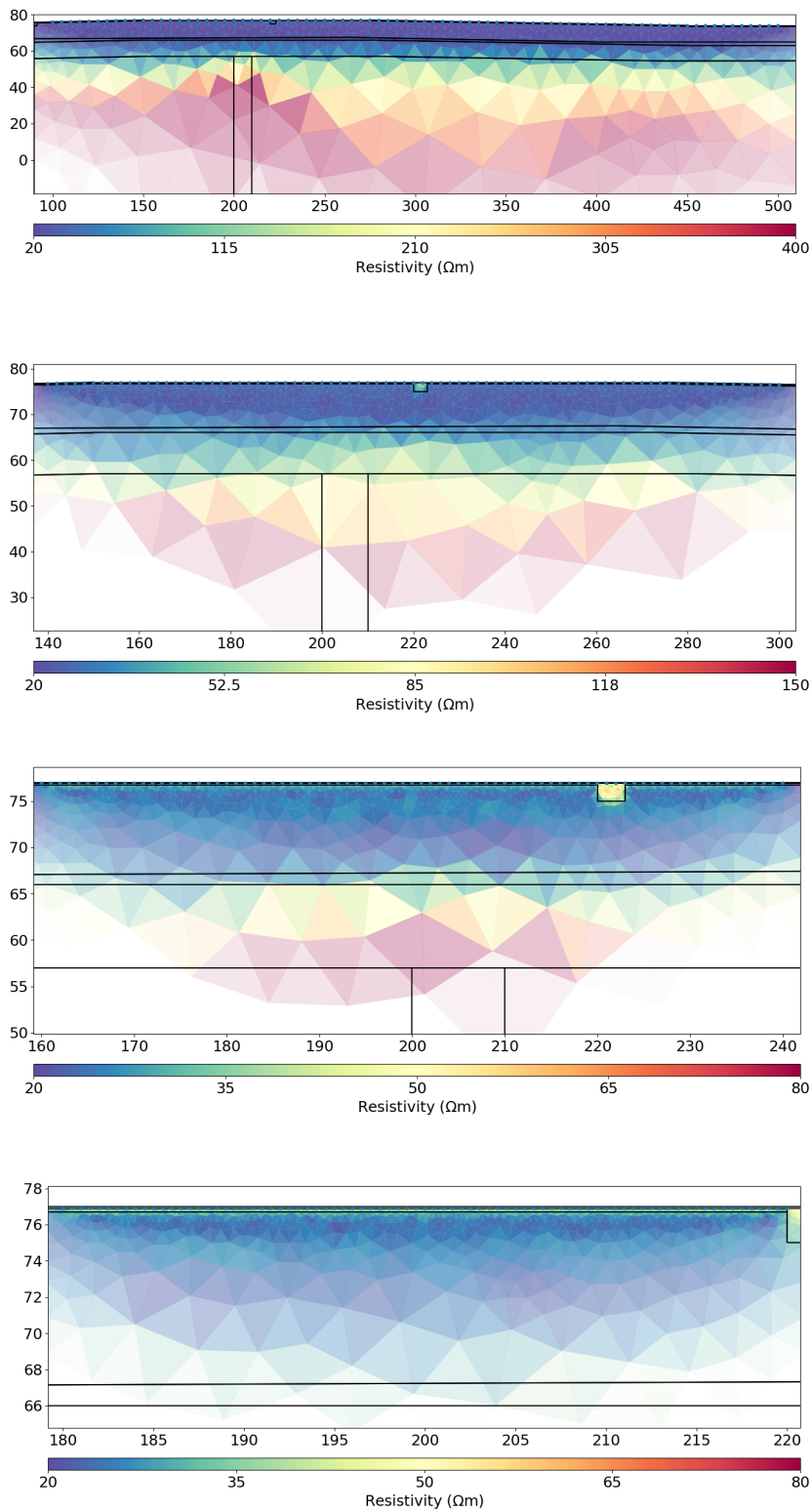
Inversionerna har ett maxantal iterationer på 20 med ett chi-kvadrat på 1,3. Med angivna materialhastigheter är det svårt att se någon tydlig kontrast mellan moräner och det mellanlagrade intermoräna sedimentet. Det intermoräna lagret i sektion 2 har en låg hastighet i förhållande till den övertäckande moränen, vilket gör lagret svårt att se med seismik. Det enda som uppvisas är en lokal avtagning i hastigheten för skiffern. Den tydligaste gränsen kan ses mellan nordostmoränen och lerskiffern, speciellt vid området nära diabasgången. Resultatet från 1m mätningen visar att diabasgången inte uppenbarar sig i sektion 3, till följd av ett ökat jorddjup och därmed sämre upplösning. Modellernas kontrast prioriterade djupet till berg. Ett geofonavstånd på 2 m valdes för att balansera upplösning och tid för undersökningen. Vissa inversioner visar mönster, vilket kan indikera att programmet skapar tolkningar för att minimera avvikelser. Detta kan justeras med färre iterationer och högre tolererad avvikelse, men de relevanta gränserna är fortfarande synliga för modellernas syfte. De syntetiska seismiska inversionsmodellerna visas i figur 5.6- 5.8.



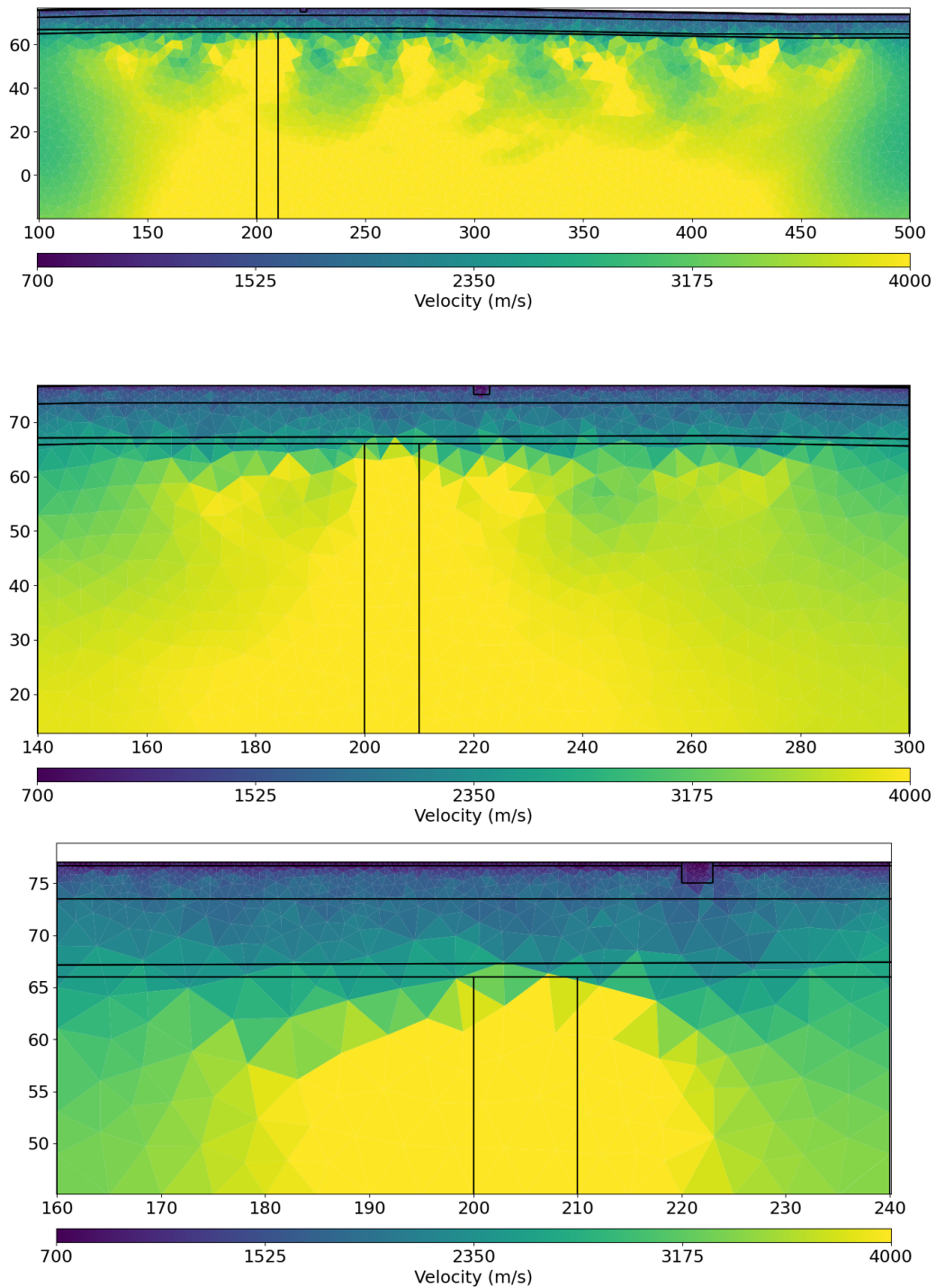
Figur 5.3: Syntetisk ERT inversion för sektion 1 vid Ladugårdsmarken för olika elektrodavstånd. Elektrodavstånden är 5, 2, 1 och 0,5 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i resistivitet vid ytan.



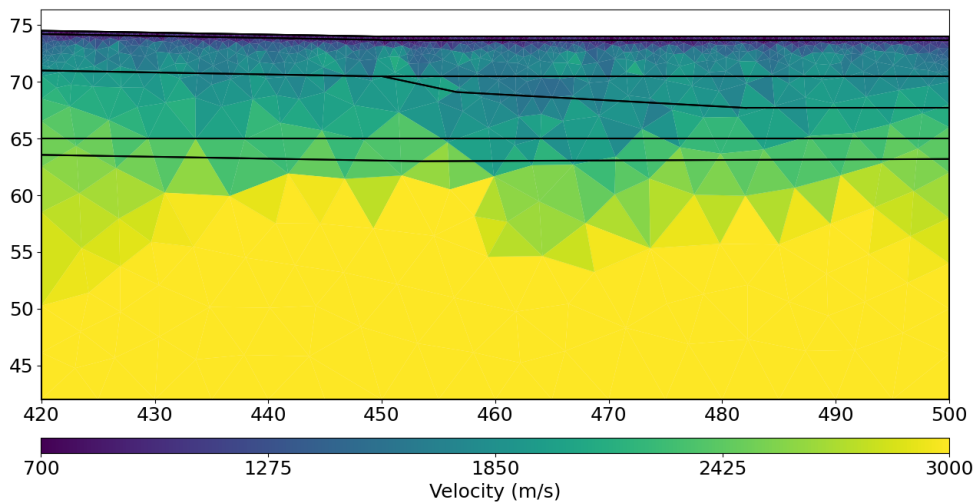
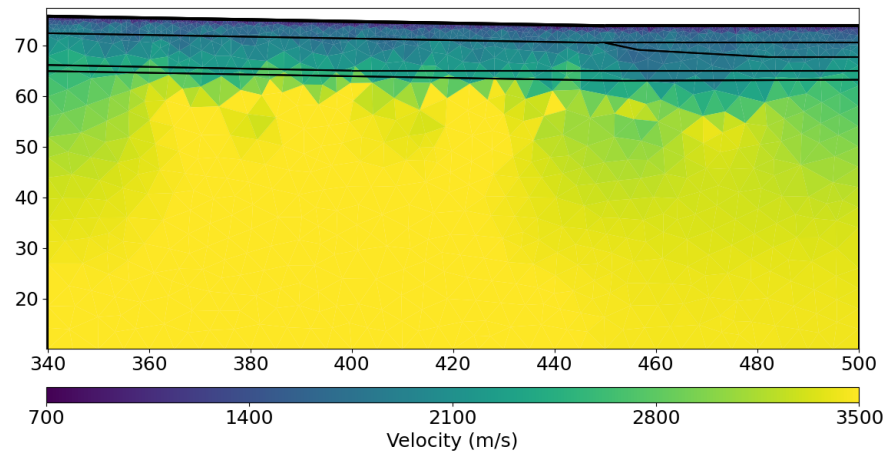
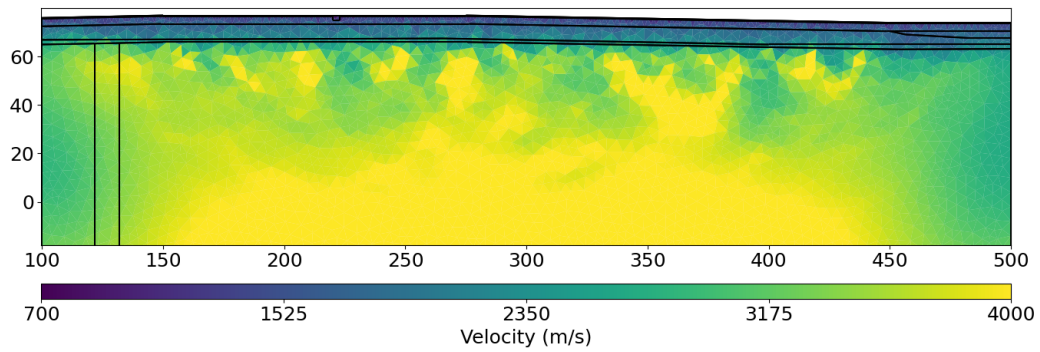
Figur 5.4: Syntetisk ERT inversion för sektion 2 vid Ladugårdsmarken för olika elektrodavstånd. Elektrodavstånden är 5, 2, 1 och 0,5 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna, för att göra det möjligt att se variationer i resistivitet vid ytan.



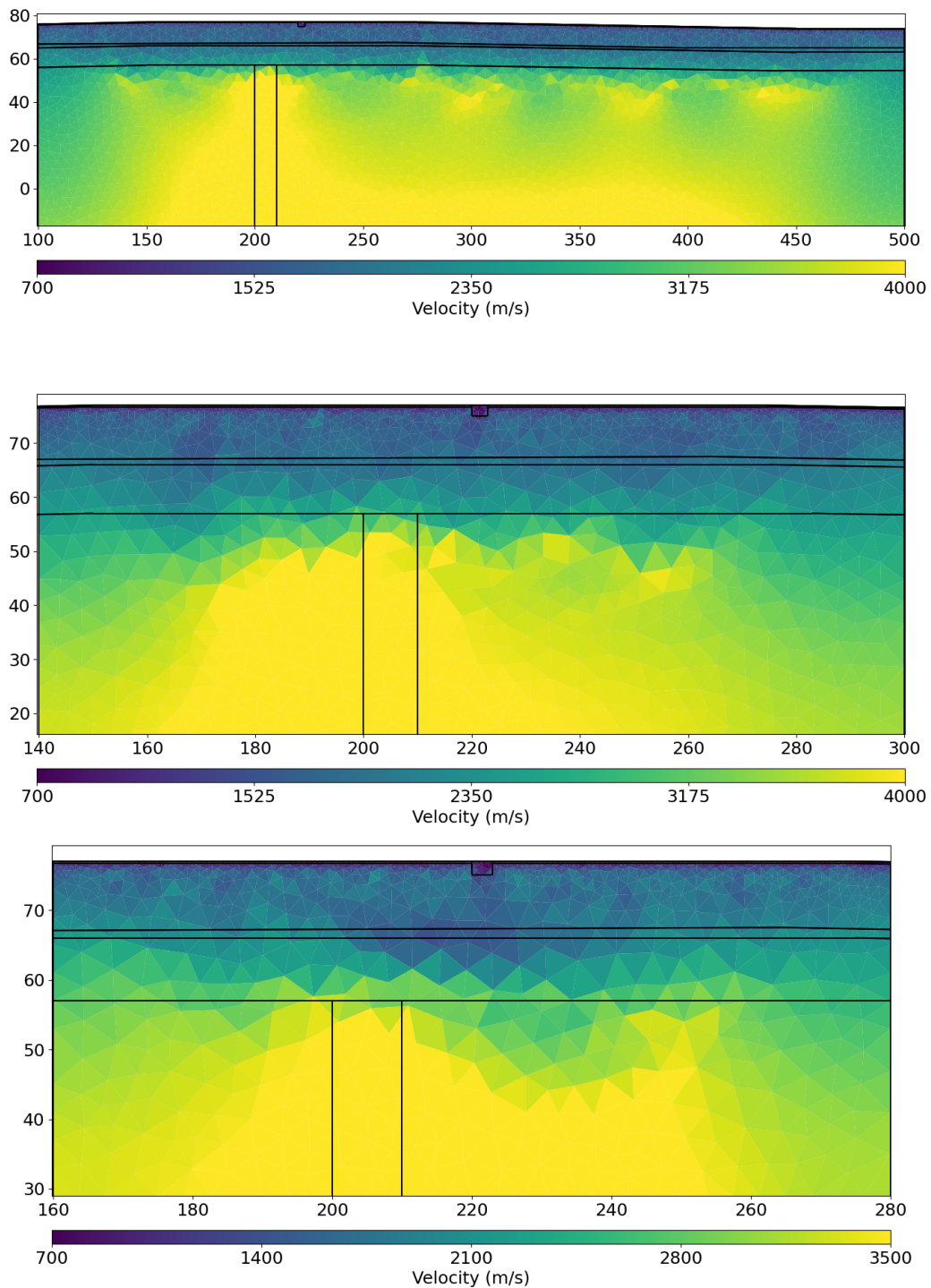
Figur 5.5: Syntetisk ERT inversion för sektion 3 vid Ladugårdsmarken för olika elektrodavstånd. Elektrodavstånden är 5, 2, 1 och 0,5 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i resistivitet vid ytan.



Figur 5.6: Syntetisk refraktionsseismik inversion för sektion 1 vid Ladugårdsmarken med varierande geofonavstånd. Geofonavstånden är 5, 2 och 1 meter (överst till lägst).



Figur 5.7: Syntetisk refraktionsseismisk inversion av sektion 2 vid Ladugårdsmarken med varierande geofonavstånd. Geofonavstånden är 5, 2 och 1 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i hastighet närmare ytan.



Figur 5.8: Syntetisk refraktionsseismik inversion för sektion 3 vid Ladugårdsmarken med varierande geofonavstånd. Geofonavstånden är 5, 2 och 1 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i hastighet närmare ytan.

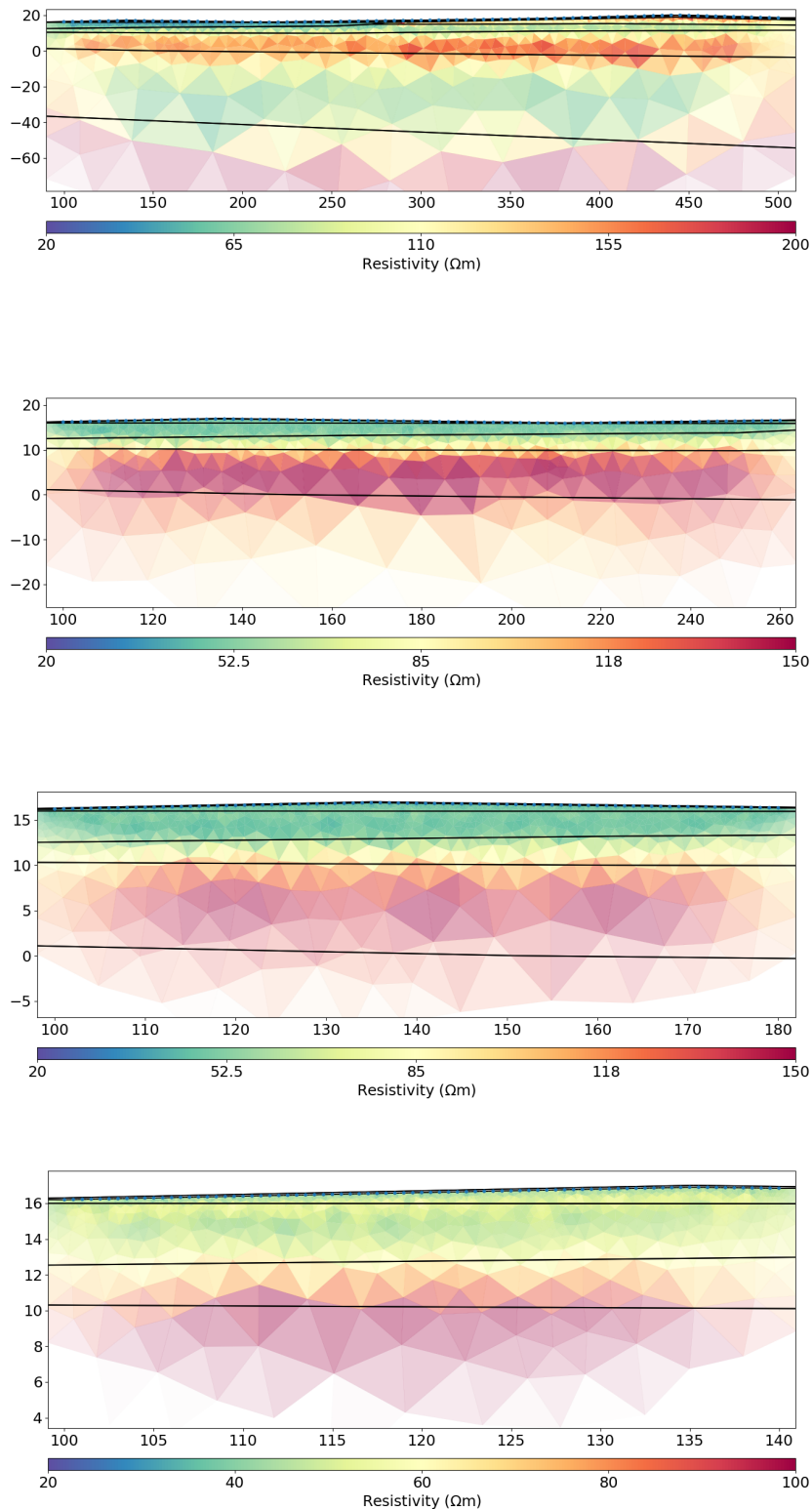
5.2.2 Viderup

Resistivitet

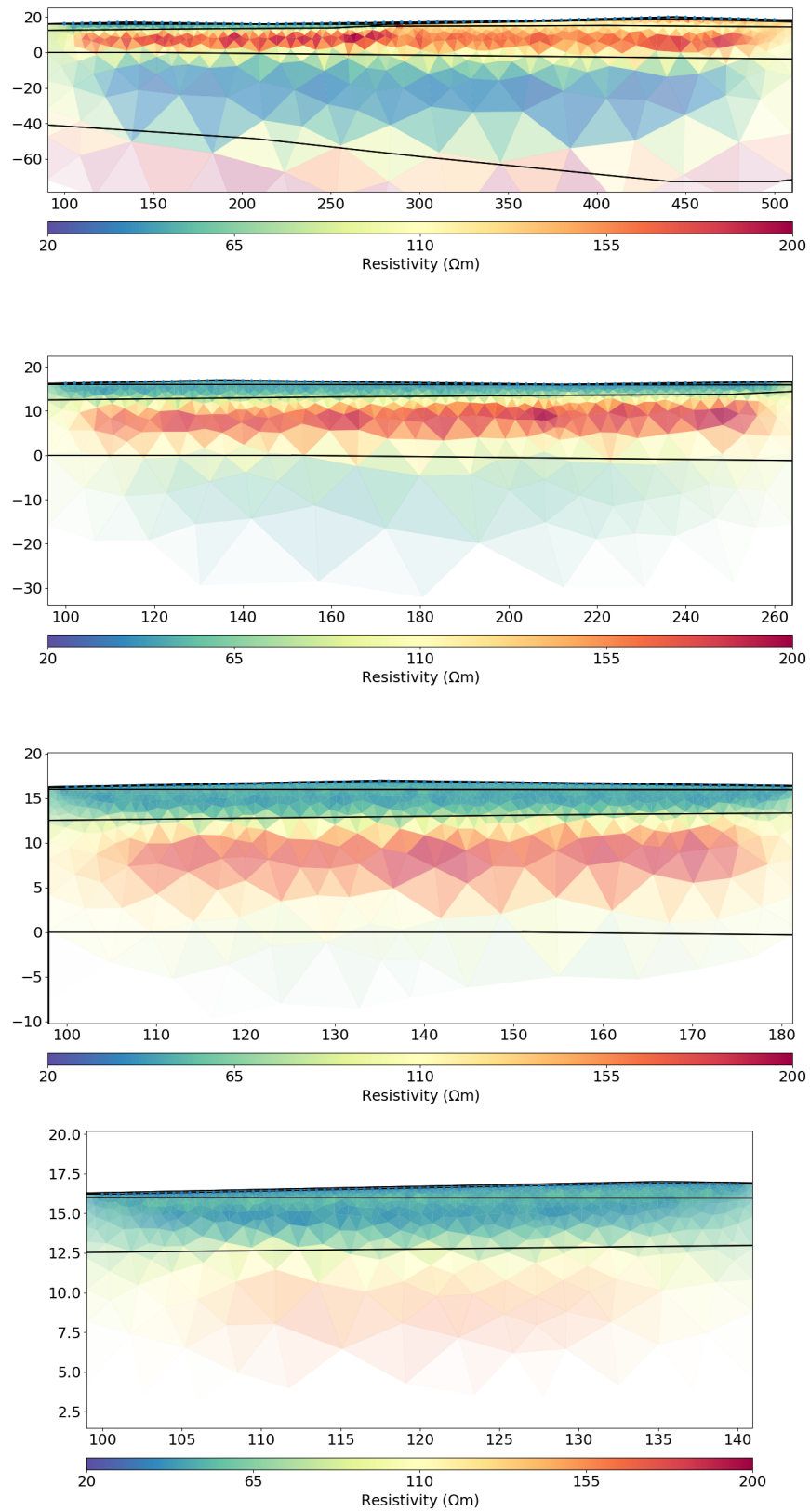
Resultatet från de syntetiska modellerna över Viderup är presenterade i figurerna 5.9 - 5.11. Samma inversionsparametrar användes som för Ladugårdsmarken. Från den konceptuella modellen antogs jorddjupet vara väldigt mäktigt samt innehållande finare sediment, vilket gör valet av elektrodavstånd svårt för att få med allt i en mätning. Enligt resultatet går det att urskilja kontrast främst för isälv- och svämsediment. Övergången till den postglaciala sanden från svämsedimenten går också att tydligt se tillsammans med de underliggande lagren från samtliga sektioner. Bergnivå och grundvattenyta går ej att urskilja från resultatet. På grund av den osäkra geologin, speciellt för bergytans läge, valdes 5 m elektrodavstånd för att få en bra översiktlig bild över samtliga lager och främst hur de skiljer sig på djupet. Därefter valdes en mer detaljerad 2 m mätning, då den bäst visar isälvsavlagringarnas mäktigheter men också en god upplösning på de övre lagrens mäktigheter (postglacial sand och svämsediment). En märklig egenskap som uppenbarade sig ur de syntetiska modellerna var den tolkade resistiviteten mot djupet. Lerstenen som hade en angiven resistivitet på 60 ohm till skillnad från moränens 100, ser ut att ha en högre resistivitet. De överliggande lagren har däremot en bra passform till den konstruerade modellens geometri och uppskattad resistivitet.

Seismik

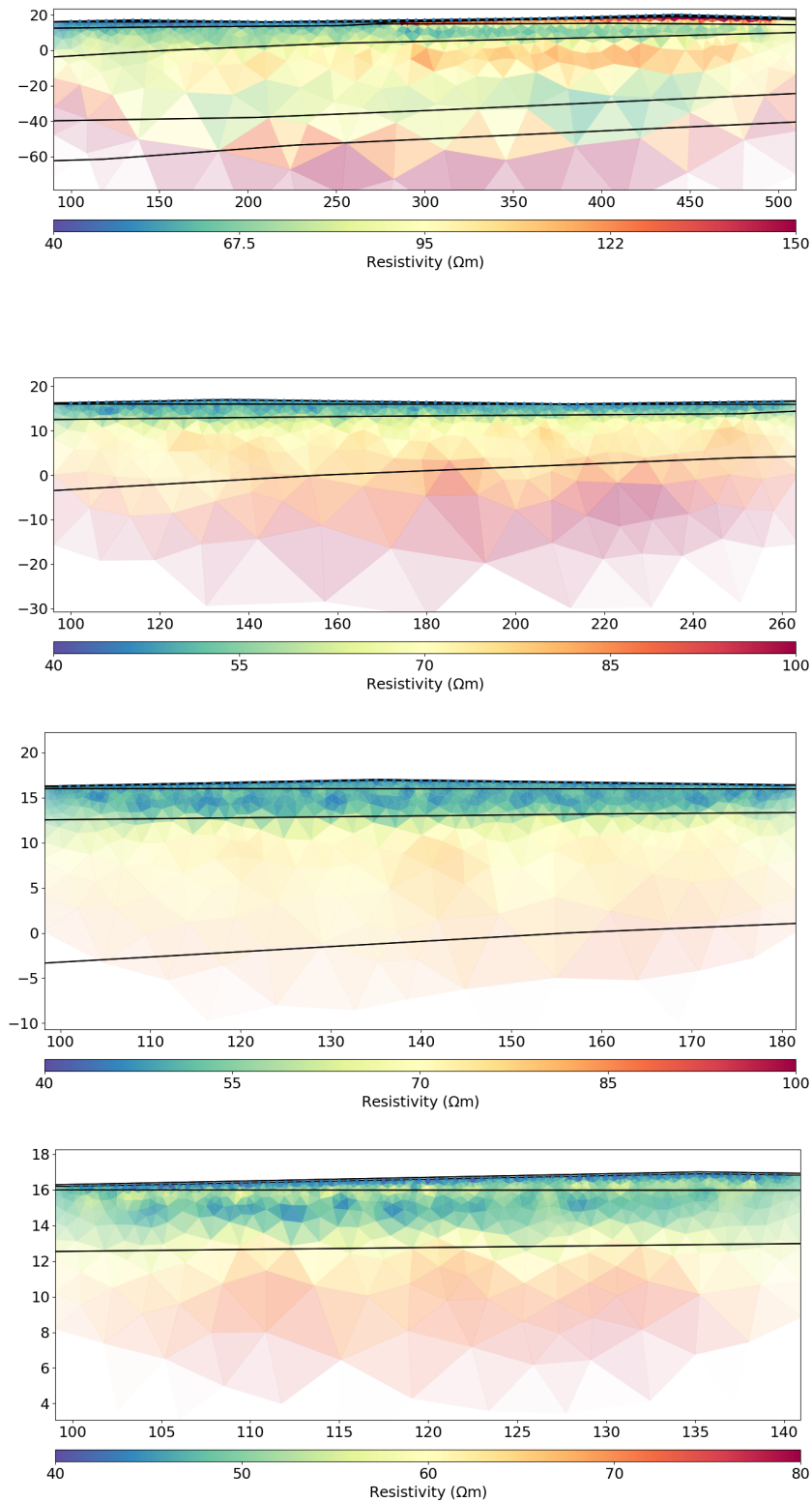
Refraktionsseismiken nedan visar tydliga kontraster i samtliga sektioner, men med ett något fel uppskattat jorddjup. Berggrytan i de seismiska modellerna representeras bäst med ett 5 m geofonavstånd. Svämsedimentets mäktighet är representerat tydligast i 1 m men gör en sämre tolkning av isälvsavlagringarnas lagertjocklek. I sektion 3 noteras att isälvssedimentet inte går att se under den postglaciala sanden då den har lägre hastighet. Det går vid 2 m avstånd att urskilja både svämsediment, isälvsavlagringar och underliggande morän. För att få en bra övergripande bild anses 5 m och 2 m geofonavstånd som mest informationsrika. Motiveringen om att använda 2 m avstånd stärks av målet med att undersöka en kombinerad mätning, där en resistivitetsmätning med 2 m avstånd tidigare rekommenderats på platsen. Likt fallet vid Ladugårdsmarken förekommer mönster till följd av inversionen där en för hög noggrannhet har försökt nås.



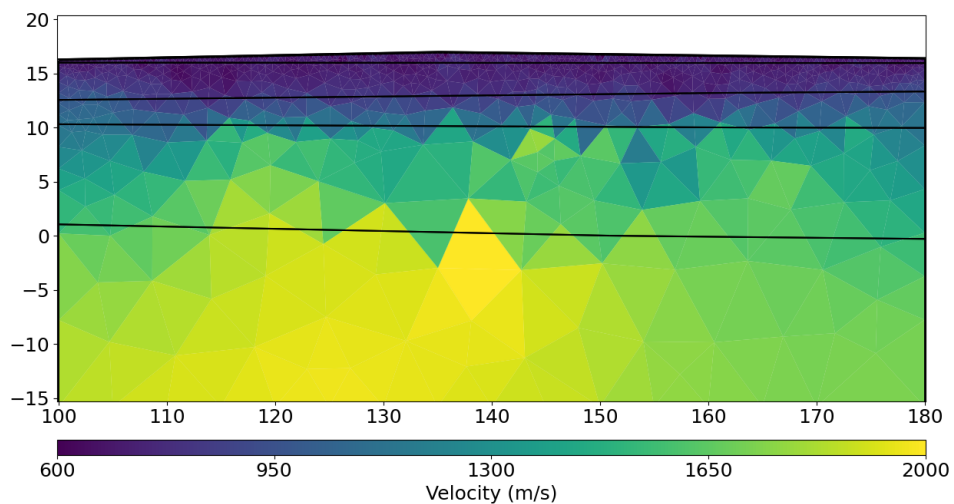
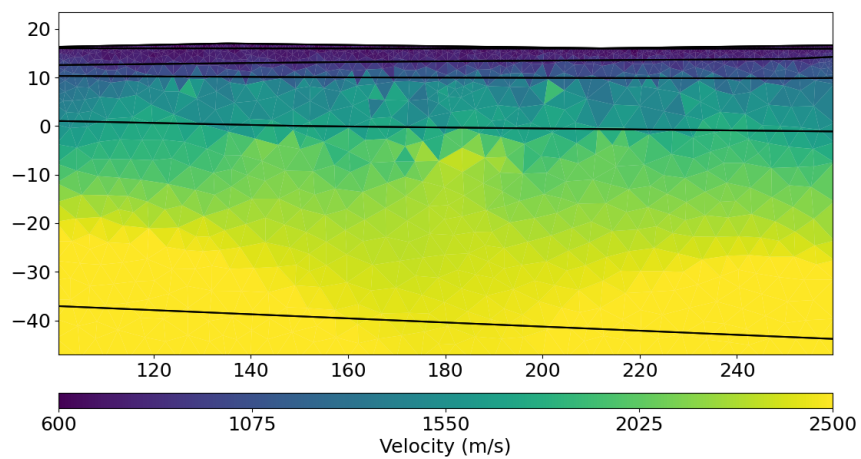
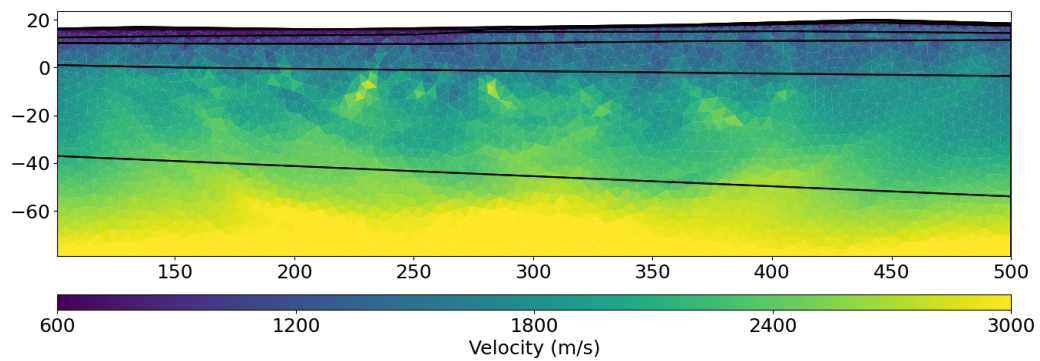
Figur 5.9: Syntetisk ERT inversion för sektion 1 vid Viderup för olika elektrodavstånd. Elektrodavstånden är 5, 2, 1 och 0,5 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i resistivitet vid ytan.



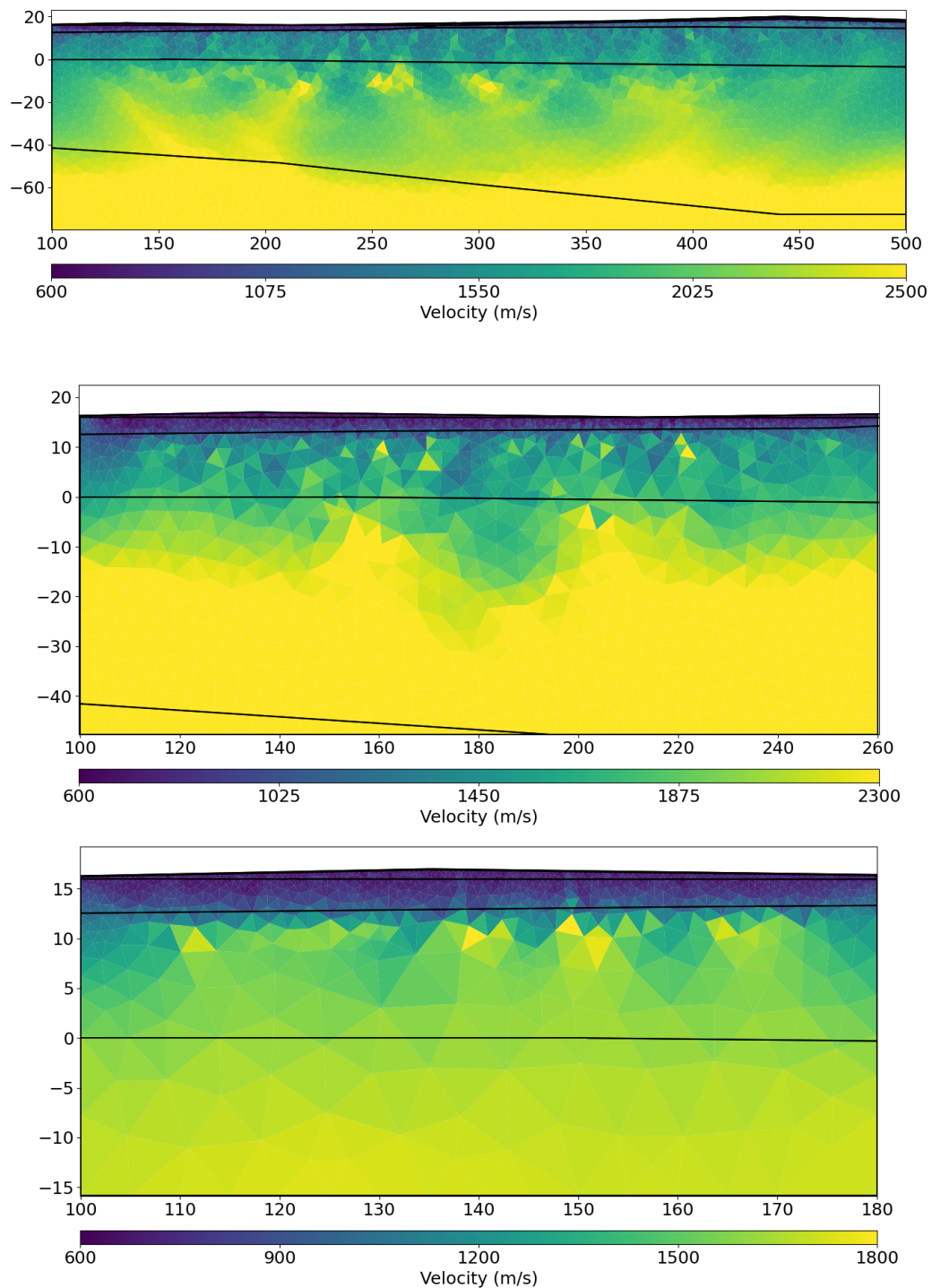
Figur 5.10: Syntetisk ERT inversion för sektion 2 vid Viderup för olika elektrodavstånd. Elektrodavstånden är 5, 2, 1 och 0,5 meter (överst till lägst).



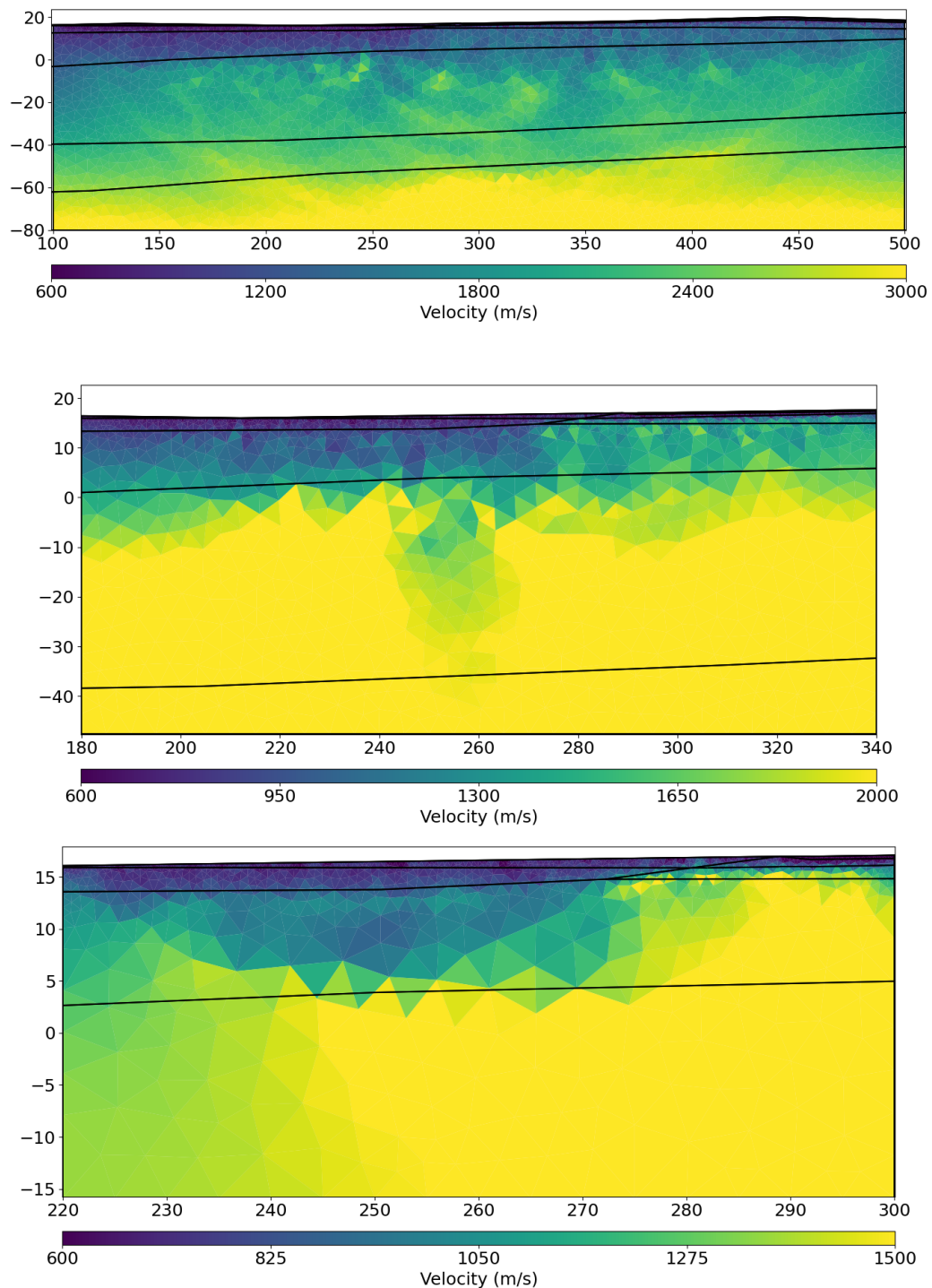
Figur 5.11: Syntetisk ERT inversion för sektion 3 vid Viderup för olika elektrodavstånd. Elektrodavstånden är 5, 2, 1 och 0,5 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i resistivitet vid ytan.



Figur 5.12: Syntetisk refraktionsseismik inversion för sektion 1 vid Viderup med varierande geofonavstånd. Geofonavstånden är 5, 2 och 1 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i hastighet närmare ytan.



Figur 5.13: Syntetisk refraktionsseismik inversion för sektion 2 vid Viderup med varierande geofonavstånd. Geofonavstånden är 5, 2 och 1 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i hastighet närmare ytan.

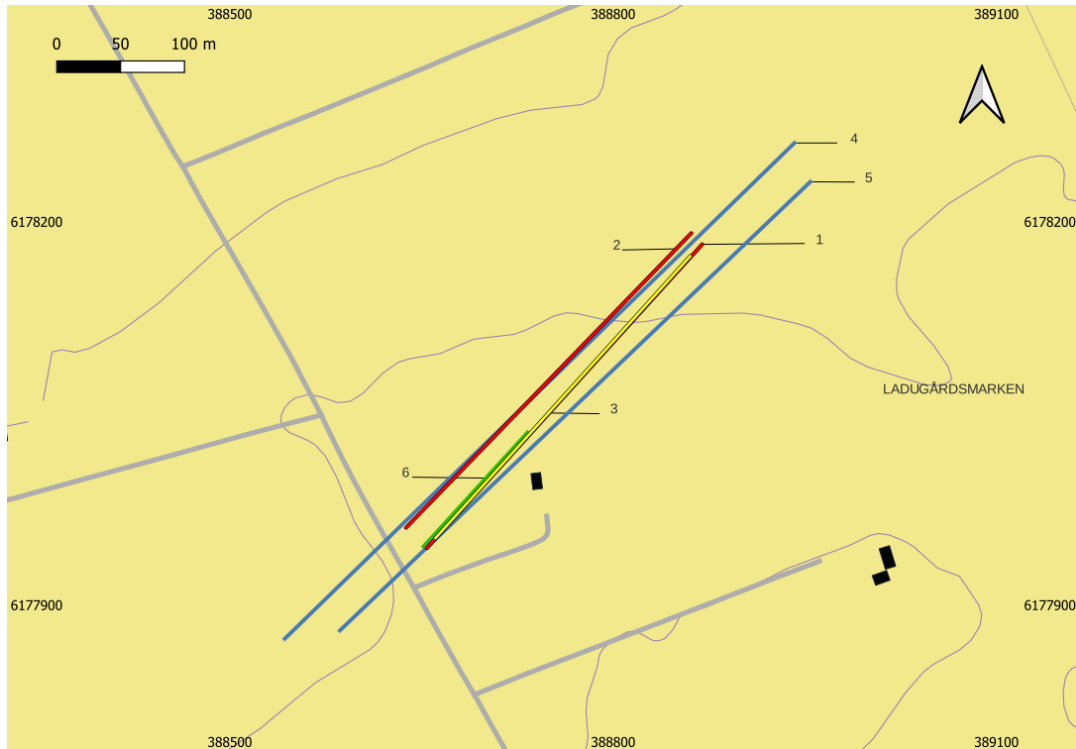


Figur 5.14: Syntetisk refraktionsseismik inversion för sektion 3 vid Viderup med varierande geofonavstånd. Geofonavstånden är 5, 2 och 1 meter (överst till lägst). Notera att färgskalan varierar mellan inversionerna för att göra det möjligt att se variationer i hastighet närmare ytan.

5.3 Fältundersökningarna

5.3.1 Ladugårdsmarken

Mätningarna för undersökningsområdet vid Ladugårdsmarken drogs enligt figur 5.15 och presenteras i tabell 5.1.

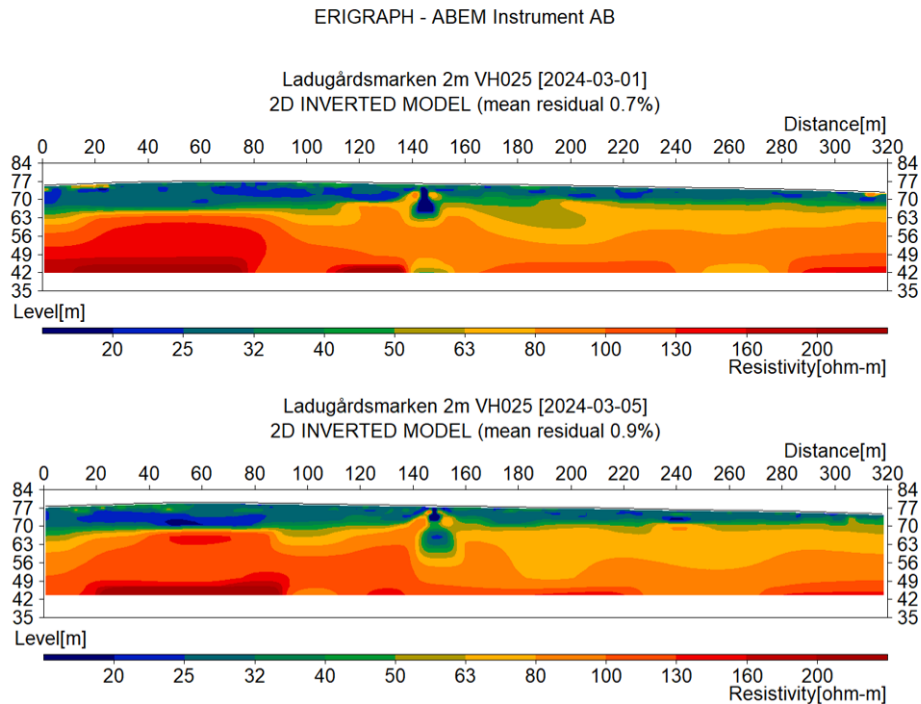


Figur 5.15: Fältmätningar i Ladugårdsmarken där mätlinjer (1-6) har markerats.

Tabell 5.1: Placering och tid för mätlinjer i Ladugårdsmarken (SWEREF 99 TM).

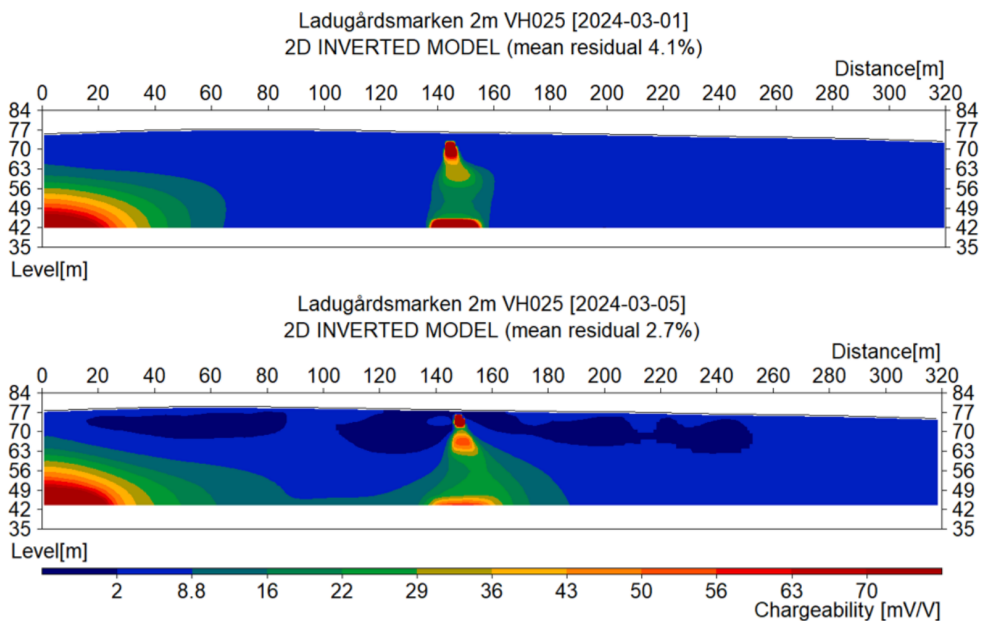
Linje	Mätning	Datum	Start		Slut	
			North	East	North	East
1	ERT (2m)	2024-03-01	6177944	388654	6178182	388869
2	ERT (2m)	2024-03-05	6177960	388638	6178190	388861
3	Seismik (2m)	2024-03-06/08	6177951	388661	6178172	388860
4	Magnetometri	2024-04-24	6177873	388543	6178261	388942
5	Magnetometri	2024-04-24	6177879	388586	6178230	388954
6	ERT (1m)	2024-03-07	6177944	388654	6178033	388735

Linje 1 och 2 presenteras i figur 5.16. I mitten av mätningen uppvisas en anomali med hög elektrisk konduktivitet. Ett mer högresistivt parti kring 200 ohm-m går att se runt meter 20-80 i båda inverteringarna. En lågresistiv zon på cirka 30 ohm-m breder ut sig längs toppen och är som mäktigast i första delen av sektionerna, för att sedan minska i mäktighet.



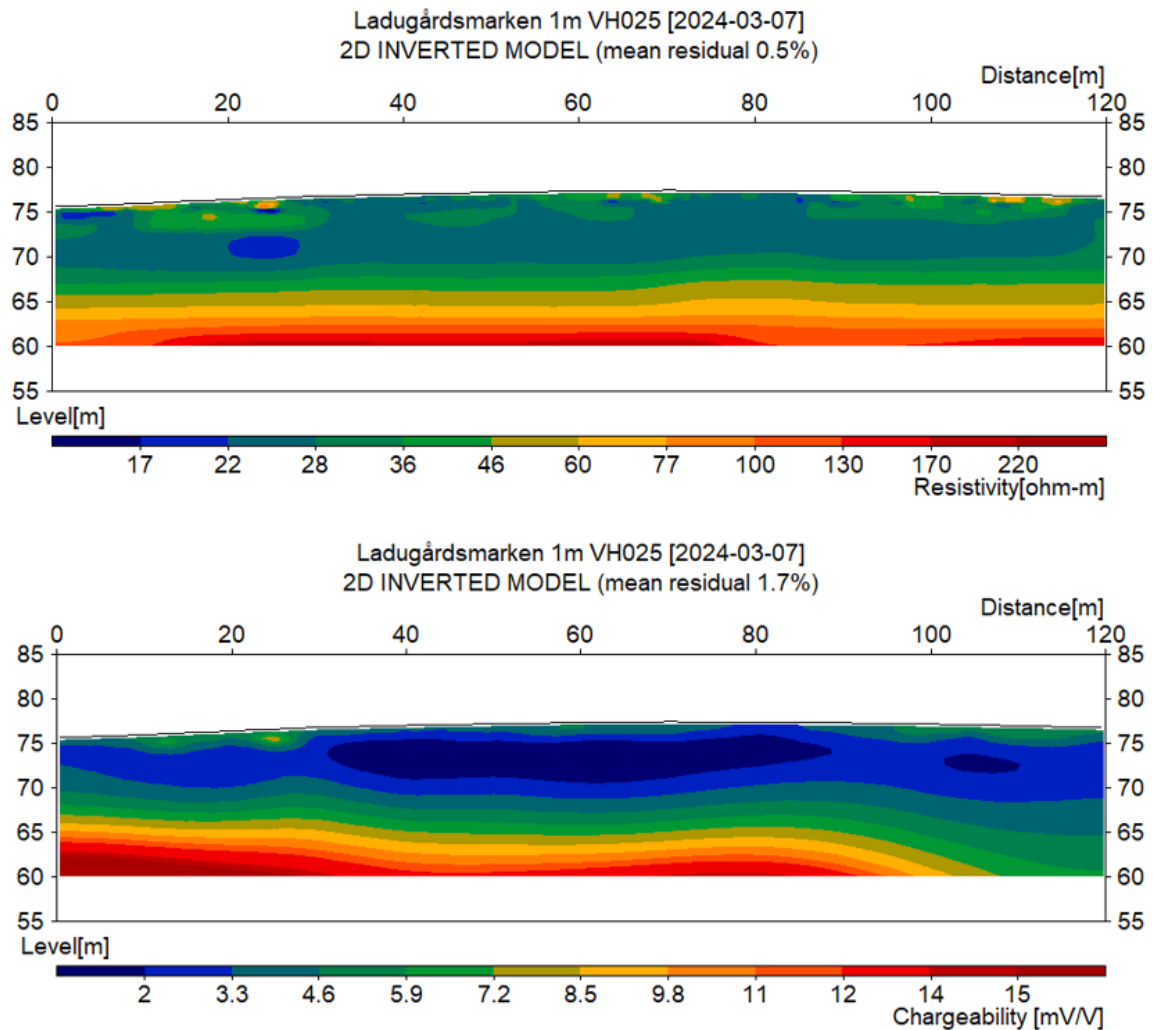
Figur 5.16: Inverterad ERT data från två mätningar i Ladugårdsmarken med 2 meters elektroavstånd, visualiserad i Erigraph. Den övre är linje 1 och den undre var den kompletterande linje 2, gjord 20 meter parallellförflyttad.

I IP-resultatet går det i samma läge att urskilja något med högre uppladdningsförmåga. Resultatet av linje 1 och 2 upprepar sig där inverteringarna från dess IP mätningar presenteras i figur 5.17 nedan. Utöver anomalin så gav båda IP-mätningarna utslag vid nedre delen av sektionerna vilket tyder på något återupprepande med relativt hög uppladdningsförmåga i relation till resten av marken (utöver anomalin).



Figur 5.17: IP resultat för linje 1 (övre) och linje 2 (undre), visualiserad i Erigraph.

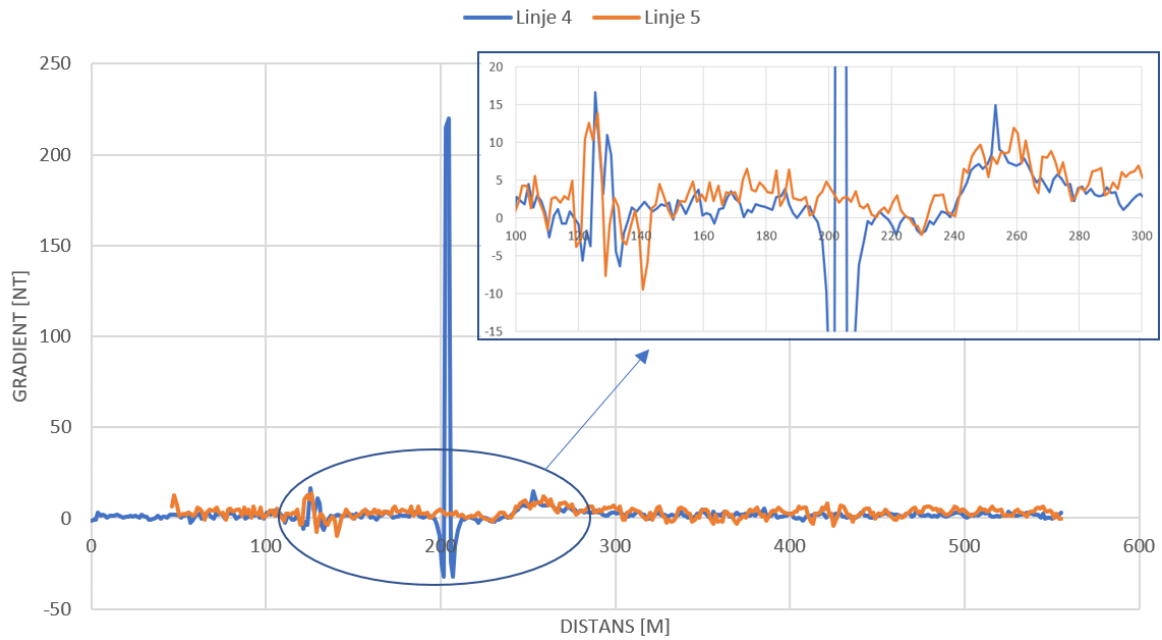
Linje 6 visas i figur 5.18 och visar ett tydligt homogent lågresistivt lager följt av en tydlig gräns på cirka tio meters djup. En liknande horisontell struktur går att urskilja från IP-resultatet men som ser ut att slutta mot slutet.



Figur 5.18: Inverteringen av ERT data för Linje 3, med 1 meters elektrodavstånd, visualiserad i Erigraph.

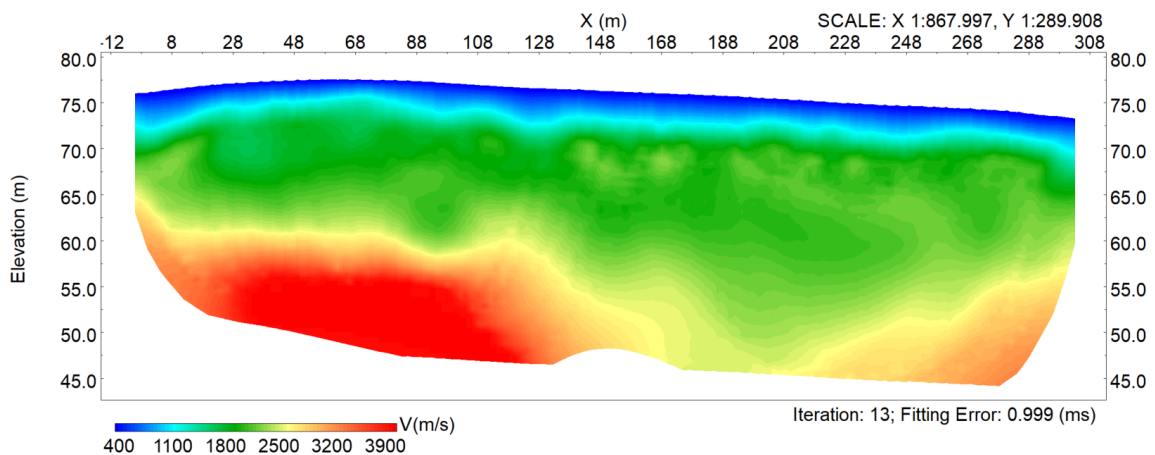
Magnetometrin längs linje 4 och 5 visar i figur 5.19 en avvikelse efter 125 meter vilket sammanfaller med platsen för lågspänningsledningen i figur 4.4 (grön) som går längs med vägen. En något urskiljbar avvikelse går att se vid 250 meter men saknar distinkt sinuskurva. Den märkbara toppen vid 200 meter är belägen där den förutspådda diabasgången skulle vara men dyker inte upp på linje två och har ett väldigt kort och okarakteristiskt utseende.

KOMBINERAD MAGNETOMETRI



Figur 5.19: Magnetometri över linje 4 och 5 överlappade för jämförelse. Två överensstämmande avvikelser går att urskilja vid 125 & 250 meter, men den distinkta vid 200 meter dyker inte upp i linje två.

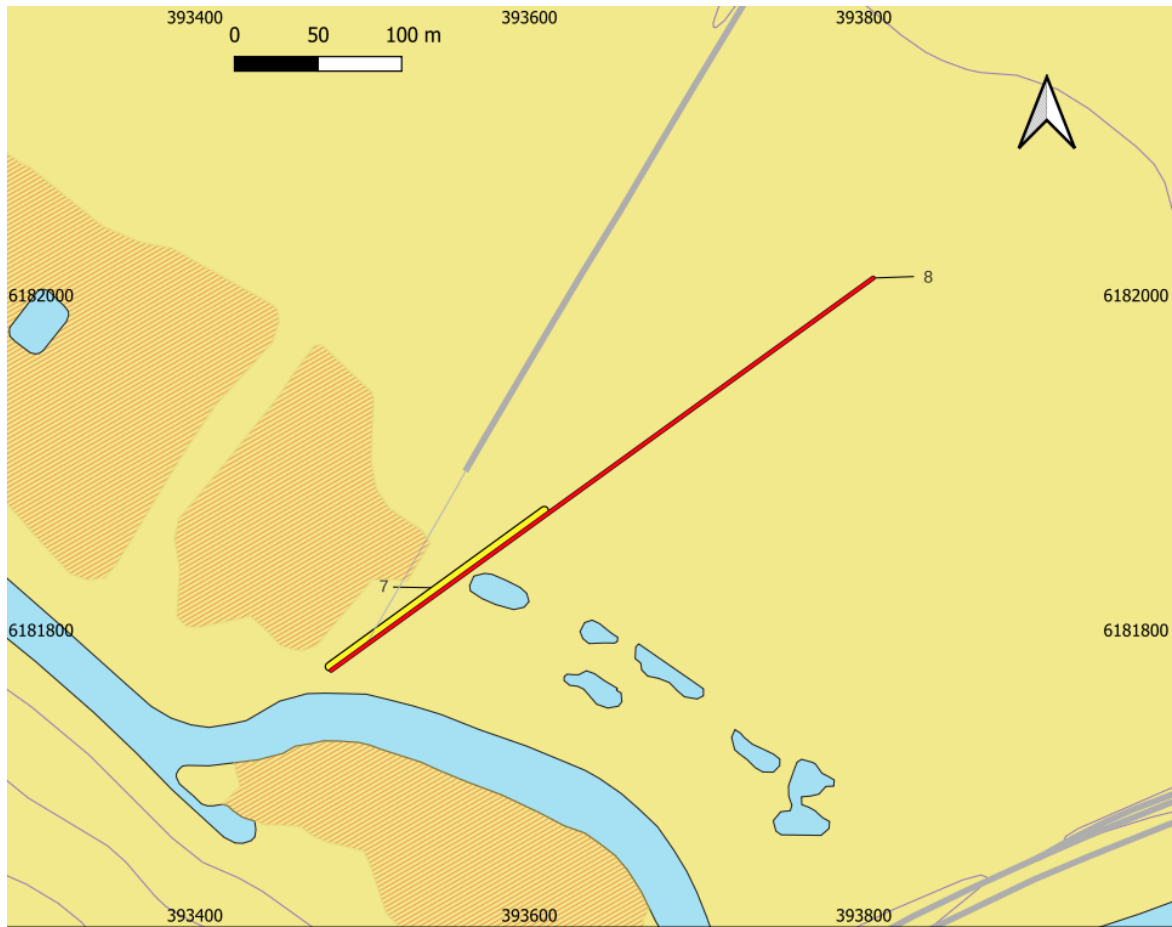
Resultatet i figur 5.20 visar den seismiska datan från mätningarna vid Ladugårdsmarken. Ett höghastighetsområde på cirka 13 meters djup går att se vid de första hundra metrarna av mätningen. En drastisk avtagning sker därefter mellan 130 & 140 meter, för att sedan stiga mot slutet av mätlinjen. Det långsammare topplagret i blått, samt det något snabbare turkosa lagret behåller en jämn mäktighet, med ett något tunnare skikt vid 70 meter. Det mäktiga gröna skiktet har en medelhastighet runt 2000 m/s och blir märkbart mäktigare vid 200 meter.



Figur 5.20: Linje 3, 2x160m kombinerade refraktionsseismiska mätningar med 10 m överlapp. Inverterat i Geogiga.

5.3.2 Viderup

Mätlinjerna för undersökningsområdet vid Viderup drogs enligt figur 5.21 nedan.



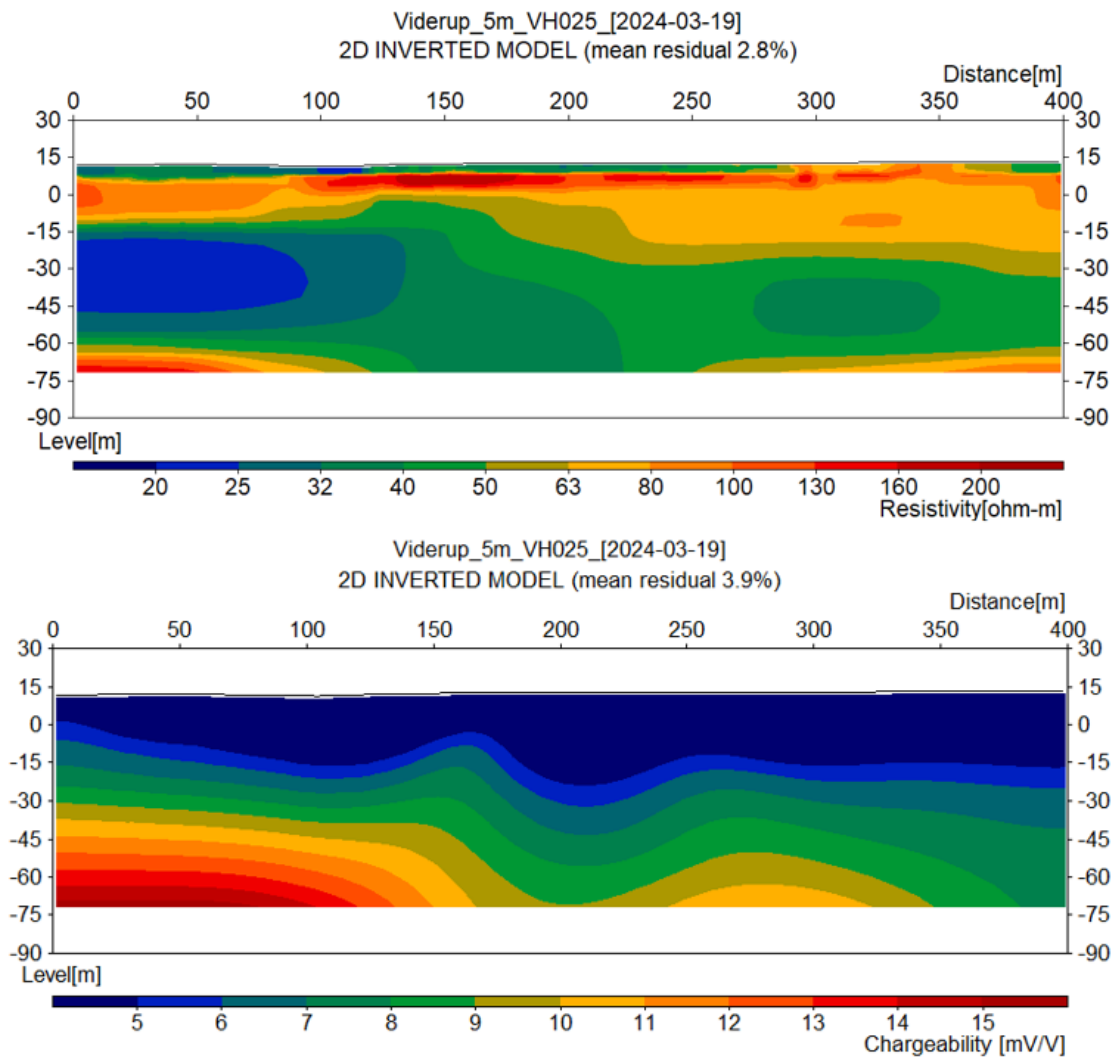
Figur 5.21: Fältmätningar i Viderup där mätlinjerna (7-8) har markerats.

Koordinaterna för samtliga mätningars start- och slutpositioner sammanställs i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Placering och tid för mätlinjer i Viderup (SWEREF 99 TM).

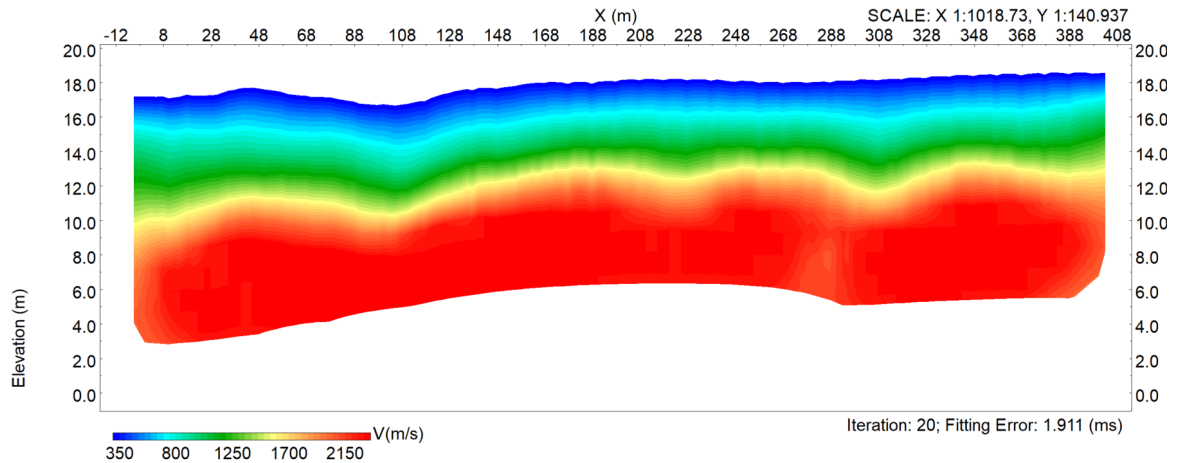
Linje	Mätning	Datum	Start		Slut	
			North	East	North	East
7	ERT+Seismik (2 m)	2024-03-21	6181775	393481	6181868	393609
8	ERT+Seismik (5 m)	2024-03-19	6181775	393481	6182010	393805

Resistivitetprofilering med 5 m avstånd visas i figur 5.22 nedan. Tydliga horisontella lager är synliga och en övergång från låg till mer högresistivt går att se vid ytan efter 290 m. Det högresistiva bandet runt nivå +0 visar en växlande mäktighet och resistivitet från 70-200 ohm-m. IP-värdet är svagt men kan tyda på att en något högre uppladdningsförmåga finns mot djupet, men av ringa storlek.



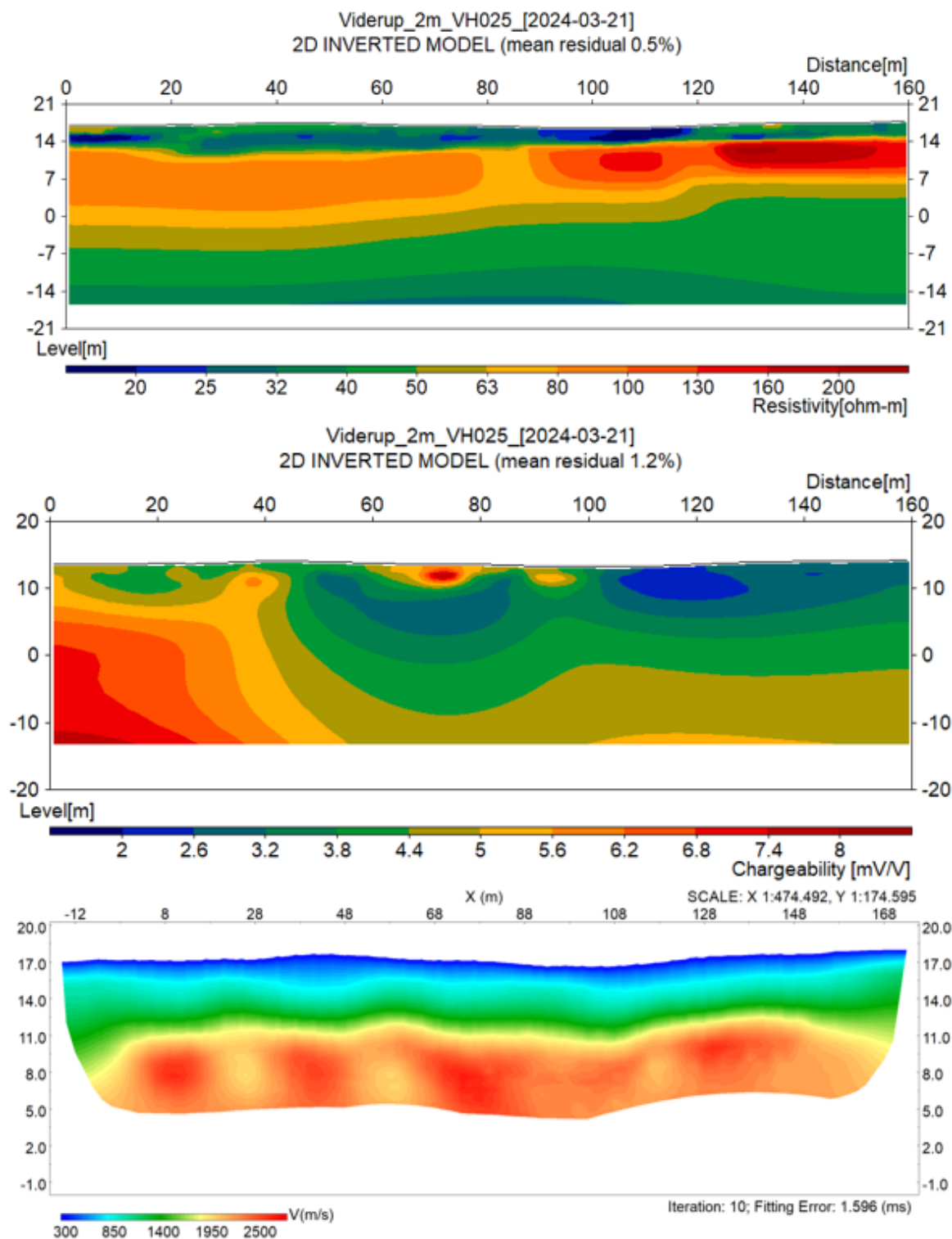
Figur 5.22: Inverteringen av ERT och IP-data från Viderup med 5 meters elektroavstånd, visualiserad i Erigraph.

Den seismiska 5 m mätningen går längs samma linje som resistiviteten och är presenterad i figur 5.23. Pågrund av buller från motorväg E-22, ca 300 m från undersökningsområdet, så var första ankomsttiden svår att urskilja. Detta gör resultatet begränsat, då den resulterande inversionsmodellen inte nådde de djup som mätparametrarna valdes för. Ett skikt runt 2200 m/s och ett överliggande lager på runt 800 m/s går att se, med en mellanliggande övergångszon av mindre tydlig karaktär. Osäkerheten om det exakta djupet är också stor till följd av geofonavståndet. Upplösningen av mätningen kan inte ha större noggrannhet än geofonavståndet, vilket gör att den grunda profilen enligt nedan på max 22 m får en väldigt osäker gränsovergång där inversionen gissarsig fram till ett resultat. Figuren är även utdragen för att lättare se, vilket gör att färgskalan kan misstolkas som lager.



Figur 5.23: Inverterad seismisk data från Viderup med 5 meter geofonavstånd.

I figur 5.24 jämförs den kombinerade mätningen för linje 7. Det lågresistiva topplagret kring 30 ohm-m korresponderar med det långsammare skiktet mellan nivå 11 och 15 m.ö.h. på 800 m/s. Likt 5m mätningen kan ett område med högre hastighet (2200 m/s) urskiljas. Den tydliga resistivitetsövergången i ERT mätningen, är mer urskiljbar i den seismiska 2 m mätningen än den var i 5 m mätningen. Ett skikt med kompressionsvågshastighet nära 300 m/s noteras i de seismiska mätningarna men går inte att se i någon av resistivitetsmätningarna. I figur 5.24 syns även IP-mätningen för 2 m mätningen (Linje 7). Det lågresistiva området på ca 10-25 ohm-m vid 110 meter korsar ett vått område vid utkanten av en damm. Detta kan förklara den låga uppladdningsförmågan.



Figur 5.24: Linje 7, 160m kombinerad 2 m mätning av resistivitet (övre) och seismik (undre) i Viderup.

5.3.3 Tidsprotokoll

Protokollet i tabell 5.3 är en sammanställning av den uppskattade mängden tid som gick åt för att:

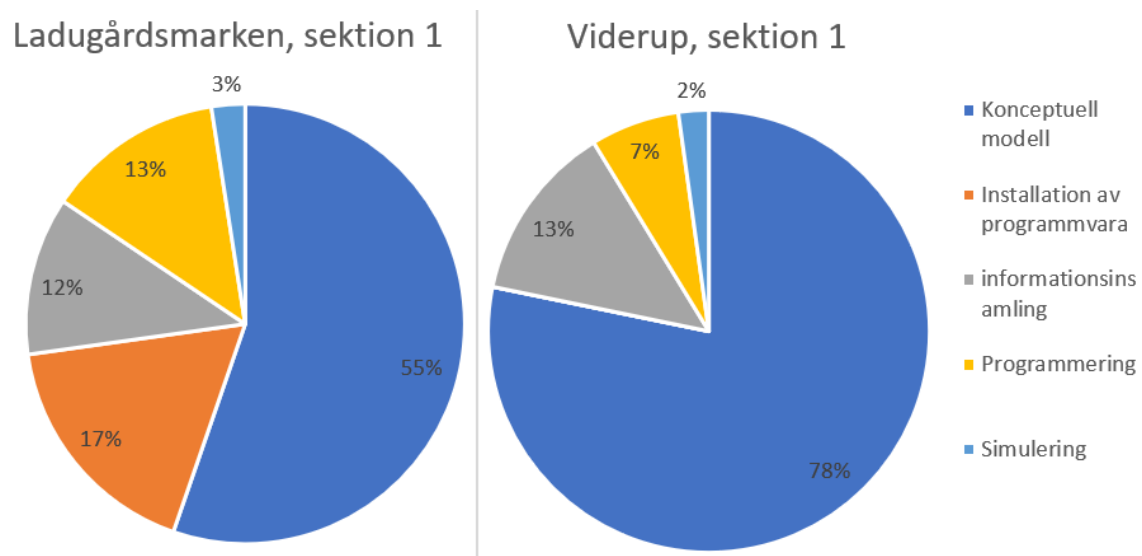
- Skapa en konceptuell modell baserad på arkiverad data och antaganden;
- Installera alla programvaror (miniconda, pyGimli och pyBert);
- Inläring av samtliga program utifrån exempelkoder;
- Skapande av syntetisk modell för samtliga områden; och
- Tid för simulering av koden.

Programmeringstiden och tiden som gick åt för simuleringarna representerar en engångs tid. Tiden som resterande sektioner tog att skapa, efter att en initial modell framställts, var betydligt mindre. Därför var tidsåtgången för efterföljande modeller mindre omfattande. Tiden som gick åt för att göra en simulering var drygt fem minuter där den stora tidsåtgången som noterades var vid presenterandet av resultatet i pyGimli. Ingångsdatan behöver överskridas så fort en ny simulering ska utföras. Detta gör att om man vill återskapa eller justera någon illustration gällande läge eller materialparametrar så krävs det att simuleringen genomförs från start.

Tabell 5.3: Tidsprotokoll om tidsåtgången för användningen av syntetisk modelleringsprogram för undersökningarna vid Ladugårdsmarken & Viderup för en person.

Aktivitet	Ladugårdsmarken	Viderup	Anmärkning
Konceptuell modell	38h	60h	Tiden består av bearbetning och insamling av arkiverad data.
Installation av programvara	12h	-	Gjordes bara en gång. Tidsåtgången kan variera kraftigt beroende på hårdvara och teknisk erfarenhet.
Informationsinsamling	8h	10h	Exempelkoder för både refraktionsseismik och ERT fanns tillgängliga på pyGimlis hemsida. Tid för val av materialparametrar beror på tillgänglig information och erfarenhet.
Programering	9h (Första) 12h (Totalt)	5h (Första) 9h (Totalt)	Optimering av exempelkoder (efter bekantande) med relevant geometri & sensorposition. Senare sektionskoder gick snabbare.
Simulering	5 min per simulering	5 min per simulering	Mest tid går åt små justeringar i inställningar, då simulationen måste göras om från början. Beroende på hur många simuleringar man gör kan tidsåtgången bli omfattande.

Utifrån tidsloggningen från tabell 5.3 kan diagram över andelen arbete för Ladugårdsmarken och Viderups syntetiska modellering visualiseras. I figur 5.25 nedan visas de 21 simuleringar som har gjorts för vardera sektion.



Figur 5.25: Tidsåtgång för att konstruera första syntetiska sektionen på respektive plats.

Eftersom en konceptuell modell kan variera kraftigt i tidsåtgång, beroende på geologins osäkerheter, gjordes en uppskattning av hur endast modelleringstiden, för första sektionen, skiljde sig mellan Viderup och Ladugårdsmarken. Eftersom modelleringen för Viderup inte behövde innefatta installation av programvara och informationsinsamling i lika hög grad av exempelkoder sparades 78% av framställandetiden.

Vidare är den sammanställda tidsåtgången för samtliga mätningar och metoder presenterad i tabell 5.4 & 5.5. Utöver tiden som gick åt för samtliga geofysiska mätningar så erhöles GNSS positioner för sensorerna under undersökningstiden för samtliga mätningar.

Det går att se en minskning i mängden tid som gick åt för samtliga undersökningar allt eftersom fältarbetet blev mer rutinmässigt. Resistivitetmätningarna höll en jämn utförningstid och det noterades att mängden utförare inte drastiskt bidrog till någon ökning i produktivitet. Tidsåtgången var begränsad till utrustningens operationstid, vilket utnyttjades genom att förbereda inför nästa *rollalong*, samt demontering av utrustning efter önskad längd uppfyllts. Tilläggsstiden som visas i parenteserna i tabell 5.4 & 5.5 blev därmed inte särskilt omfattande för resistiviteten.

Den seismiska undersökningen var jämn vid aktiv mätning men var betydligt mer krävande att montera upp. När undersökningen var igång gick all tid åt att hålla uppe en jämn takt, vilket gör metoden helt begränsad till utförarnas tempo. Skilt från resistivitetmätningarna så måste all utrustning vara uppställd innan mätningen kan påbörja. Den sista seismiska mätningen i tabell 5.4 var präglad av trasig utrustning, vilket speglas i den stora tilläggsstiden.

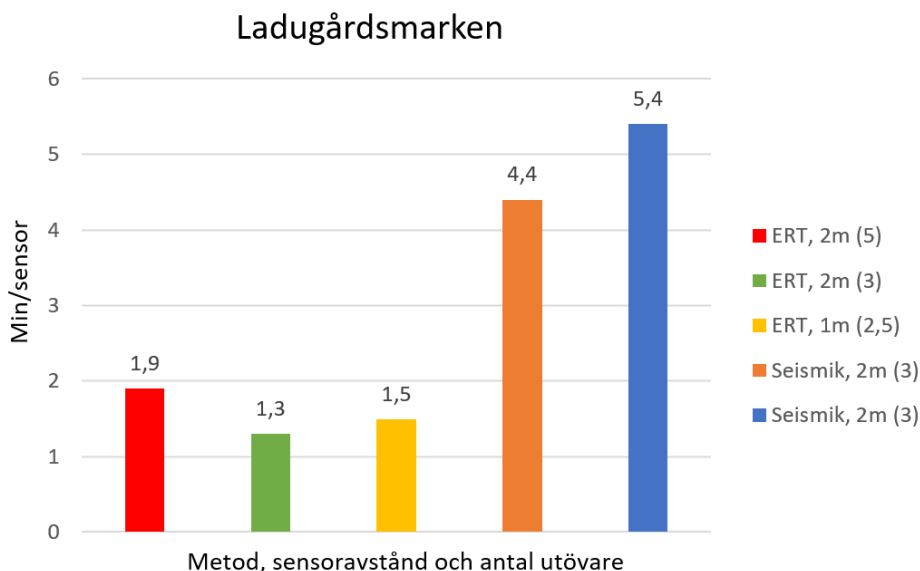
Tabell 5.4: Tidsprotokoll för samtliga mätningar vid Ladugårdsmarken med angivna förutsättningar

Mätning/datum	Strategi	Tid*	Utförare**	Anmärkning
ERT&IP (2m) 2024-03-01	320 m rollalong	3h 40min (+1,5h)	5 personer 1 erfaren 4 bekanta	Vädret var dåligt och ett par negativa värden erhöles.
ERT&IP (2m) 2024-03-05	320 m rollalong	3h 13min (+40 min)	3 personer 1 erfaren 2 bekanta	Vädret var dåligt och ett par negativa värden erhöles. Ungefär 30 minuter uppställningstid.
Seismik (2m) 2024-03-06	160 m, Tre slag stacking	3h 19min (+2,5h)	3 personer Alla bekanta	Cirka 15s per slag (x3) och 15s för flytt. Ungefär 2h uppställning. Tog längre tid än ERT.
ERT&IP (1m) 2024-03-07	120 m rollalong	1h 59min (+1h)	2,5 personer Alla bekanta, den tredje var endast med halva tiden	Vädret var bra och ett par negativa värden erhöles. Ungefär 49 minuter uppställningstid.
Seismik (2m) 2024-03-08	160 m, Tre slag stacking	3h 12min (+4h)	3 personer Alla bekanta	En sladd gick av och behövde lagas. Förlorade kontakt med utrustningen. Tog minst 2h extra.

* Tiden räknas från mätningens start till slut. Tilläggs tiden representerar upp- och nerpackning samt andra företeelser.

** När antalet inte är ett heltal så har antalet utförare ändrats under mätningstiden.

Utifrån tabellen ovan framställs nedan ett stapeldiagram i figur 5.26 där tid per sensor (elekrod/geofon) visualiseras för ladugårdsmarkens mätningar.



Figur 5.26: Tidsåtgång per sensor för mätningarna i Ladugårdsmarken. Metod, sensoravstånd och antalet personer som medverkat representeras till höger i diagrammet.

I tabell 5.5 presenteras den sammanställda tidsprotokollet med den kombinerade mätningen längst ner. Genom att utnyttja tiden som gick till att mäta resistiviteten, för att sätta ut geofoner på samma sensorposition, så behövdes inte GNSS och längd-

mätning upprepas. Detta gjorde tidsåtgången mellan rollalongs mer utnyttjad. Innan seismiken kunde starta behövdes dock resistivitetsutrustningen plockas undan för att inte ge störningar vid utförandet från fotsteg. Från den seismiska mätningen noteras även att minst tre personer är önskvärt för att upprätthålla en optimal tidsåtgång, samt att bristande förberedelser kan ha stor påverkan på den potentiella tidsåtgången.

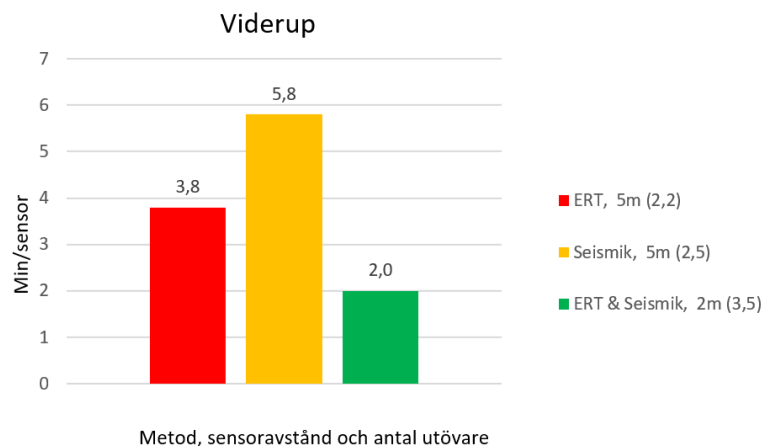
Tabell 5.5: Tidsprotokoll för samtliga mätningar i Viderup med angivna förutsättningar

Mätning/datum	Strategi	Tid*	Utförare**	Anmärkning
ERT&IP (5m) 2024-03-19	400m rollalong	3h 4min (+2h)	2,2 personer 2 bekanta, den tredje hjälpte till att packa ihop)	En kabel var riktad åt fel håll, vilket tog tid att hitta och ändra.
Seismik (5m) 2024-03-20	400m, Tre slag stacking	4h 10min (+3,5h)	2,5 personer 1,5 bekanta 1 oerfaren	Inväntning av mindre buller från väg. För få arbetare. Behövde köra tillbaka till skolan för att ladda fältdatorn. Tog minst 3,5h extra.
ERT&IP (2m) Seismik (2m) 2024-03-21	160 m rollalong & tre slag	Res:1h 21min (+1h) Sei:1h 50min (+3h) Tot:4h 23min (+1h)	3,5 personer 2 bekanta 1 oerfaren	Två till var med och hjälpte till att sätta ut allt i början. Vädret var bra och allt gick relativt felfritt. Starten på seismiken skedde efter resistiviteten var ihopplockad för att undvika störningar från fotsteg.

* Tiden räknas från mätningens start till slut. Tilläggs tiden representerar upp- och nerpackning samt andra företeelser.

** När antalet inte är ett heltal så har antalet utförare ändrats under mätningstiden.

Utifrån tabellen ovan framställs nedan ett stapeldiagram i figur 5.27 där tid per sensor (geofon/elektrod) visualiseras för Viderups mätningar.



Figur 5.27: Tidsåtgång per sensor för mätningarna i Viderup. Metod, sensoravstånd och antalet personer som medverkat representeras till höger i diagrammet.

Utifrån resultaten från tidsmätningarna från fältundersökningen, för vardera metod, visade det sig att tillämpningen av en kombinerad mätning av seismik och ERT sparade minst 30% tid. Där genomsnittet av de snabbaste resistivitets- och seismikmätningarna jämfördes, för att vara på den säkra sidan.

5.4 Enkät svar

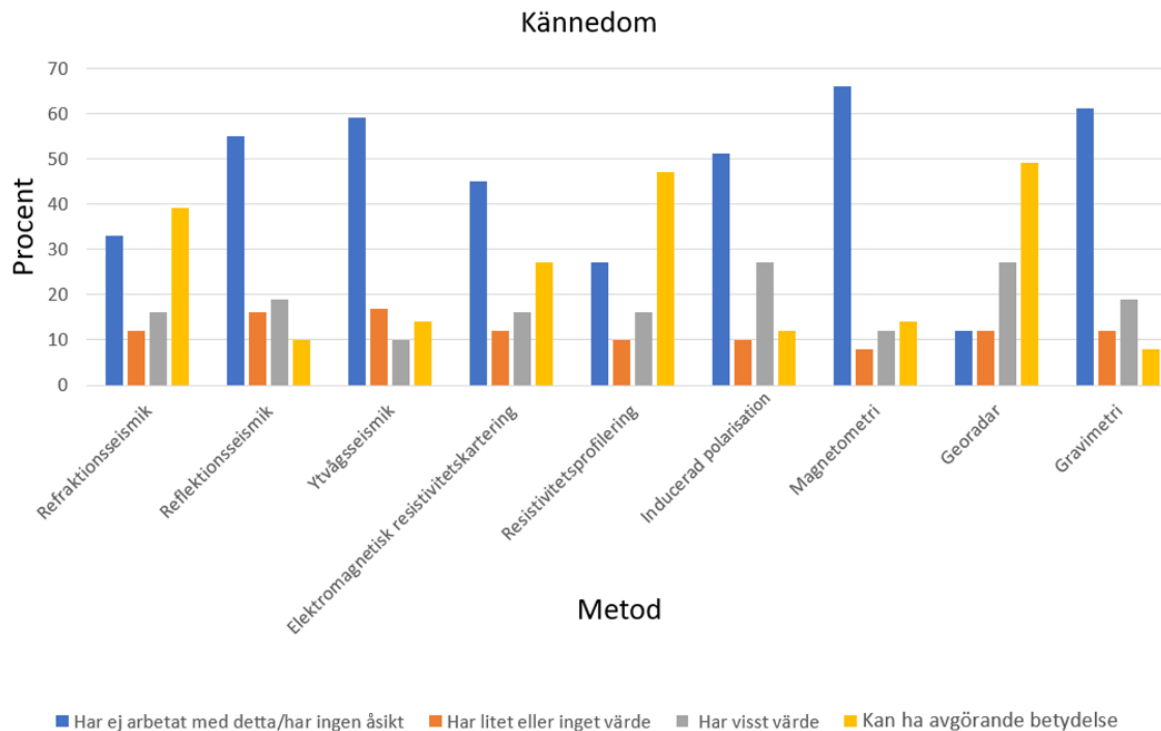
Enkäten har resulterat i 49 svar utav 418 tillfrågade. Nedan sammanfattas resultaten från enkätsvaren med stöd av figurer och kommentarer från bilaga D.

5.4.1 Respondanterna

Majoriteten av respondenterna är för närvarande verksamma inom konsultbranschen (66%) följt av en mindre andel beställare (14%) och forskare (10%) enligt figur D.1. Tidigare i arbetslivet hade större delen av undersökningsgruppen arbetat som konsulter (42%) och forskare (22%) enligt figur D.3. Mängden arbetstid relaterad till infrastrukturprojekt inom gruppen varierar, men svaret kan sammanfattas som att minst 88% av de tillfrågade arbetar med infrastruktur enligt figur D.2. Den största andelen (31%) har angett att deras arbete behandlar infrastruktur till 10-50%. Yrkeserfarenheten är hög, där 49% har arbetat längre än 20 år inom branschen till följt av 25% som svarade att de varit aktiva i 15-20 år, figur D.4.

5.4.2 Kännedom

Bland svarsgruppen ansåg minst 50%, enligt figur 5.28, att de ej arbetat med reflektionsseismik, ytvågsseismik, IP, magnetometri och gravimetri. Den mest kända undersökningsmetoden var georadar följt av resistivitetsprofilering och refraktionsseismik.

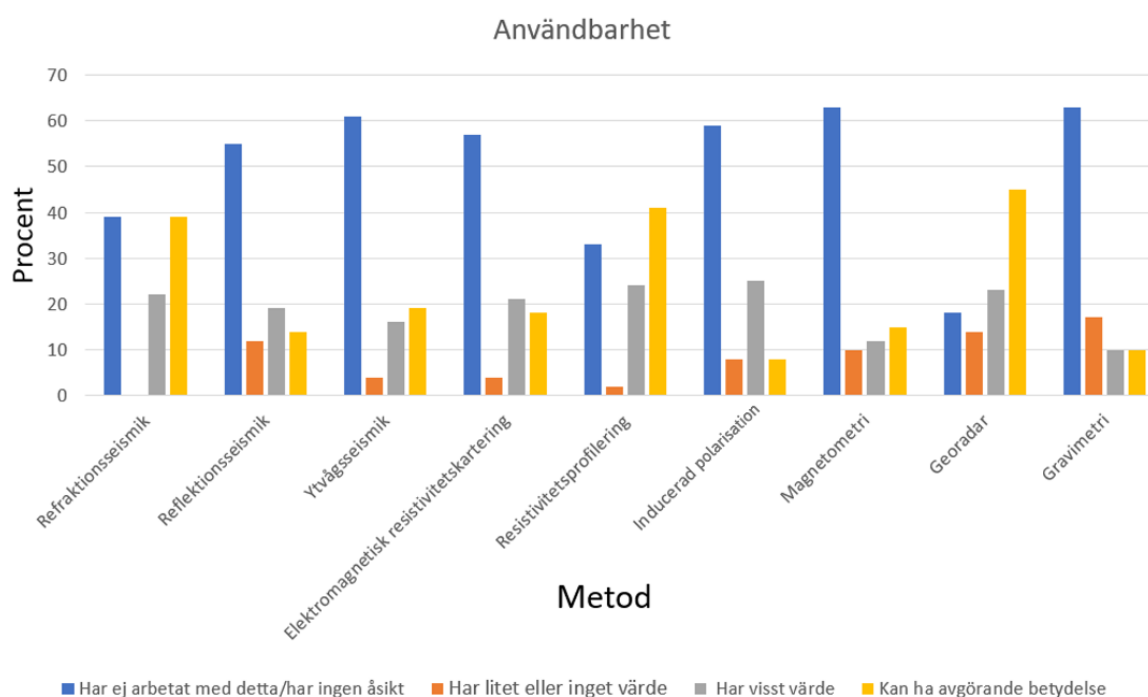


Figur 5.28: Praktisk och teoretisk kännedom om geofysiska metoder.

5.4.3 Användning

Användningen av geofysik i infrastrukturprojekt är enligt figur D.14, till största delen regelbunden (43%) där endast 12% svarar att de ej har använt geofysik. De som angett att de inte har använt sig av geofysik förklarar att det inte i deras roller finns behov eller krav på användningen, samt att man hellre arbetar med geotekniska provtagningar.

Av de metoder som använts anses georadar, resistivitetsprofilering och refraktionsseismik vara mycket användbara medan gravimetri, magnetometri och reflektionsseismik anses mindre användbara. Nedan presenteras i figur 5.29 ett stapeldiagram över hur användbara respektive metod anses vara.



Figur 5.29: Stapeldiagram över hur användbara respektive metod anses vara.

I tabell 5.6 redovisas, baserat på enkätkommentarer, de mest förekommande användningsområdena för metoderna resistivitet, inducerad polarisation, magnetometri och refraktionsseismik.

Tabell 5.6: Användningsområden för olika geofysiska metoder enligt respondenternas svar.

Resistivitet	Inducerad Polarisation	Magnetometri	Refraktionsseismik
Jordlagerföljder	Vattenförande/täta lager	Gångbergarter	Bergnivå
Läckage av vatten	Föroreningar	Mineralprospektering	Bergkvalité
Grundvatten	Mineraliseringar	Oexploderad ammunition	Jordlagerföljd
Sprickzoner	Komplement till resistivitet	Metalliska objekt	
Djup till berg	Sprickzoner		
Hitta lertlager	Metallföremål		
Hitta föroreningar	Läckage		

5.4.4 Projekt

Enligt 45% av respondenterna står användningen av geofysik i markundersökningsfasen för 1-10% av den totala projekttiden, samtidigt som budgeten oftast ligger under 5%, se figur D.25 och D.24 .

5.4.5 Förarbete och modellering

Vid förarbete inför en fältmätning görs oftast en geologisk/hydrogeologisk konceptuell modell där karaktären är splittrad mellan 2D, 3D och beskrivningsunderlag. Vidare upplever respondenterna att syntetisk modellering inte används särskilt ofta då 57% svarade att de ej använder det enligt figur D.28 i bilaga D. Av de 43% som har använt syntetisk modellering var det till största del enstaka tillfällen (84%), figur D.29 i bilaga D. De som använt syntetisk modellering har använt sig av program och beräkningsmetoder enligt tabell 5.7.

Tabell 5.7: Exempel på modelleringsverktyg för geofysik.

Rayfract	UBC DCIP3D	AARHUS Workbench
Res2DInv	ModelVision	FME
ZondRes2D	Geokalkyl	Sketchup
Surfer	MicroMine	Civil3D
Geoseep	Geostudio	GPRsim.net
Geogiga Modeling	Mr3dmod	Res2Dmod

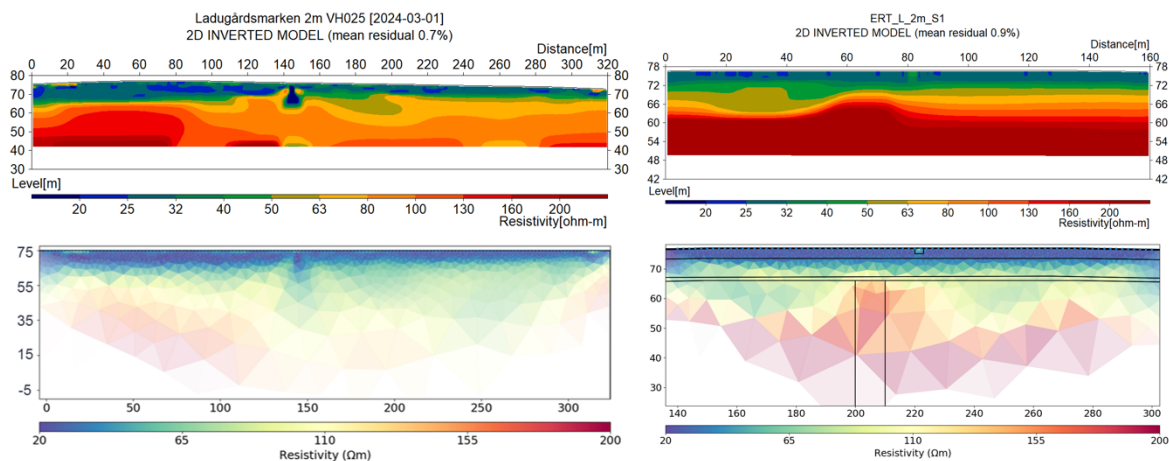
Kommentarer från frågan om tillägg kring användningen av geofysik i infrastrukturprojekt finns bifogat i bilaga D.

6 Diskussion

6.1 Korrelation mellan syntetisk och verklig modell

6.1.1 Ladugårdsmarken

För resistivitetsmätningarna med ett elektrodavstånd på 2 m syns en tydlig övergång i markens resistivitet och uppladdningsförmåga vid ett djup där bergytan var tydligt synlig, för samtliga sektioner i de inverterade syntetiska modellerna. De verkliga resistivitetvärdena i berggrunden verkar vara något lägre än de syntetiska modellernas. Detta kan bero på underskattningar av lerskifferns och moränernas respons, på grund av diabasgångens höga resistivitet och pyGimlis representation av detta i forwardmodellen, eller en kombination av alla. Detta presenteras i figur 6.1



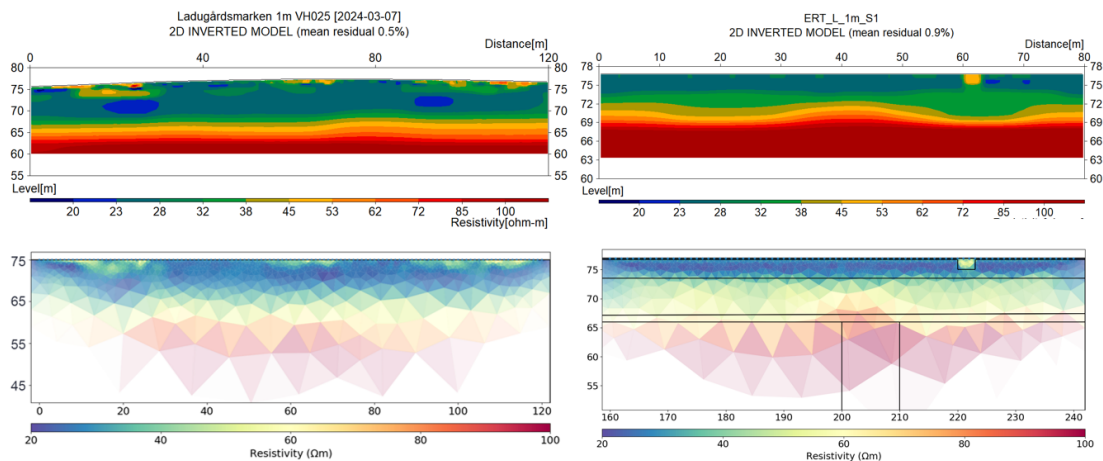
Figur 6.1: Jämförelse mellan verkliga- (vänstra) och syntetiska (högra) inversioner för 2 m intervallet vid Ladugårdsmarken från pyGimli (nedre) och res2Dinv (visualiserad i Erigraph, övre). De syntetiska modellerna är från sektion 1 och visualiserar ovan 140-320 m längs den ursprungliga 400 m långa sektionen.

Av de tre sektionerna som gjordes, figur 5.3 - 5.14, så är sektion 1 mest lik mätresultaten. Det kännetecknande intermoräna lagret i sektion 2, figur 5.4, går inte att urskilja från mätdata, och det ökade djupet i sektion 3 är svårt att motivera utifrån liknelserna i den syntetiska inversionen för sektion 1. Men på grund av den märkbart tunnare mäktigheten av det lågresistiva bandet från 120-320 meter i mätresultatet, tillsammans med en minskning i resistivitet till 80 ohm-m i underliggande lager, så kan en kombination av sektion 1 och 3 vara möjligt. Med företeelsen av en lokal uppskjutning av berggrunden i början, följt av en betydligt mäktigare nordostmorän.

Från den verkliga 2 m mätningen syns en tydlig anomali efter 143 m, se figur 6.1. Denna lågresistiva punkten som också syns tydligt i IP-mätningen, figur 5.16, liknar inget ur de syntetiska modellerna som undersöktes. Men anomalins läge och utformning påminner om hur den högresistiva sandlinsen i sektion två, figur 5.4, sprids ner i de

övriga lagren. Antagandet som gjorts är därför att det vi ser är något ytnära som inversionen representerar mer vertikalt.

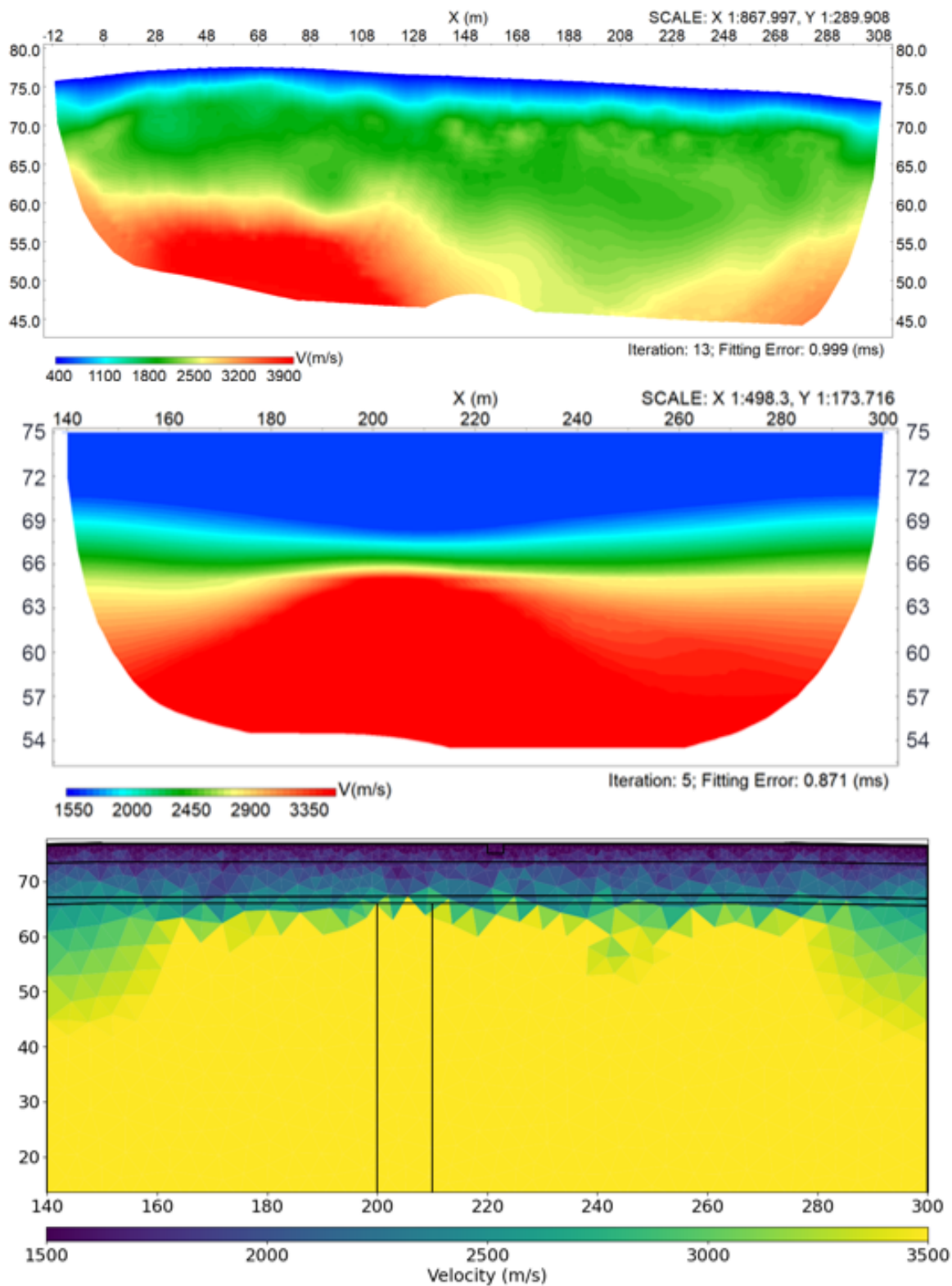
Om det skulle vara så att det finns två lager av morän, syns dessa inte i den utsträckningen som den syntetiska inversionsmodellen visar. I den kan en tydlig gräns mellan den lågbaltiska- och nordostmoränen noteras, vilket är svårt att urskilja ur den mätta 1 m mätningen, figur 6.2. Detta kan bero på att moränerna är snarlika varandra i elektrisk konduktivitet eller att det endast existerar en morän.



Figur 6.2: Jämförelse mellan syntetiska (högra) och verkliga (vänstra) inversioner för en meters intervallet vid Ladugårdsmarken från pyGimli (nedre) och res2Dinv (visualiserad i Erigraph, övre).

Om diabasgången korsar mätområdet går den utifrån mätresultatet inte att se. Diabasen borde precis som i figur 6.2 visa sig som en upphöjning av det högresistiva lagret. En sak som ska tas i åtanke är här att resistiviteten bredvid en diabasgång kan vara lägre än omgivande berggrund vilket kan ske då gångbergarten har blivit vittrad och vattenförande.

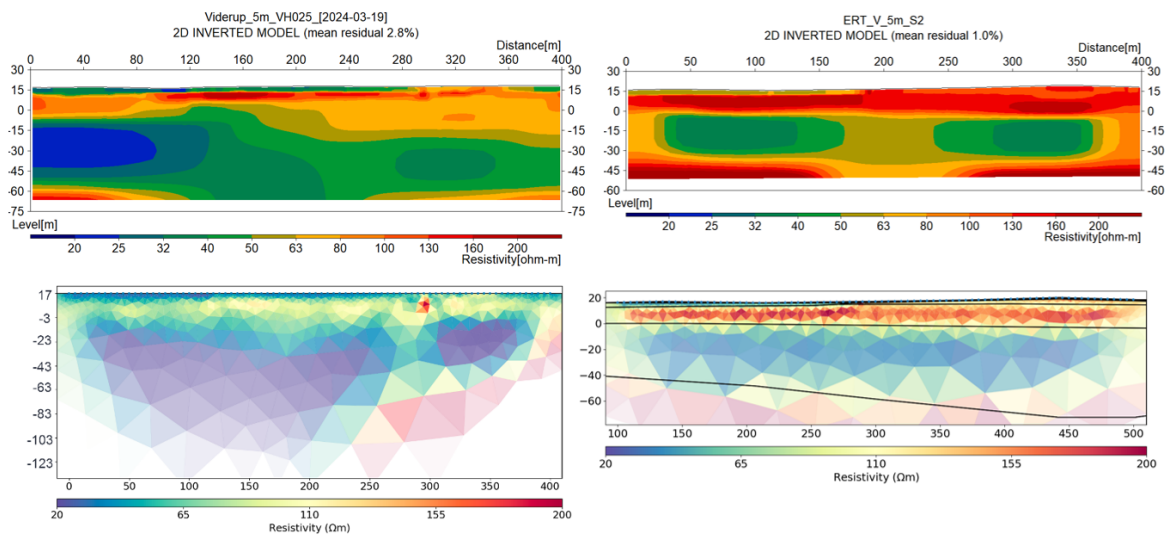
Från den seismiska mätningen vid Ladugårdsmarken går det i den första delen av sektionen att se en övergångszon mellan nivån 60-62 m.ö.h., där en tydlig ökning i hastighet sker, se figur 6.3. I den syntetiska modellen (nedre) går det att se ett liknande skikt vid nivå 60 m.ö.h. men tolkningen blir svårare när den gjordes i samma inverteringsprogram (Geogiga). Efter konsultation antogs det att den konkava och konvexa formen på övergången kan vara ett resultat av brist på slag utanför sensorerna, vilket kan förklara dess underliga form. Det tydliga droppet i hastighet efter 130 meter kan bero på sammansättningen av de två mätlinjerna, vilket lämnade en zon i nedre delen av mitten med mindre uppmätt data. Det går dock att urskilja gropar i pyGimlis bergyta men detta har antagligen att göra med att inverteringen gått för långt. Den tydligt kullformade diabasgången i mitten illustrationen, gör dock den noterbara höghastighetszonen i mätdatan till ett lockande förslag på diabasgångens läge. Ett annat förslag är det som noterades från resistivitetstolkningen, om att bergytan kan gå från ett högre läge likt sektion 1, till ett lägre som i sektion 3. Ur den syntetiska modellen verkar det inte gå att urskilja någon gräns mellan två moräner. Hastigheten från mätningarna, på cirka 2000 m/s för det gröna lagret, har samma värde som de materialparametrar som antogs för båda moränerna under grundvattenytan.



Figur 6.3: Jämförelse mellan två syntetiska och en verklig inversion för 2 m geofonavstånd vid Ladugårdsmarken. Syntetisk inversion från pyGimli visas nederst, följt av ytterligare en syntetisk inversion från Geogiga i mitten och överst den verkliga mätta inversionsmodellen.

6.1.2 Viderup

Från resistivitetsmätningarna kan en övergång till ett mer högresistivt topplager urskiljas vilket har en tydlig liknelse till den syntetiska övergången från det lågresistiva svämsedimentet till den postglaciala sanden, se figur 6.4. Sektion 1 och 3 i de syntetiska modellerna för Viderup, visar ett något lägre resistivitetslager av isälvsediment under den postglaciala sanden. Detta syns inte i inversmodellen vilket gör att sektion 2 efterliknar den verkliga datan bäst när det gäller kontrasten i resistivitet.

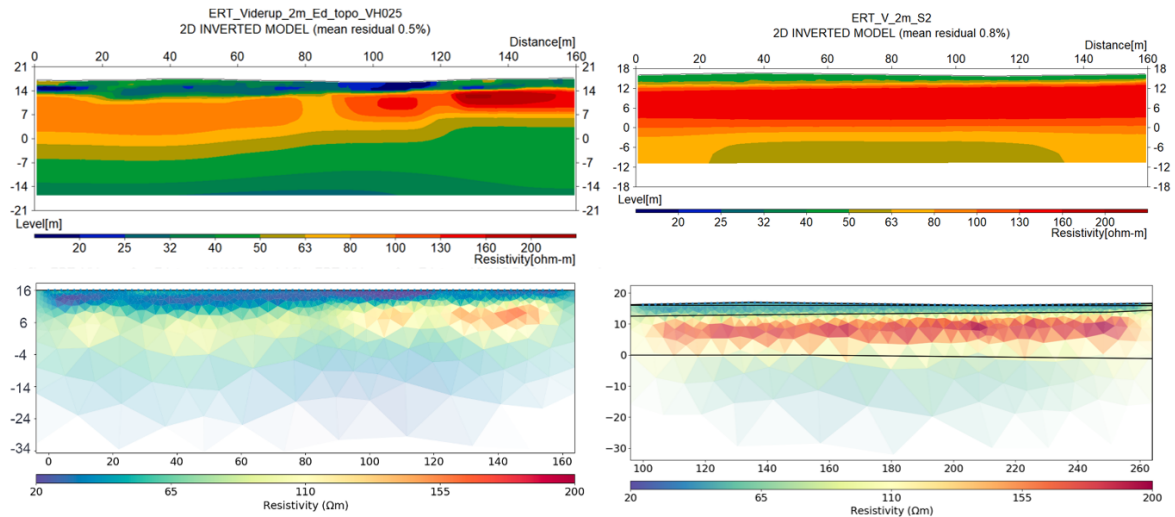


Figur 6.4: Jämförelse mellan syntetiska (högra) och verkliga (vänstra) inversioner för 5 m ERT (linje 8) vid Viderup från pyGimli (nedre) och res2Dinv (visualiserad i Erigraph, övre).

Jorrdjupskartan och brunnsarkivet från SGU (u.å.) antydde att berggrunden låg väldigt djupt. Uppfattningen var att Kävlingeån utgjorde en dal men att berggrundens lägsta punkt var okänd. Från 5 m mätningarna i figur 6.4 så går det inte att med säkerhet säga att någon bergyta har upptäckts, då det som liknar bergytan i figurerna ligger för djupt för att ge säker data. Detta gör också bergytans stupning svår att avgöra från de syntetiska modellerna, då upplösningen är lägre. Som tidigare nämnts i kapitel *Resultat, Syntetiska modeller, Viderup*, så var resistiviteten för lerstenen angiven som lägre än den ovanliggande moränens, se figur 5.2 & 4.7.

Notera också att den mest trovärdiga datan går att återfinna centralt i överhalvan av inversionsmodellerna, vilket gör all data i de nedre hörnen opålitliga då de representeras av minst data. När det gäller de övre inverteringarna så representeras hörnen inte av någon faktiskt data. Så även om det finns stora liknelser med de syntetiska och de verkliga resultaten gällande en synlig bergyta så måste man vara kritisk.

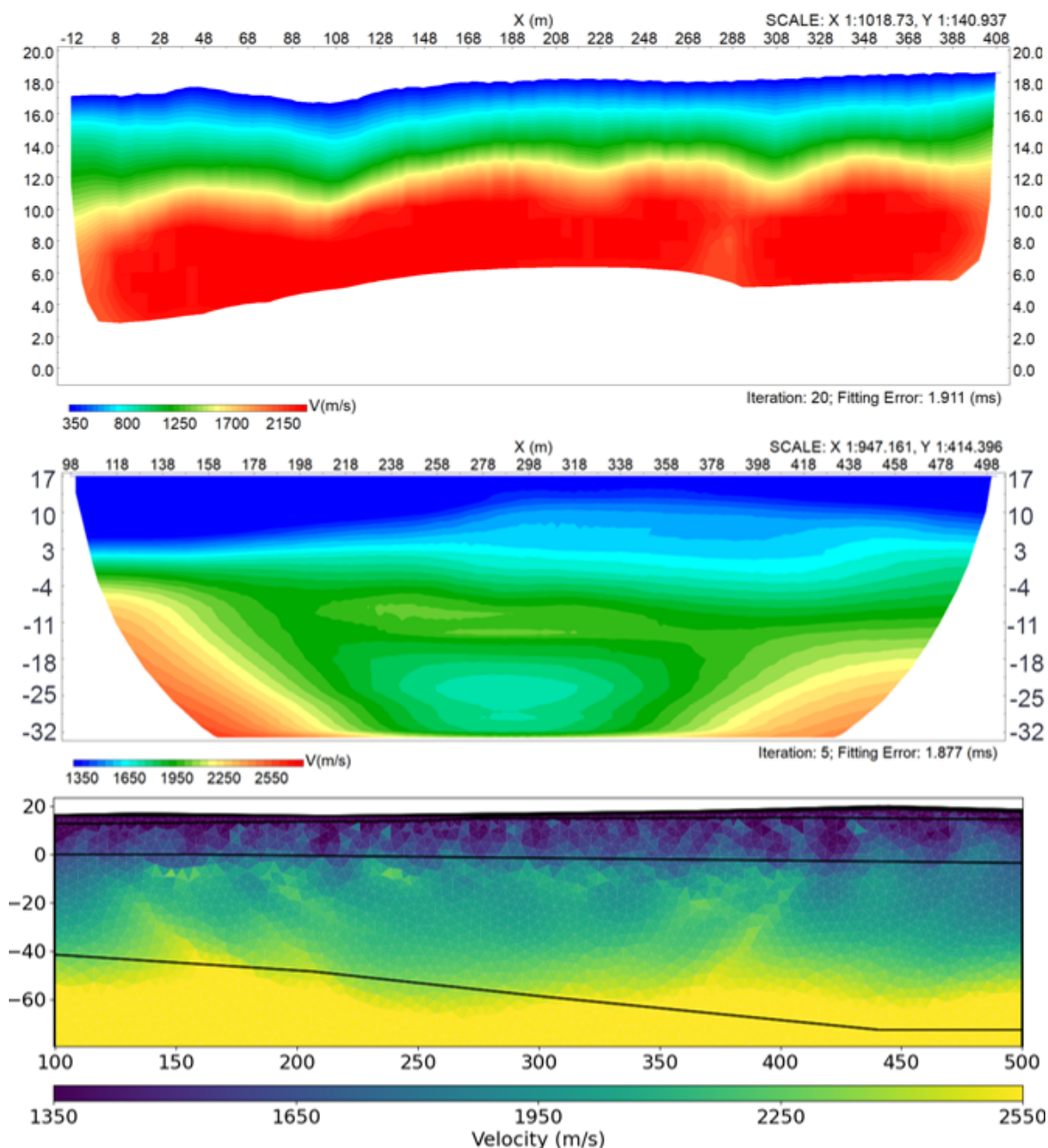
Jämförelserna för resistivitetsmätningen på 2 m syns i figur 6.5 nedan. Ett tydligt högresistivt band finns i båda sektionerna där ett 2 m elektrådavstånd verkade vara ett lämpligt val för att avgöra det lågresistiva lagrets mäktighet, som även styrks från de syntetiska modellerna.



Figur 6.5: Jämförelse mellan syntetiska (högra) och verkliga (vänstra) inversioner för 2 m ERT (linje 7) vid Viderup från pyGimli (nedre) och res2Dinv (visualiserad i Erigraph, övre).

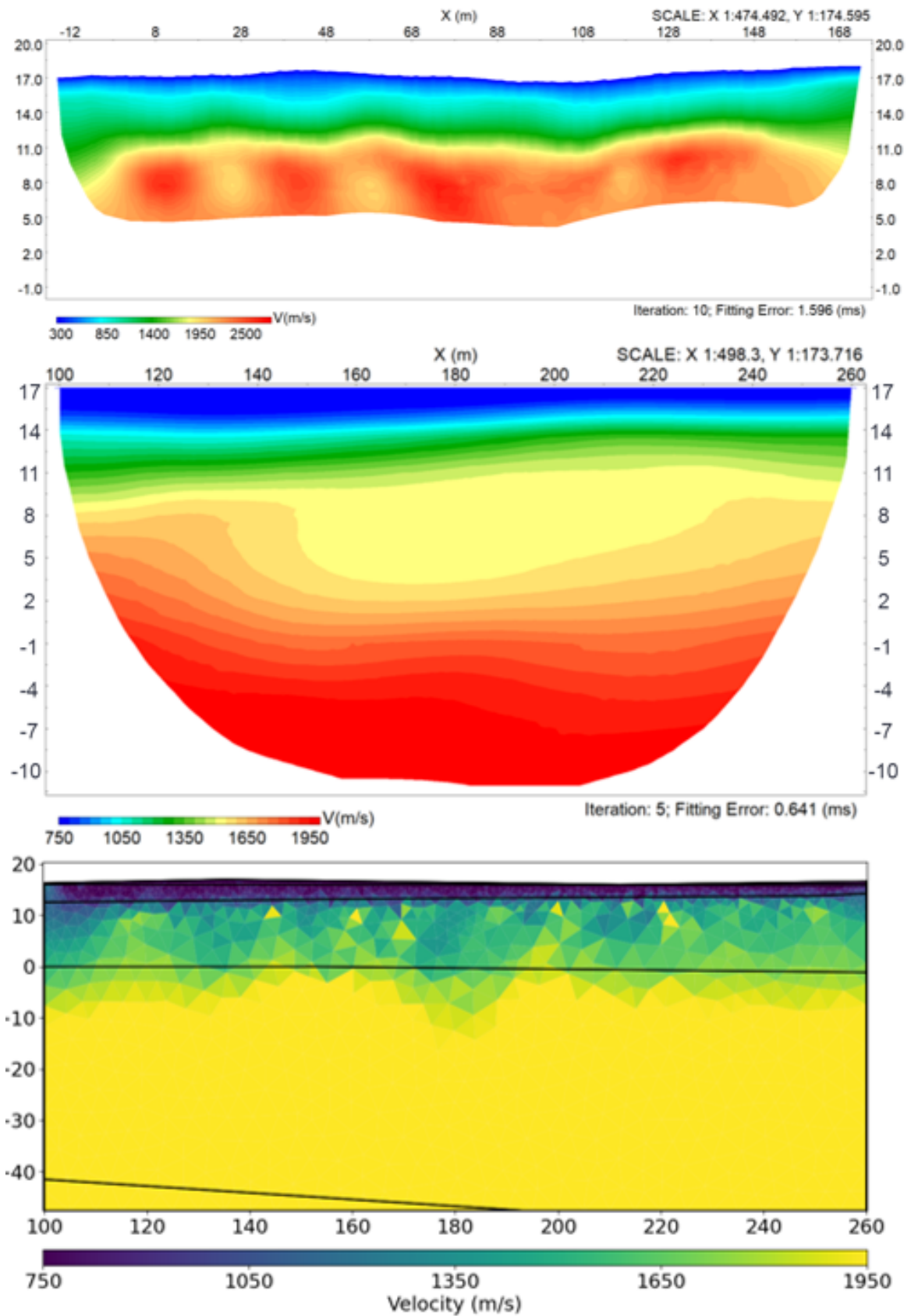
Resultatet från den seismiska 5 m mätningen var som tidigare nämnt, inte särskilt djupt på grund av svårigheter med att urskilja första ankomsttider bortom de närmsta geofonerna. Mätdata visar på en tydlig refraktor mellan 4 och 7 meters djup vilket inte riktigt överensstämmer med de syntetiska modellerna. Men som togs upp i resultatet så är upplösningen väldigt låg och därmed djuptolkningen grov.

Färgskalan är antagligen också vilseledande och en mer detaljerad bild hade mycket väl kunnat likna det homogena blåa lagret från mittenbilden i figur 6.6. Då mätningens ändamål var att ge mer information om de djupare lagren och komplettera resistivitetvärdena, så kan ingen bra jämförelse dras huruvida de syntetiska modellerna bidrog till ett lämpligt val.



Figur 6.6: Jämförelse mellan två syntetiska och en verklig inversion för 5 m geofonavstånd vid Viderup. Syntetisk inversion från pyGimli visas nederst, följt av ytterligare en syntetisk inversion från Geogiga i mitten och överst den verkliga mätta inversionsmodellen.

För 2 m mätningen i figur 6.7 så är liknelserna mer märkbara. Ett skikt runt 800 m/s med en tydlig mäktighet på 3 till 4 meter följt av ett snabbare 2100 m/s lager med en grönaktig övergångszon. Nivån 12 till 13 m.ö.h. matchar väl det inritade skiktet i pyGimli. Bristen på djup i relation till de syntetiska är antagligen en följd av störningar i datan från motorvägen likt de för 5 m mätningen. En god uppfattning om det antagna svämsedimentets mäktighet och hastighet går dock väl att se, men mäktigheten hos det högresistiva lagret i figur 6.4 är fortfarande svår att tolka.



Figur 6.7: Jämförelse mellan två syntetiska och en verklig inversion för 2 m geofonavstånd vid Viderup. Syntetisk inversion från pyGimli visas nederst, följt av ytterligare en syntetisk inversion från Geogiga i mitten och överst den verkliga mätta inversionsmodellen.

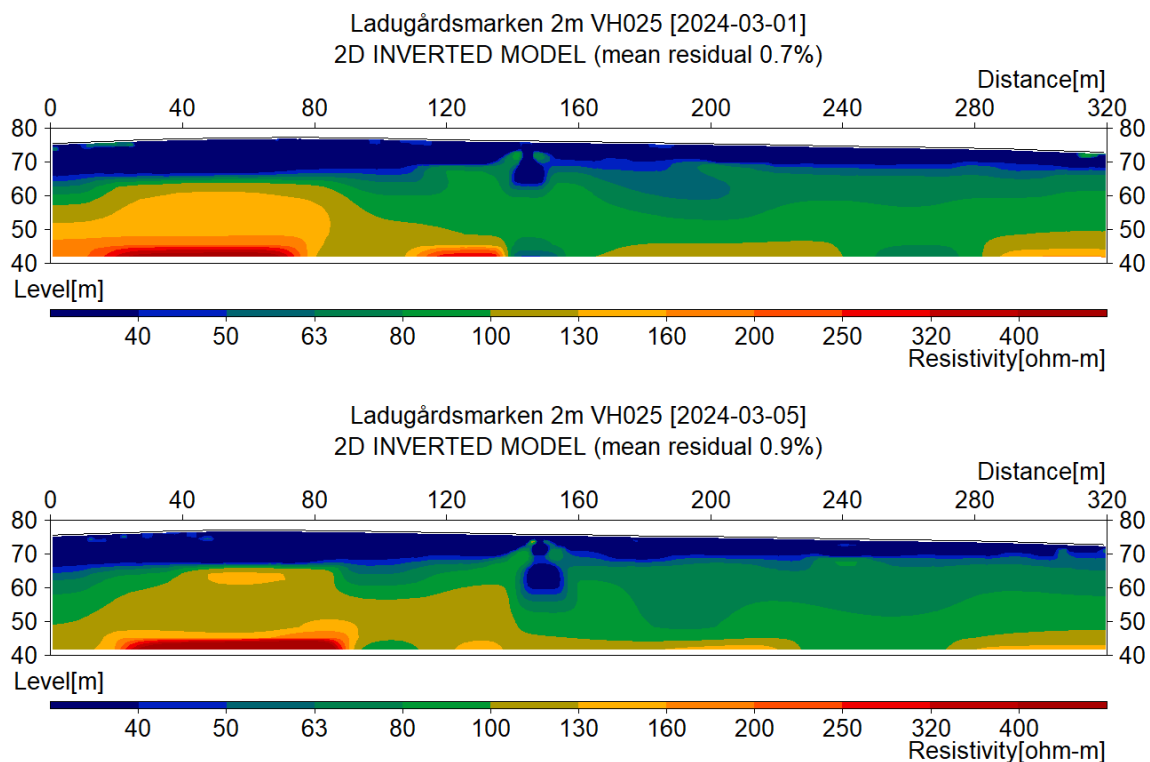
6.1.3 Geologisk tolkning och kompletteringar

6.1.4 Ladugårdsmarken

Den generella geologin verkar ha tolkats bra i förstudien utifrån vad de geofysiska resultaten visar, men justeringar kommer att behöva göras utifrån den nya information som erlagts efter fältundersökningen. Följande diskuteras resultaten av de syntetiska modellernas antaganden och de faktiska mätresultat i syfte att kunna förbättra den geologiska modell som tidigt framtoogs.

En del av anledningen till att undersökningsplatsen valdes ansågs av SGU, via personlig kommunikation, vara att det fanns potential för intermoräna sediment. Utifrån de syntetiska modellerna för sektion 2, figur 5.4, där ett intermoränt lager av sand simulerats, var det inget som syntes i de fältmätningar som utfördes. Utefter de seismiska mätningar som gjorts visade det sig att en tydlig refraktor längs med den tänkta bergytan vid början av mätlinjen på cirka 10 m djup sedan sjönk ner till 25 m och därifrån upp mot 10 m igen, se figur 6.3.

En lokal sänka i berggrunden tolkas tillsammans med de resistivitetmätningar enligt figur 6.8 som visar på lägre resistivitet i de lager som befinner sig ovanför refraktorn. Den nya tolkningen som uppenbarats är att den uppskattade bergytan, från den konceptuella modellen, på 10 m djup varar fram till meter 40–80, för att sedan sjunka till cirka 25 m under markytan. Detta stämmer bra överens med den ökning i jorddjup som visas i figur 4.7.



Figur 6.8: ERT resultaten från 2 m elektrodavstånd med resistivitetsintervall mellan 40 och 400 ohm-m.

Resistivitetsmätningarna visar också på en tydlig gräns mellan två skikt i det som tolkas vara jordlagret. Värden på resistiviteten stämmer överens med de parametrar som var antagna för nordost/lågbaltiska moränerna. Tolkningen här är att den äldre nordostmoränen är ansamlad i sänkan, med en resistivitet kring 80 ohm-m, och topplagras av den yngre lågbaltiska lermoränen (30 ohm-m). Detta hade antagligen förklarat bristen i skikt vid den första delen av mätlinjen (0–80 m), då nordostmoränen bör ha skrapats bort av tidigare inlandsis och kvarstått under den nya lågbaltiska moränen.

Bergartskartan i figur 4.6 antydde att en diabasgång borde träffa vår mätlinje, men eftersom tolkningarna av gångens placering har en stor felmarginal kan den dyka upp vart som helst (eller ej) längs med tvärsnittet. Detta är en osäkerhet som kan undersökas med övertäckande geofysik och gör då att placeringen av diabasgången varierar i den syntetiska modellen. Parameterstudien angav diabasgången som högresistiv jämte mot omkringliggande berg samt att den ger ett större IP-värde och ljudvågshastighet. Detta simulerades i den syntetiska modellen men gav inget tydligt svar från de faktiska mätningarna som gjordes. En möjlig anledning till detta kan vara att diabasgången inte har de fysiska egenskaper som vi tidigare trott. Enligt en resistivitetsmätning 1 km öster om Ladugårdsmarken, av studenter i kursen *Fältundersökningsmetodik* (LTH)¹, visade resultatet på en tydlig diabasgång med lägre resistivitet än omkringliggande berg. Orsaken till lägre resistivitet kan bero på sprickor (tektoniskt betingade eller krympsprickor) som ger en högre vattenföring. En annan förklaring, som inte utesluter den första, kan vara att det finns mineraliseringar och kontaktmetamorfos vid gränsen mellan diabasen och omgivande berg.

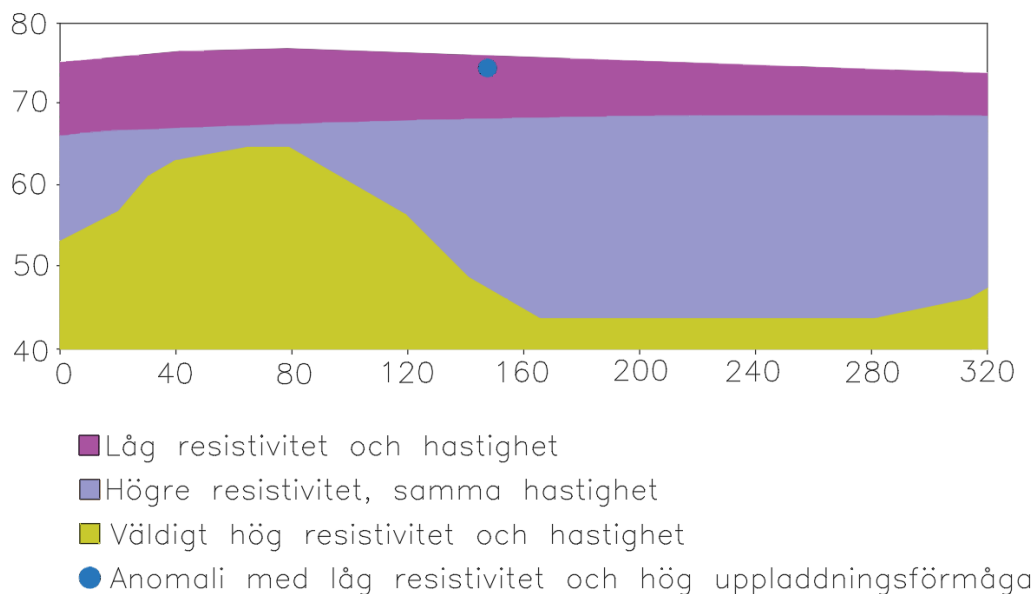
De två magnetometriska undersökningar som gjordes parallellt med tvärsnittet gav indikationer på en svagt förhöjt magnetisk gradient vid 250 meter som inte är karakteristiskt för en diabasgång men om den möjligen är vittrad kan detta vara en svag ledtråd. Tesen styrks dock inte av varken IP eller resistivitet på platsen. Det som enligt figur 5.16 och 5.17 skulle kunna likna en diabasgång i form av högre IP och resistivitet ligger dels i utkanten av mätningen vilket gör inversionsresultaten osäker och är dessutom nära en lågspänningsledning som kan påverka resultatet. Storleksordningen på resistiviteten verkar också vara lite låg vilket gör att högresistivitetszonens värde passar bättre in på lerskiffer än diabas. Enligt den seismiska mätningen som gjordes finns det, vid den intressanta punkten från magnetometrin, inget som tyder på en förhöjd hastighet. Däremot förekommer en högre hastighet runt det område som har högre resistivitet och IP men inga tecken på ett förhöjt magnetiskt fält gör därför att frågan kring diabasgången återstår och att platsen kan vara intressant för vidare undersökningar.

Anomalin som uppenbarade sig i den första mätningen och som kvarstod i den parallellförflyttade andra mätningen, var däremot något som inte bekräftades av den arkiverade datan från Ledningskollen. Lantmäteriets historiska flygbilder från 1960-talet, enligt figur 4.2, visade på en väg som tidigare sträckte sig ca 10 m bredvid anomalin men är inte riktigt parallell med dess riktning. Objektets ringa storlek och djup om ca 1-2 m, tillsammans med hög ledningsförmåga och uppladdningsförmåga

¹Peter Jonsson, Universitetsadjunkt, Teknisk Geologi (LTH). Personlig kommunikation den 5 maj 2024

gör att det förmodas vara en kabel/rör av något slag enligt den effekt som beskrevs i litteraturstudien där elektromagnetisk induktion kan ge lokala stora utslag orsakat av metallföremål. Eftersom två linjer med en magnetometer inte gav något utslag för magnetiskt gradient vid platserna för anomalin tyder det på att föremålet inte är ferromagnetiskt. En metod som skulle kunna användas i vidare undersökningar är att använda en slingram för att försöka inducera ett magnetfält som går att läsa av och på så sätt följa anomalins utbredd. Georadar är även en metod som går att använda till att upptäcka rör/kablar men då marken består av lermorän försvinner radarvågorna lätt trots det grunda sökdjupet.

Det kommer att behövas kompletterande borrhningar och labbprover för att verifiera och stödja tolkningen. Det som går att uttala sig om, utifrån enbart de geofysiska mätningarna, är presenterat i figur 6.9. Tydliga skikt och dess utbredning, tillsammans med en ytlig anomali med känd riktning, kan därefter användas för att ge en utvecklad modell av markförhållandena vid Ladugårdsmarken.

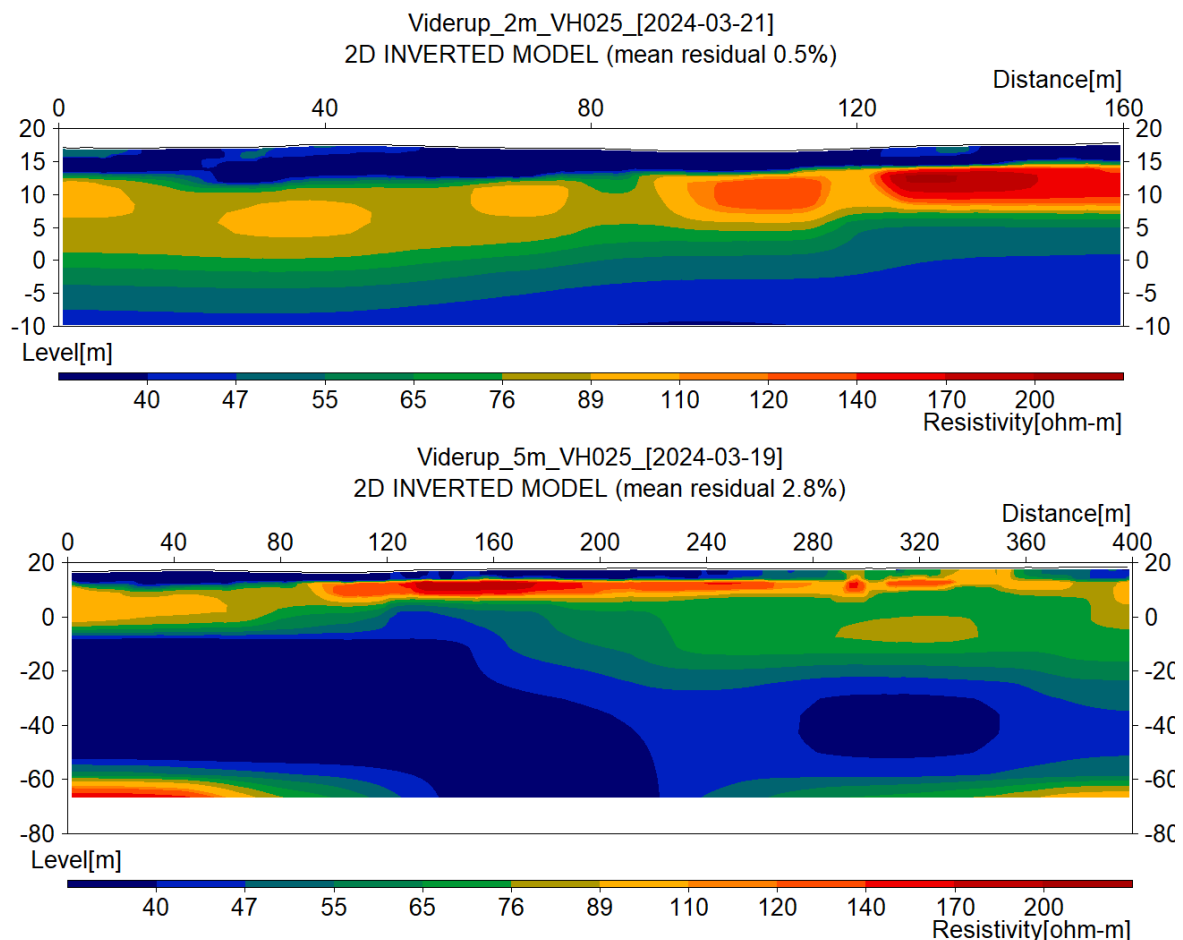


Figur 6.9: Slutlig tolkning utifrån fältarbetets resultat för undersökningsområdet vid Ladugårdsmarken.

Om en borrhplan för att bedöma bergytan, utifrån den konceptuella modellen, hade upprättats, tillsammans med konventionell interpolering av jord- bergsonderingar, så hade den sett märkbart annorlunda ut beroende på avstånd och läge mellan borrhningarna. Om en lokal sänka av bergytan finns, så hade en interpolering kunnat tolka detta som en plan lutning av berggrunden. Med lite otur hade borrhningar kunnat rent av missa den och tolkat bergytan som plan. Genom att använda geofysiska mätningar som ett delmoment i den iterativa geologiska modelluppbyggnaden enligt Fookes (1997), så finns nu ett tydligt underlag till kompletteringsmätningar som annars inte hade funnits. Genom att borra mellan 40 - 80 m och 200 - 280 m längs den geofysiska profilen i figur 6.9 kan en betydande uppfattning erhållas där bergytan kan tolkas mer exakt med färre borrhningar. Detta genomsyrar de sammanfattningar som drogs från enkäten, där geofysikens styrka noterades i dess förmåga att ge underlag till planeringen av geotekniska mätningar.

6.1.5 Viderup

För området Viderup är det svårare att dra slutsatser om geologin då den är mer komplex samt saknar djupare seismisk data. De konceptuella tolkningarna av ytskikten i området stämmer bra överens med resultaten från samtliga 2 m mätningar, se figur 6.5 och 6.7. Den teoretiska gränsen till svämsedimentet är ett tydligt exempel på detta då den visade starka liknelser till den konceptuella modellen. Mäktigheten på 3-4 meter passar bra, dess utsträckning går en bit förbi översvämningsfronten från platsbesöket inför undersökningen. En övergång till ett högre resistivt ytskikt efter 280 m går också att urskilja ur figur 6.10, vilket kan vara en övergång till den postglaciala sanden.



Figur 6.10: ERT resultaten från 2 och 5 m elektrodavstånd med resistivitetsintervall mellan 40 och 200 ohm-m.

Förekomsten av ett underliggande högresistivt lager syns, men det verkar ha lägre resistivitet än tidigare antaget och en mer varierande mäktighet. Utifrån den höga grundvattenkapaciteten som området uppvisade i figur 4.21, så är det rimligt att det är ett mer sorterat grovkornigt lager. Om detta lager består av något finkornigare isälvsediment eller isälvsand är svårt att säga, men ett skikt är tydligt att se.

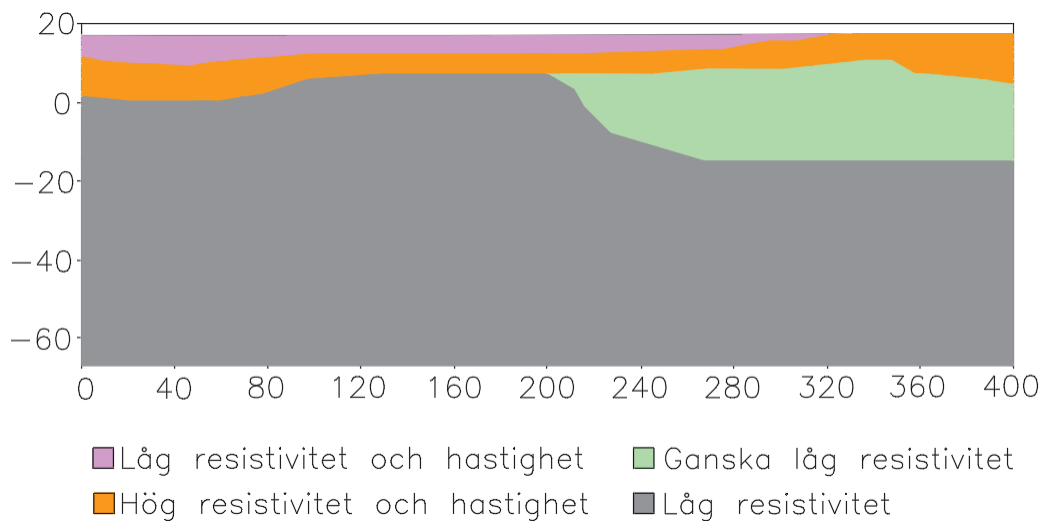
Någon gräns mellan de antagna isälvsavlagringarna och den postglaciala sanden är relativt svår att särskilja med enbart resistivitetsmätningar, och antagligen så är det irrelevant ur en hydraulisk synpunkt. Men då det råder en brist på tydlig gräns och hur ytnära skiktet går, så är det fullt möjligt att det är den postglaciala sanden som

går under svämsedimentet. Den kronologiska ordningen av lagerföljden i kapitel 4.1.2 tillåter också denna möjligheten.

Från 5 m mätningen syns ett djupt lågresistivitet lager runt 40 ohm-m utbreda sig, med en något högre resistivitetszon runt 70 ohm-m efter 200 m i figur 6.10. Utseendet liknar mycket hur de syntetiska modellerna tolkade den underliggande moränen, då dessa inverteringar gav en sänkning i resistivitet när det överliggande lagrets resistivitet ökade. Ökningen i resistivitet till 70 ohm-m matchar en sänkning i resistivitet i det övre lagret, vilket kan betyda en större grad av inblandning av det sorterade sandlagret ner i marken. För att ge ett säkert svar bör borrning (t.ex kärnborrning) genomföras.

Bergytans läge kvarstår att ta reda på. Enligt 6.4 så fanns liknelser mellan de syntetiska modellerna, men av svag säkerhet. Från antagningarna som gjordes när materialparametrarna valdes, så uppgavs att Kågeröds ler-/sandsten kunde ha en resistivitet på 60 ohm-m, vilket gör att vi inte kan utesluta att den uppskattade bergytan är betydligt högre upp än förväntat.

Från de konceptuella modellernas initiala uppfattningar så har de geofysiska mätningarna lyckats bekräfta och utesluta en hel del påståenden. Likt för tolkningen av geologin vid Ladugårdsmarken, så har en sammanfattning av fältresultaten presenterats i figur 6.11. Den geologiska modellen kan nu förbättras genom tillskottet av resistivitets och hastighets gränser.



Figur 6.11: Slutlig tolkning utifrån fältarbetets resultat för undersökningsområdet vid Viderup.

Resultatet som har erhållits är att det finns ett 3 - 4 meter tjockt lager, som antagligen är svämsediment. Lagret kan på grund av dess låga kornfraktion ställa till med sättningar vid grundläggning. Laboratieprover för CRS- och ödometerförsök bör därmed tas för olika djup och läge från ån. Den goda upplösningen av lagrets utbredning och mäktighet, är därmed av högt intresse för planeringen av geotekniska undersökningar.

Ett grövre underliggande lager på 7 till 14 meters mäktighet sträcker sig längs med hela mätlinjen kan i sin tur bidra med hydrauliska problem vid schaktning, på grund av dess permeabilitet och grundvattnets höga nivå. Några skruvprovtagningar längs med

profilen, för att avgöra vad för kornfraktion som utbreder sig under ytan, kan vara en lämplig lösning för att avgöra dess uppbyggnad och utsträckning. Laboratorieprover kan även här användas, i samma hål som för de antagna svämsedimentet, för att avgöra dess permeabilitet och deformationsegenskaper.

Då de djupare lagren enbart baseras på resistivitetsdata, så råder stor osäkerhet kring dess uppbyggnad. Från den konceptuella modellen antogs det att en morän fanns undertill då jorrdjupskartan och omkringliggande brunnar angav mäktiga jordlager över 50 m, men då berggrunden kan ha förväxlats med jordlager, så kan den konceptuella modellens uppfattning av bergytan behöva uppdateras. Genom att utföra jord- bergsondering eller kärnborring vid 120 och 320 meter enligt figur 6.11 skulle en ytligare berggrund kunna bekräftas eller uteslutas. Om bergytan inte uppenbarar sig, så hade eventuellt ett annat elektrodarrangemang, som dipole-dipole sekvens för resistivitmätning, med 5 m intervall kunnat nå lite djupare. Alternativt en mätning med ännu större elektrodavstånd som i Steelman m. fl. (2017) där användningen av 10 m elektrodavstånd, för att hitta akviferer i berggrundsdalar, användes. Genom att använda reflektionsseismik hade ett större djup och en mer tydlig bergyta kunnat nås. Slutligen konstateras att informationen som söks i undersökningen förändras med behovet av grundläggningstyp för järnvägen, ska den gå i skärning, bank, bro eller tunnel? Geologiska förhållanden styr iterativt projekteringen som i sin tur ger en vägledning av vad som är geotekniskt viktigt att veta. Frågan är då om berggrundens läge senare kommer vara relevant att veta.

6.2 Finns det någon tidsbesparing?

När vi reflekterar över hur implementeringen av syntetisk modellering påverkade vår uppfattning av hur lång tid det tog att genomföra geofysiska undersökningar, så verkar det vara beroende på projekts storlek och framtida förväntade undersökningar. Installationen och upplärningen av de program som examensarbetet omfattade var generell sätt väldigt tidskrävande. En vilja att komma vidare och bara mäta utifrån tidigare erfarenheter och den insamlade datan från förstudien fanns. En känsla av att en tillräckligt god uppfattning, speciellt vid Ladugårdsmarken, redan var erhållen, gjorde det svårt att motivera den tid som gick åt att skapa de syntetiska modellerna. Däremot när alla koder och metodik var på plats så var arbetsmängden och tiden betydligt mer hanterbar.

Det som tar mest tid i ett senare skede skulle vara konstruerandet av en ny sektionens geometri och undersökning av potentiella materialparametrar. Enkäten antydde att användningen av geologiska modeller var bred och en tillräckligt god uppfattning av litologin och dess geometri är i många fall redan skapad. Så att föra in den i ett modelleringsprogram borde inte vara en så stor bedrift. Materialparametrarnas uppskattningstid beror såklart helt på hur ambitiös den syntetiska modellen ska vara. Om litologins karaktär redan är någorlunda känd så kan en erfaren geofysiker göra en god uppskattning i tidigt skede.

För att kunna dra några konkreta antaganden om huruvida den syntetiska implementationen har resulterat i någon tidsbesparing krävs dock:

1. En mer detaljerad bild av hur lång tid dagens geofysiska undersökningar brukar ta;
2. En förståelse i hur ofta undersökningar måste upprepas (främst på grund av feluppskattade sensoravstånd);
3. En jämförelse av våra undersökningar med branschstandard, särskilt hur tidsbesparingar och resursåtgång varierar med projektets storlek och antal undersökningar.; och
4. En kunskap i hur ett mer systematiskt och optimerat tillvägagångssätt för framtagning av syntetiska modeller med erfarna geofysiker påverkar framtagningstiden.

Utifrån de erfarenheter rapportskrivarna initialt hade inom geofysik var uppbyggnaden av en konceptuell modell väldigt viktig för att få en förståelse av området. Modellen spelade stor roll när det kom till att bestämma vart mätningarna skulle vara, för att besvara flest frågetecken kring geologin. Utan modellen hade alltför många ovisheter funnits och definitivt, med mindre erfarenhet, orsakat mindre precision i senare mätresultat som antingen hade orsakat brist på data eller ökad mängd mätningar. Genom att bygga vidare på den konceptuella modellen och simulera olika typer av uppsättningar kunde många sensoravstånd uteslutas. Eftersom erfarenheten av geofysik var låg, upplevde rapportskrivarna att den syntetiska modelleringen gav värdefull information om vad som kan och inte kan synas, speciellt bra representation gav modellering av djup till relevanta lager. Utan en syntetisk modellering hade troligtvis fler misstag begåtts eftersom gestaltningen av geofysiska mätdata är svår att föreställa sig i komplicerade markförhållanden som vid Viderup. Detta är möjligtvis en sak som blir enklare och mer givet efter arbetserfarenhet men bedöms vara högst hjälpsamt som oerfaren.

För att kunna skapa sig en uppfattning om hur lång tid skapandet av en syntetisk modell tar och där med senare budgetbelastningen, utfördes en tidsloggning av samtligt arbete där resultatet visade sig ge en positiv bild av fortsatt användande av modelleringen. Med erfarenhet från första skapandet kan upp till 78% i tidsbesparing möjliggöras vid senare modellering. Detta visar på att uppstartstiden och lärandet av programfunktioner är initeiellt stor, men kommer förkortas snabbt redan till nästa modell och gör analyser relativt snabba och projektmässigt små.

Den kombinerade mätningen visade god potential, och med bra planering och framförhållning så finns det antagligen goda möjligheter att spara tid. I undersökningen sparades minst 30% i tid per sensor vilket är en stor effektivisering. Viktigt att poängtera är att endast en kombinerad mätning gjordes där få fel skedde. Detta kan skilja sig från framtida jämförelser och är värt att undersöka vidare för att få starkare slutsatser.

Slutligen bedöms tiden att utföra en syntetisk modellering vara stor första gången som den skapas, men anses förkortas så pass mycket att den extra säkerhet kring hur fältmätningarna bör utformas väger upp för tidstillägget. Med hjälp av en syntetisk modellering kan dessutom slutsatser, om två metoder kan styrka varandra på samma plats, göras för att sen utnyttja en stor tidsbesparing via en kombinerad mätning

av resistivitet och seismik. Genom att vidare utreda möjligheterna med syntetisk modellering i större skala, kan en mer generell bild skapas om hur markundersökningar kan effektiviseras.

6.3 Rekommendation för uppföljningsstudier

För att få en mer omfattande bild av hur syntetisk modellering kan påverka planering och utförande av geofysiska undersökningar rekommenderas att:

- Undersöka hur användningen av andra geofysiska simuleringsprogram jämför sig med resultatet från pyGimli;
- Få en djupare förståelse i branschens relation till geofysikplanering och utförande i form av intervjuer, med särskilt fokus till mängden felmätningar till följd av begränsad förstudie; och
- Bedöma hur planeringen och utförandet av undersökningarna vid Ladugårdsmarken och Viderup ställs i relation till andra projekt.

När det gäller att få en bättre bild av geologin för undersökningsområdena vid Ladugårdsmarken och Viderup krävs följande:

Viderup

- Skruvprovtagning för att identifiera de horisontella lager som går att urskilja ur mätresultaten.
- Grundvattenrör för loggning av årsvariation.
- JB sondering vid två punkter längs linjen för att fastställa djup till berg vid eventuell pågrundläggning.

Ladugårdsmarken

- Tilläggs mätning av den tillsynes linjedragna anomalins riktning och utbredning med hjälp av en slingram. Vidare gräva en provgrop för att identifiera föremålet då det förväntas ligga ytligt.
- Grundvattenrör för loggning av nivå då den är osäker inom området.
- JB sondering vid två punkter för att knyta samman bergnivåns förändring.
- Ytterligare mätningar med magnetometri för att bedöma vart diabasgången kan vara, samt utesluta om den kraftiga avvikelser i datan är upprepningsbar.

7 Slutatsats

Användningen av syntetiska modeller visar en god potential till att, med en utförlig förstudie, kunna ge en initial uppfattning över hur undersökningarna kommer representeras. Detta kan ge en projektör underlag till vilken uppställning som är mest lämplig för att avbilda relevanta geologiska strukturer. Erfarenhetsmässigt minskar tidsåtgången för att skapa en modell med 78% från första till efterkommande sektioner. Ytterligare forskning krävs för att kunna dra starkare slutsatser om eller när det är lämpligt att använda en syntetisk modell samt att utreda hur väl våra resultat representerar andra infrastrukturprojekt.

Vid utförandet av fältmätningar visar en kombinerad resistivitets- och seismiskmätning, på 160 m med 2 m sensoravstånd, en stor potential för att spara tid. Enligt vår tidtagning sparar vi 30 % på att utföra dessa mätningar ihop istället för enskilt vilket bekräftar ett tillvägagångssätt för att optimera geofysik. Viktigt att ha i åtanke är att detta endast gäller i vårt fall vid Viderup som jämförelse och under speciella förutsättningar som kan skilja sig från utförandegrupp och uppsättningsstorlek.

De konceptuella modellerna visade på goda likheter i grova drag av undersökningsområdenas utformning utifrån de erhållna mätresultaten. Men innan några slutsatser kring hur geologin ser ut vid Ladugårdsmarken och Viderup kan tas, kommer åtminstone kompletterande borrhningar att behöva utföras. Den erhållna utvärderade datan kommer dock att vara väldigt användbar för planering och tolkning av potentiella framtida undersökningar.

Från enkäten kan slutsatsen dras att majoriteten av de som deltog ville se mer användning av geofysik i branschen idag och syftar på att brister i pålitlighet och behovet för mer än en mätmetod påverkar valet. Potentialen med geofysik motiveras främst som en övergripande metod som initialt ska kunna täcka större ytor och ge ett bra underlag i projekteringen inför geotekniska provtagningar och på så sätt kunna knyta samman dessa utan grövre interpolering. De metoder som ansågs vara mest användbara och kända var georadar, resistivitetsprofilering och refraktionsseismik.

8 Uppmärksammande

Vi har fått hjälp från ett flertal personer genom examensarbetets gång. Utan dessa personer hade inte projektet kunnat framställas till den grad som uppnåtts. Så vi vill tacka Alfredo Mendoza, Joakim Robygd, Yaman Abu Jaish, Peter Johnson, Knut Torstenius och samtliga enkätresponderanter!

Tack så mycket för ert ovärderliga stöd och bidrag till vårt examensarbete. Er insats har varit avgörande för att vi kunde genomföra våra studier på ett framgångsrikt sätt. Vi är djupt tacksamma för er generositet och engagemang. Ert stöd har inte bara bidragit till vår akademiska utveckling utan har också berikat vår erfarenhet och gjort denna resa minnesvärd.

Tack!

Litteratur

- Ahokangas, E., G. Maries, J. Mäkinen, A. Pasanen, A. Malehmir, S. Heinonen och M. Pajunen (2021). ‘Geophysical characterization of late-Quaternary glaciofluvial complex and glacial stratigraphy in the Satakunta sandstone area, Köyliö, southwest Finland.’ I: *Quaternary Research* 100, s. 135–153.
- Alm, P.G., P. Jonsson och L. Bjelm (2007). ‘Förundersökningsmetodernas värde och nytta ur prognos synpunkt vid tunnelbyggande.’ I: *Stiftelsen bergteknisk forskning* 121, s. 37–67.
- Bagger, L.C., R. Wisén, M. Jørgensen och M. Jensen (2016). ‘Refraction seismic for mapping of limestone surface in a tunnel project in Copenhagen.’ I: *NGM 2016 Reykjavik*.
- Breiner, S. (1999). ‘Applications manual for portable magnetometers.’ I.
- British Standards Institute, BSI (2015). ‘Code of Practice for Ground Investigations.’ I: BS 5930:2015.
- CFLHD, Central Federal Lands Highway Division (2003). ‘Application of geophysical methods to highway related problems.’ I: *GEOPHYSICS*, s. 253.
- Donohue, S., K. Gavin och A. Tolooiyan (2010). ‘Exploring the regolith with electrical resistivity tomography in large-scale surveys: electrode spacing-related issues and possibility, Hydrol.’ I: *School of Architecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin (UCD)*.
- EU (2004). ‘Eurocode 7: Geotechnical Design, Part 1: General Rules.CEN, Brussels.’ I: EN 1997-1:2004.
- (2011). *Transport 2050: Commission outlines ambitious plan to increase mobility and reduce emissions*. URL: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\11\372/>. (accessed: 25.01.2024).
- Fookes, P.G. (1997). ‘Geology for Engineers: the Geological Model, Prediction and Performance.’ I: *Quarterly Journal of Engineering Geology* 30.4, s. 293–424.
- From, I., B. Wiechel och H. Pettersson (2023). *Ett starkt öst-västligt nordiskt transport-system*. URL: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/motion/ett-starkt-ost-vastligt-nordiskt-transportsystem/_hb021866/. (accessed: 18.04.2024).
- Gourdol, L., R. Clément, J. Juilleret, L. Pfister och C. Hissler (2021). ‘Geophysical and geotechnical assessment of a railway embankment failure.’ I: *Earth Syst. Sci.* 25, 1785–1812.

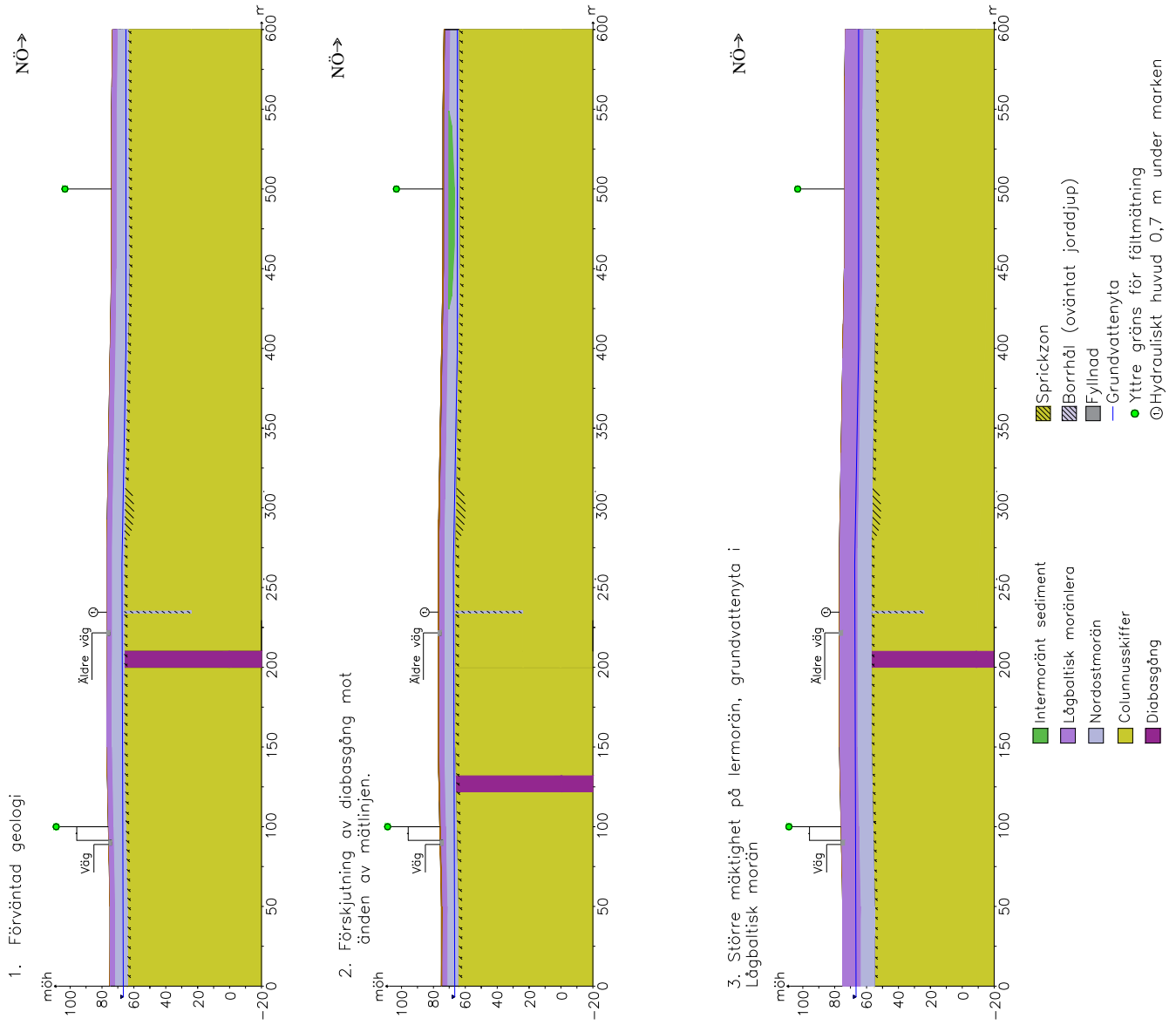
- Guideline Geo (2022). *What is apparent resistivity?* URL: <https://www.guidelinegeo.com/help-articles/what-is-apparent-resistivity/>. (accessed: 14.06.2024).
- Haeni, F.P. (1988). ‘Application of seismic-refraction techniques to hydrologic studies.’ I.
- Ising, J., U. Bergström, M. Erlström, S. Grigull, K. Malmberg Persson, L. Wickström, L. Lundqvist och M. Engdahl (2019). ‘Hässleholm–Lund – uppgraderad geologisk information inför projektering av höghastighetsjärnväg.’ I: SGU-rapport 2019:03.
- Jeppsson, H. och T. Dahlin (2013). ‘Geoelektriska Metoder inom tillämpad geofysik, Resistivitetsmätning, IP-mätning, SP-mätning.’ I: *Geologiska institutionen vid Lunds Universitet GEOC04*, s. 69.
- Krisinformation (2024). *Sverige i NATO*. URL: <https://www.krisinformation.se/detta-kan-handa/hojd-beredskap-och-krig/sverige-i-nato>. (accessed: 18.04.2024).
- Lantmäteriet (2024). *Min karta*. URL: <https://minkarta.lantmateriet.se/>. (accessed: 19.01.2024).
- Ledningskollen.se (2024). *Mitt ärende*. URL: <https://www.ledningskollen.se>. (accessed: 15.03.2024).
- Leveen, F. och M. Palm (2000). ‘Utvärdering av kombinerad resistivitets- och CPT-sond.’ I: *Teknisk Geologi LTH*.
- Lundberg, Jacob (2022). *Höghastighetstågen skulle göra Sverige 280 miljarder fattigare*. URL: <https://timbro.se/smedjan/hoghastighetstagen-skulle-gora-sverige-280-miljarder-fattigare/>. (accessed: 25.01.2024).
- Moura, R. och H.C. Ribeiro (2009). ‘Relationship of shallow seismic refraction results versus lithology in a railway project plan (Northwest Portugal).’ I: *Department of Geology - Faculty of Sciences of Porto University, Portugal*. SGEM09/1598.
- Norbury, N. (2020). ‘Ground models; a brief overview. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.’ I: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 54.2, s. 127–138.
- Nwachukwu, M.A., L.I. Nwosu, P.A. Uzoije och C.A. Nwoko (2017). ‘1D resistivity inversion technique in the mapping of igneous intrusives; A step to sustainable quarry development.’ I: *Journal of Sustainable Mining* 16.4, s. 127–138.
- Persson, L. och M. Göransson (2010). *Beskrivning till bergkvalitetskartan, Romeleåsen*. ISBN: 978-91-7403-038-9, ISSN: 1652-8336. SGveriges geologiska undersökning.
- pyGimli (2024a). *2D ERT modelling and inversion*. URL: https://www.pygimli.org/_examples/_auto/3_ert/plot_01_ert_2d_mod_inv.html#sphx-glr-examples-auto-3-ert-plot-01-ert-2d-mod-inv-py/. (accessed: 05.02.2024).

- pyGimli (2024b). *2D Refraction modelling and inversion*. URL: https://www.pygimli.org/_examples_auto/2_seismics/plot_01_refraction_manager.html#\sphx-glr-examples-auto-2-seismics-plot-01-refraction-manager-py/. (accessed: 05.02.2024).
- Regeringen (2023). *Avtal om försvarssamarbete med Amerikas förenta stater*. URL: <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/departementsserien-och-promemorior/2024/01/ds-20242/>. (accessed: 17.04.2024).
- Riksrevisionen (2021). *Kostnadskontroll i infrastrukturinvesteringar*. URL: https://www.riksrevisionen.se/download/18.4b1a2d7517a4499a2677032b/1624875028494/RiR%202021_22%20Anpassad.pdf. (accessed: 25.03.2024).
- Robygd, J. (2024). *Rational and efficient ground investigations for industrialised construction of new railways*. (accessed: 18.02.2024).
- RSK-Geophysical (u.å.). ‘A reference for geophysical techniques and applications.’ I: *RSK group PLC*.
- Rücker, C., T. Günther, F. Wagner, F. Dinsel, F. Weigand och A. Balza (2024). *About pygimli*. URL: <https://www.pygimli.org/about.html/>. (accessed: 18.04.2024).
- Rücker C. & Günther, T. (2018). *pybert.importer package*. URL: http://resistivity.net/bert/_api/pybert.importer.html/. (accessed: 18.04.2024).
- SGU (2007). *Seismisk mätning och resistivitetmätning i området omkring Hågghults diabasbrott vid Lönsboda*. URL: <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport200733rapport/s0733-rapport.pdf/>. (accessed: 01.02.2024).
- (2020). *Isälvsediment - spår av isälvarna*. URL: <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/isen-smalter/isalvsediment-spar-av-isalvarna/>. (accessed: 25.01.2024).
- (2024). *Geologi i 3D*. URL: <https://apps.sgu.se/sgu3d/>. (accessed: 30.01.2024).
- (u.å.). *SGUs Kartvisare*. URL: <https://apps.sgu.se/kartvisare/>. (accessed: 30.01.2024).
- SLU (2020). *Jorddjup*. URL: <https://www.slu.se/institutioner/mark-miljo/miljoanalys/markinfo/markprofil/jorddjup/>. (accessed: 17.01.2024).
- Steelman, C., E. Arnaud, P. Pehme och B. Parker (2017). *Geophysical, geological and hydrogeological characterization of a tributary buried bedrock valley in southern Ontario*. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 55. 10.1139/cjes-2016-0120. Bygghälsningsrådet.
- Svenska Geotekniska Föreningen (2013). *Fälthandbok: Undersökningar av förorenade områden*. SGF Rapport 2:2013.
- Trafikverket (2017). ‘Samhällsekonomisk analys av järnvägsinvesteringar – förklarat på ett enklare sätt .’ I.

- Trafikverket (2021). 'Förslag till nationell plan för infrastrukturen 2022-2033 –Planen i korthet'. I: 2021:242.
- (2024). *Om järnvägens dåtid, nutid och framtid*. URL: <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/jarnvag/jarnkoll--fakta-om-svensk-jarnvag/om-jarnvagens-datid-nutid-och-framtid/>. (accessed: 17.04.2024).
- (u.å.). 'Järnvägsutredning Sundsvall-Härnösand, teknisk utformning.' I.
- Triumpf, C.A. (1992). *Geofysik för geotekniker: Metoder och tillämpningar*. 1992:31. Byggeforskningsrådet.
- UN (2023). *The 17 Goals*. URL: <https://sdgs.un.org/goals/>. (accessed: 25.01.2024).
- Vattenatlas (2024). *Karta 1810-tal*. URL: <https://vattenatlas.se/>. (accessed: 25.01.2024).
- Wilke, M.B, K. Bauer, N.H. Schovsbo och M. Stiller (2012). 'P-wave traveltime tomography for a seismic characterization of black shales at shallow depth on Bornholm, Denmark.' I: *GEOPHYSICS* 77.5.
- Williams, E., I. Ahenkorah, E. Baffoe, T.F. Awotoye, G.L. Ephraim och D.C. Asebiah (2018). 'Application of Geoelectric Resistivity to Determine Soil Moisture.' I: *American Journal of Engineering Research (AJER)*.

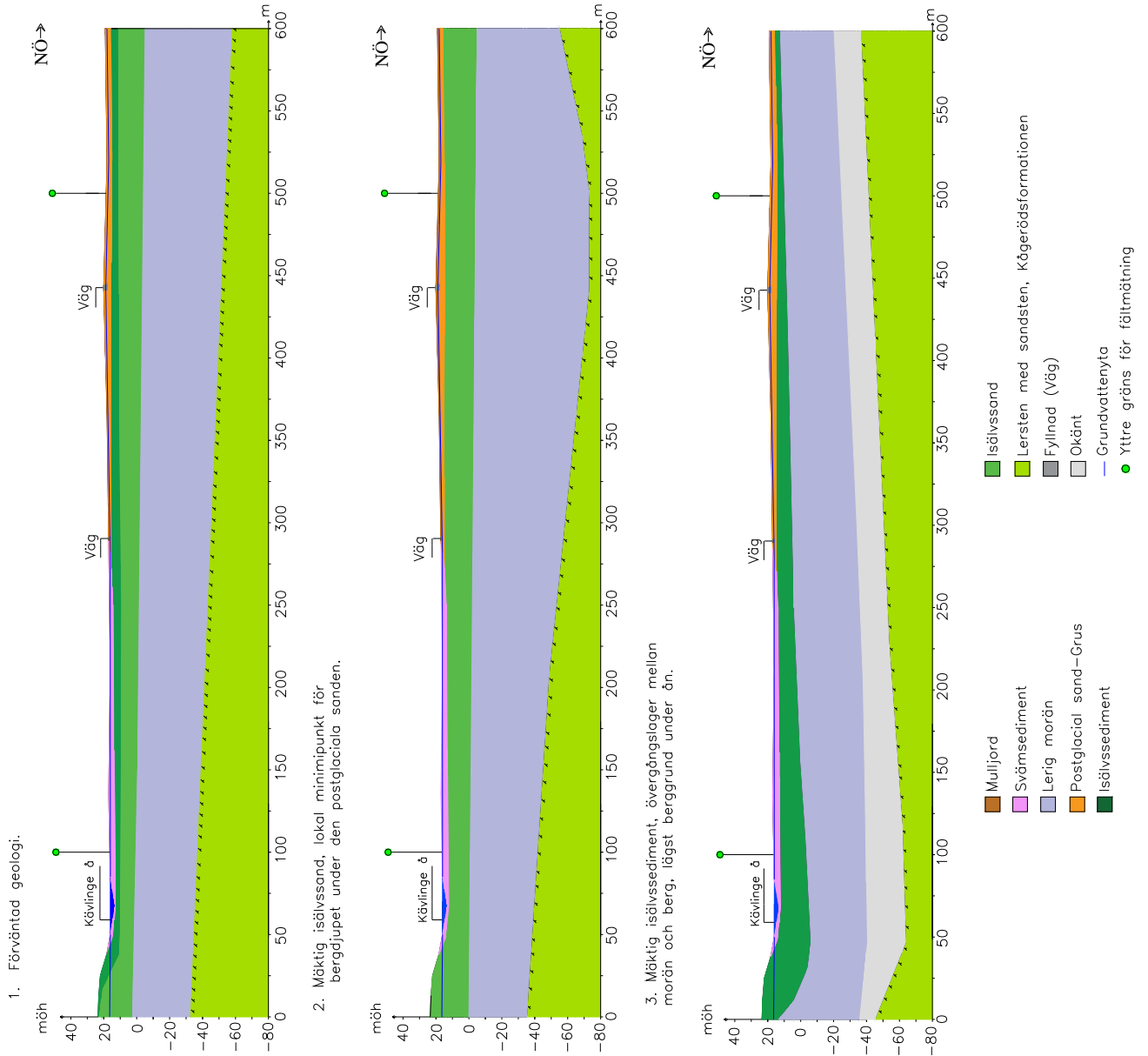
Bilaga A

Sektion 1-3: Ladugårdsmarken



Bilaga B

Sektion 1-3: Viderup



Bilaga C

Enkätens utformning

Nedan presenteras enkäten *Geofysik i projektering* i pappersformat.

Hej!

Vi är två studenter, Oskar Löfsved och Isak Johansson, från Lunds Tekniska Högskola. Vi vänder oss till företag som använder eller planerar geofysiska mätmetoder i infrastrukturprojektering. Vi har utformat denna enkät för att få en djupare förståelse för hur geofysik tillämpas i förundersökningar inom anläggningsbranschen. Syftet är att kunna bidra till viktiga jämförelser i vårt pågående examensarbete, där vi fokuserar på att optimera geofysiska mätmetoder för byggandet av infrastruktur i Sverige.

Din medverkan är av stor betydelse för oss, och enkäten är utformad för att vara anonym. Vi ber dig vänligen att avsätta cirka 10 minuter av din tid för att gå igenom och besvara våra frågor. Ditt bidrag kommer att vara ovärderligt för att berika vår forskning och förståelse inom detta område.

Tack så mycket för din medverkan och din tid. Vi uppskattar det mycket!

Vänliga hälsningar, Oskar Löfsved och Isak Johansson.

Vid eventuella kommentarer eller frågor kan vi nås på följande mail:

oskar.lofsved@gmail.com

is7465jo-s@student.lu.se

Hur skulle du bäst beskriva din nuvarande yrkesroll?

- Myndighet (tillståndsgivare, kontrollant)
- Beställare
- Konsult
- Forskare
- Entreprenör/byggare
- Annat

Kommentar

Hur stor del av din totala arbetstid i ditt nuvarande yrke har du i genomsnitt lagt på arbeten relaterade till infrastrukturprojekt?

- 0-10%
- 10-50%
- 50-75%
- 75-99%
- 100%

Vilka roller har du tidigare arbetat i längre än ett år? Du kan markera flera alternativ.

- Myndighet (tillståndsgivare, kontrollant)
- Beställare
- Konsult
- Forskare
- Entreprenör/byggare
- Har ej arbetat i andra roller än min nuvarande
- Annat

Kommentar

Hur lång yrkeserfarenhet har du totalt i branschen?

- Mindre än 5 år
- 5-10 år
- 10-15 år
- 15-20 år
- Mer än 20 år

Vilka av följande förundersökningsmetoder känner du till (praktiskt eller teoretiskt)? 0 - Har ej arbetat med detta/har ingen åsikt 1 - Har litet eller inget värde 2 - Har visst värde 3 - Kan ha avgörande betydelse

	0	1	2	3
Refraktionsseismik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflektionsseismik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ytvågsseismik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektromagnetisk resistivitetskartering	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Resistivitetsprofilering	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inducerad polaritet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magnetometri	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Georadar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gravimetri	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Användning av geofysik i infrastrukturprojekt

Här vill vi veta omfattningen av hur geofysiska metoder används i förundersökningar inför infrastrukturprojekt.

Brukar/har du använt dig av geofysiska undersökningar i infrastrukturprojekt?

- Ja, ett fåtal gånger.
- Ja, regelbundet.
- Ja, alltid.
- Nej.

Om nej, varför inte?

I vilket syfte används oftast följande metoder?

Resistivitet

Inducerad polaritet

Magnetometri

Refraktionsseismik

Hur användbara anser du följande förundersökningsmetoder vara? 0 - Har ej arbetat med detta/har ingen åsikt 1 - Har litet eller inget värde 2 - Har visst värde 3 - Kan ha avgörande betydelse

	0	1	2	3
Refraktionsseismik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflektionsseismik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ytvågsseismik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektromagnetisk resistivitetskartering	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Resistivitetsprofilering	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inducerad polaritet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magnetometri	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Georadar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gravimetri	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Hur stor del av den totala projekttiden ägnar ni er vanligtvis åt geofysiska undersökningar under markundersökningsfasen? Detta inkluderar planering, genomförande, tolkning och

- 0%
- 1-10%
- 10-20%
- 20-30%
- 30-40%
- 40-50%
- 50-60%
- 60-70%
- 70-80%
- 80-90%
- 90-100%

Hur stor del av projektbudgeten går åt geofysiska mätningar under markundersökningsfasen?

- Mindre än 5%
- 5-10%
- 10-20%
- 20-40%
- Mer än 40%

Förstudier

För att förbereda geofysiska/geotekniska mätningar kan man skapa en grundläggande markmodell i ett tidigt skede för att erhålla en översiktlig förståelse av markförhållandena. Detta kan sedan användas som en vägledning inför fältundersökningar för att etablera en solid utgångspunkt.

Används vanligtvis någon form av geologisk/hydrogeologisk konceptuell modell i förarbetet för ett infrastrukturprojekt?

- Ja
- Nej
- Ibland

Om markmodeller används i förarbetet (också kallad förväntningsmodell eller geologisk prognos), vilken typ används oftast?

- 3D modell
 2D modell (tvärsnitt)
 Beskrivning/Rapport

Annat

Simuleringar

Genom att skapa en digital modell av marken kan geofysiska mätningar simuleras och bearbetas innan de utförs i fält. Detta tillåter att potentiellt olämpliga strategier undviks och att de mest givande mätmetoderna framhävs genom syntetiska modeller.

Använder ni någon form av syntetisk modellering eller simulering baserat på er konceptuella markmodell inför genomförandet av geofysiska mätningar?

- Ja
 Nej (fortsätt till fråga 14)
 Ibland

Om ja, hur ofta används syntetisk modellering inför geofysiska mätningar?

- Enstaka tillfällen
 Regelbundet
 Alltid

Om ja, vilka modelleringsprogram använder ni er av?

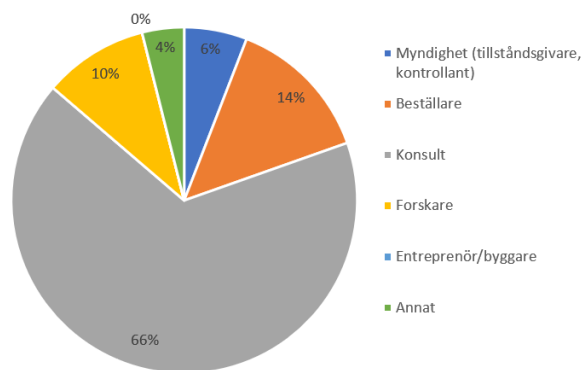
Skriv gärna om det finns något att tillägga kring användningen av geofysik i infrastrukturprojekt.

Bilaga D

Enkätens svar

Svaren från enkäten *Geofysik i projektering* presenteras nedan i form av cirkeldiagram med relaterad frågeställning samt kommentarer och textsvar.

Hur skulle du bäst beskriva din nuvarande yrkesroll?



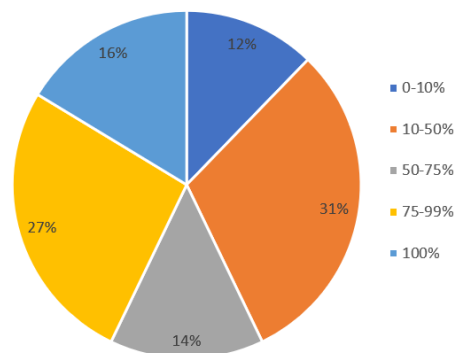
Figur D.1: Nuvarande yrkesroll.

Kommentar:

- Jag arbetar med miljötekniska markundersökningar och utvärderar geotekniska utredningar främst i förbindelse med exploatering eller där vi har en föroreningsituation som behöver utredas eller saneras.
- Konsult inom geofysik, grundvatten och geoteknik + ibland lärare på Göteborgs universitet.
- Geoteknikspecialist på myndighet.
- Jobbar som geofysiker där andra konsultbolag tar in oss för att göra geofysiska undersökningar
- Jag har tidigare jobbat ca 5 år som aktiv geofysiker. Därefter ca 10 år som uppdrags- och anbudsansvarig och då jobbat hårt för att öka användningen av geofysik. Numera har jag rollen som utvecklingsansvarig inom hela området geoteknik, inkl geofysik, på Tyréns.
- Arbetar som geofysiker så kan finnas en viss bias i mina svar:-)
- Vattenkraft.

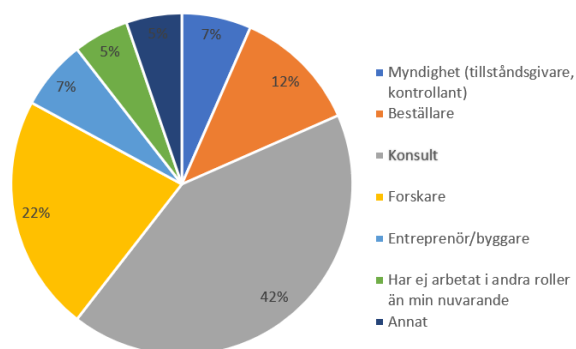
- Emeritus Professor.
- Infrastrukturprojekt är ganska vitt begrepp och det är lite svårt att se vad ni är ute efter.
- Specialist geofysik.
- Seniorkonsult inom dammsäkerhet och vattenkraft.
- Geolog som arbetar som geotekniker sedan 2006.

Hur stor del av din totala arbetstid i ditt nuvarande yrke har du i genomsnitt lagt på arbeten relaterade till infrastrukturprojekt?



Figur D.2: Arbetstid relaterad till infrastrukturprojekt.

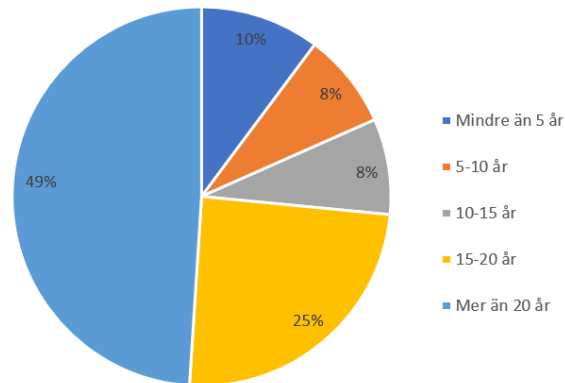
Vilka roller har du tidigare arbetat i längre än ett år? Du kan markera flera alternativ.



Figur D.3: Tidigare roller längre än ett år.

Kommentar: -

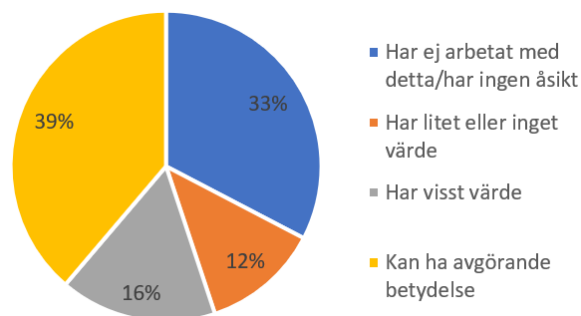
Hur lång yrkeserfarenhet har du totalt i branschen?



Figur D.4: År erfarenhet i branschen.

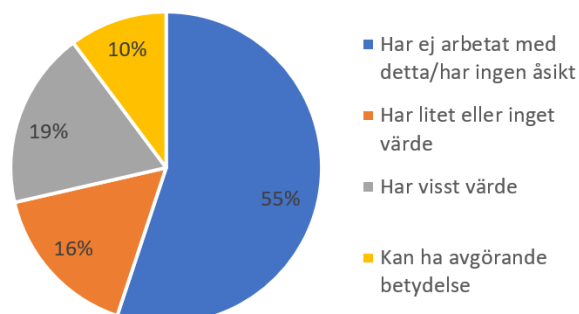
Vilka av följande förundersökningsmetoder känner du till (praktiskt eller teoretiskt)?

Refraktionsseismik



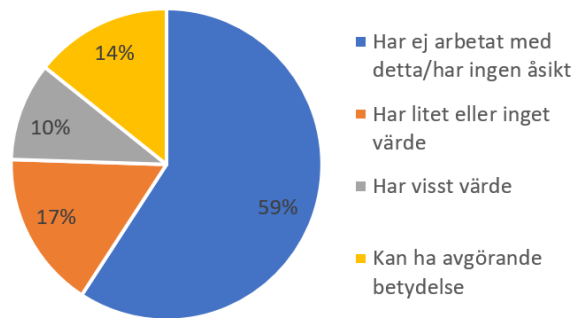
Figur D.5: Praktisk och teoretisk kännedom.

Reflektionsseismik



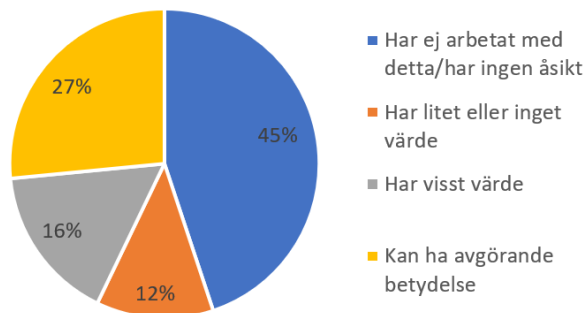
Figur D.6: Praktisk och teoretisk kännedom.

Ytvågsseismik



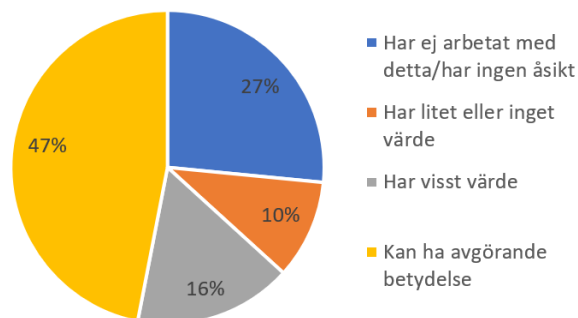
Figur D.7: Praktisk och teoretisk kännedom.

Elektromagnetisk resistivitetskartering



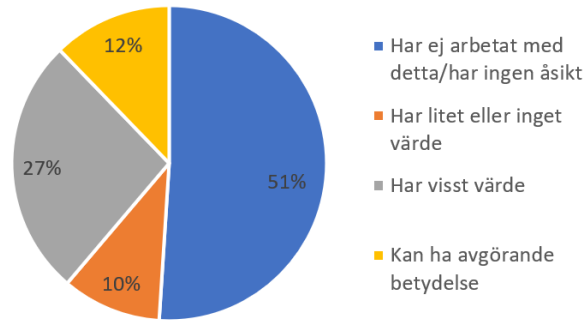
Figur D.8: Praktisk och teoretisk kännedom.

Resistivitetsprofilering



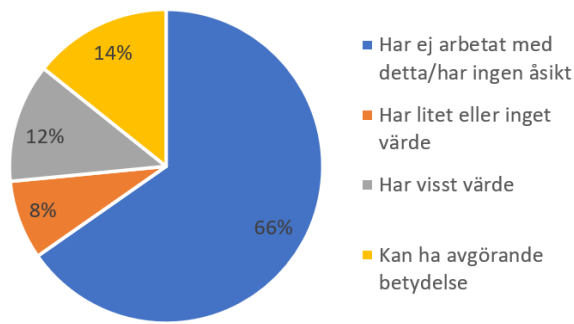
Figur D.9: Praktisk och teoretisk kännedom.

Inducerad polaritet



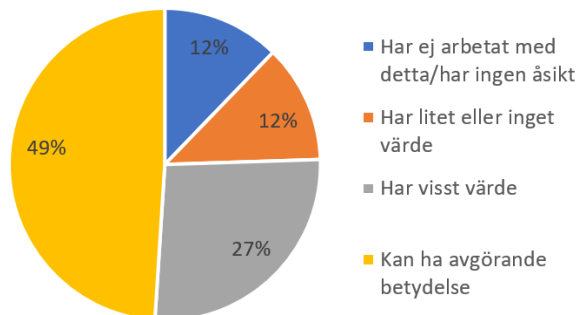
Figur D.10: Praktisk och teoretisk kännedom.

Magnetometri



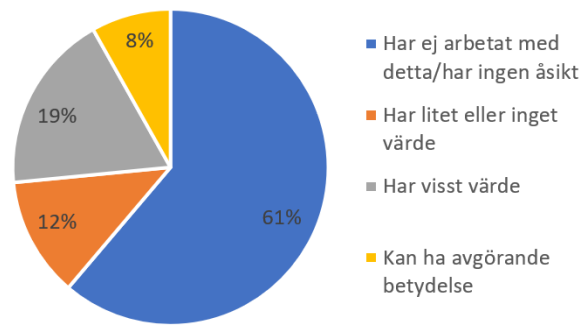
Figur D.11: Praktisk och teoretisk kännedom.

Georadar



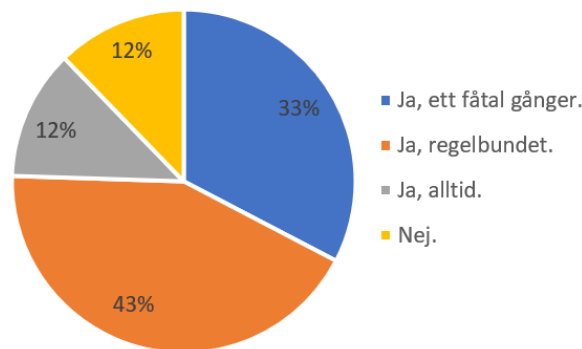
Figur D.12: Praktisk och teoretisk kännedom.

Gravimetri



Figur D.13: Praktisk och teoretisk kännedom.

Brukar/har du använt dig av geofysiska undersökningar i infrastrukturprojekt?



Figur D.14: Användning av geofysik i infrastrukturprojekt.

Om nej, varför inte?

- För större projekt kan det användas. Provgropar ger oftast bäst information, borrhävar är vanligen också bra. Geofysik är (enligt mig) ett sätt att få en överblick om var det är lämpligt att göra provgropar, borrhävar och få en bild av hur förhållandena är mellan dessa.
- Vi föreslår ofta geofysik om vi tror att det kan ge ett mervärde till undersökningen, mer yttäckande.
- Vi använder oss av geotekniska undersökningar, mer sällan av geofysik
- Vi använder geotekniska undersökningar.
- Det enda jag gör är geofysiska undersökningar.
- Har inte varit krav eller sett behov av det.
- Geofysiska metoder är väl tillämpbara i infrastrukturproblem, men jag har inte arbetat mycket med det. Radar och elektriska metoder är det jag mest arbetat med i samband med väg och vatten.

I vilket syfte används oftast följande metoder? Resistivitet

- Bergnivå, vattenförande lager
- Hitta defekter i dammkonstruktioner eller undergrund som kan tyda på inre erosion eller andra problem.
- Definiera läckage i/under dammkonstruktioner.
- Bestämma bergöveryta.
- Lokalisera föroreningar.
- Oftast för berg och bergkvalite. Områden med lera där radar inte funkar.
- Hitta föroreningar.
- Undersöka jordlagerföljder, Berg och torv mm.
- Infrastruktur, geologisk kartering, förorenade områden, grundvattenprospektering.
- Tolkning av anomalier i undergrunden.
- Bedömma läckage genom damm.
- Identifiering av läckage i fyllningsdammar.
- För att upptäcka läckage genom dammkroppen, identifiera problem som läckage runt en tunnel eller lokalisera bergnivån.
- Jorddjup, förekomst av lera, svaghetszoner i berg, grundvattennivå.
- Djup till berg eller icke-konduktiva lager, lermäktighet.
- Mins ej.
- Vatten.
- Grundvatten, brunnslägen.
- Jordlagerföljd/bergläge.
- I tidigt skede hitta ungefärliga jordlagergränser över större sträckor. Alltid kompletterat med traditionella geotekniska undersökningar som referens.
- Jordlagerföljder, djup till berg, vattenförande zoner, läckage.
- Jordlager, vattenförande lager, bergkvalitet.
- Jordlagerföljder.
- Jordlagerföljd, sprick/svaghetszoner i berg. Detektering av föroreningar - i kombination med IP.

- -
- Kartlägga jordlagerföljeder i lerjordar, lokalisera sprickzoner i berggrunden, fastslå bergfritt djup vid ledningsdragning.
- Inom min nuvarande roll så har undersökningar med resistivitetsmätning använts för att detektera eventuella avvikelser i fyllningsdammar.
- Avseende infrastruktur; jorddjup och jordlagerföljd.
- Djup till bergyta under lera, leravlagringar, stratigraphy, grundvatten.
- Kartera jordlagerföljder, djup till berg, bergkvalitet, förekomst av vattenförande lager i dammkonstruktion.
- Vet ej.
- Regional prospektering.
- Vatten, sedimentära strukturer.
- Primärt för jordlagerföljder, vattenförekomst i jord/berg och konduktiva zoner i berg. Också för djup till berg om geologin tillåter det.
- Bergkontroll, ledningssträckor.
- Grundvatten, kvicklera, djup till berg.
- Mapping of soft sediments, top bedrock, aquifers (sand layers).
- Främst sprick-/krosszoner i berg

Inducerad polaritet

- Vattenförande lager/täta lager.
- Tjocklek på lerlager, oftast som komplement till Resistivitet, att man även samlar in IP-data.
- Infrastruktur, geologisk kartering, förorenade områden, grundvattenprospektering.
- Bedömma läckage genom damm.
- För att upptäcka metallföremål eller lokalisera gruvhål genom en gruvanläggning.
- Har inte använt IP inom infrastrukturprojekt.
- Använt en gång för resistivitet i bergsprickor.
- Arbete kring deponier eller vid hydrogeologiska frågeställningar.
- Lätt att samla in när man ändå mäter res och ger kompletterande information, se ovan.
- Tex. kartering av lera, permeabilitet.
- Jordlagerföljder.
- Detektering av föroreningar - i kombination med resistivitet.
- Identifiera lervittrade sprickzoner, kartlägga sulfidförekomster i schaktmassor, kartering av deponier.
- Avseende infrastruktur har jag bara kommit i kontakt med det vid enstaka tillfälle.
- Stratigraphy, grundvatten.
- Prospektering mineral, kartering grundvatten och föroreningar i mark, lerhalt i undergrunden.
- Geotekniska.
- Prospektering mineraliseringar.
- Miljö (deponier), bergrundsgeologi (diabasgångar), mineralprospektering.
- Has not shown great value compared to ERT. Can be beneficial when there's a need to distinguish between clay vs other low resistivity structures.
- Vet ej/har ej använt.

Magnetometri

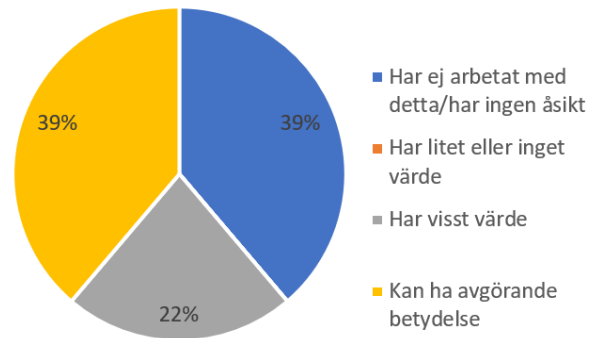
- Inte använt.
- Vatten, sprickor.
- Vet ej.
- Vet ej.
- Förorenade områden.
- Hitta metalliska objekt/malm.
- Vet ej.
- Vet ej.
- Bergartskartering, gångar (diabaser, pegmatiter), deformationszoner i berg.
- Mineralprospektering.
- Vet ej.
- Linjementkartering.
- Leta diabasgångar.
- Prospektering eller berggrundskartering.
- OXA, bergarter, gömda föremål.
- Vattenförande sprickor, geologiska kontakter etc.
- Ej använt.
- Ej stött på metoden i infrastruktursammanhang.
- Avseende infrastruktur; har använts för att kontrollera att infrastruktur inte kommer i konflikt med vissa koncessions mineral.
- UXO, bergartskartering.
- Mineralprospektering, kartering föroreningar i mark, jorddjup, bergarters utbredning, sprickzoner berg.
- Vet ej.
- Mineralprospektering.
- Strukturgeologi, prospektering av mineraliseringar.
- Gångbergarter, UXO, arkeologi.
- We have only used it for UXO mapping and other metal mapping.
- Vet ej/har ej använt.

Refraktionsseismik

- Jorddjup, grundvattennivå, svaghetszoner i berg.
- Djup till berg, bergkvalitet, sprickighet.
- Skjuvmoduler.
- Djup till berggrund.
- Leta sprucket berg.
- Jordlagerföljd/bergläge.
- I tidigt skede hitta ungefärliga bergdjup över större sträckor. Alltid kompletterat med traditionella geotekniska undersökningar som referens.
- Djup till berg, bergkvalitet (svaghetszoner) jordlagerföld.
- Jorddjup, bergkvalitet.
- Bergnivå, bergkvalite.
- Bergnivå (bergkvalité).
- Identifiera bergöveryta i moränjordar.
- Jorddjup och jordlagerföljd. Underordnat bergkvalitet.
- Djup till bergyta, Stratigraphy, svaghetszoner, dynamiska parametrar, grävbarhet.
- Bestämning av jordart, jordlagerföljd, mäktighet jordlager, bergytans läge, bergkvalitet.
- Vet ej.
- Undersöka övergång mellan jord och berg och om möjligt övergångar mellan olika jordlager mellan geotekniska undersökningspunkter.
- Sedimentära strukturer, samt berggrundsstrukturer.
- Djup till berg, bergkvalitet.
- Djup till berg.
- Applicable method for e.g. mapping top bedrock or other geological surfaces that cannot be mapped with electrical or EM methods.
- Främst djup till berg.

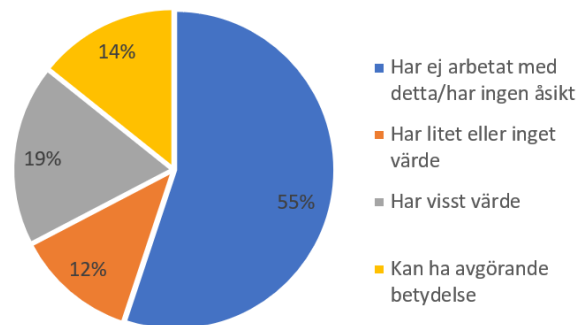
Hur användbara anser du följande förundersökningsmetoder vara?

Refraktionsseismik



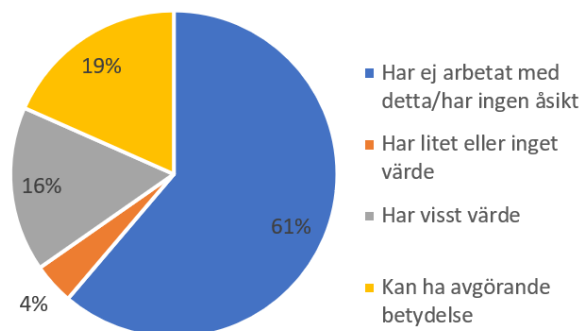
Figur D.15: Refraktionsseismisk användning

Reflektionsseismik



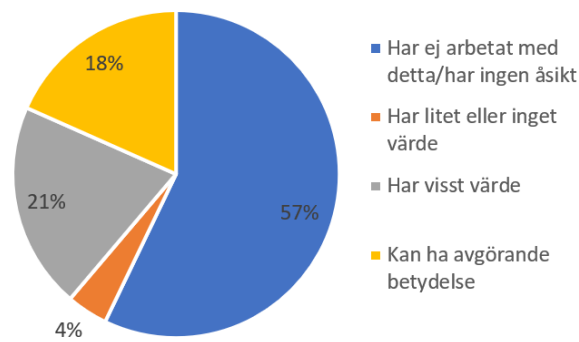
Figur D.16: Refraktionsseismisk användning.

Ytvågsseismik



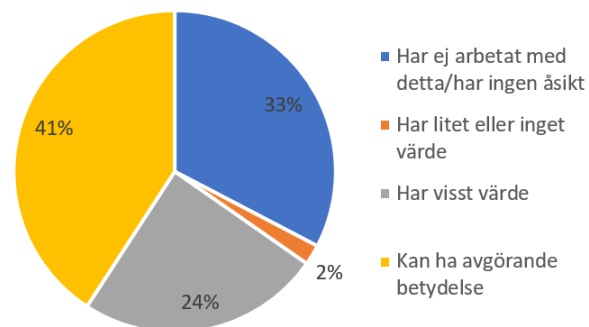
Figur D.17: Ytvågsseismisk användning

Elektromagnetisk resistivitetskartering



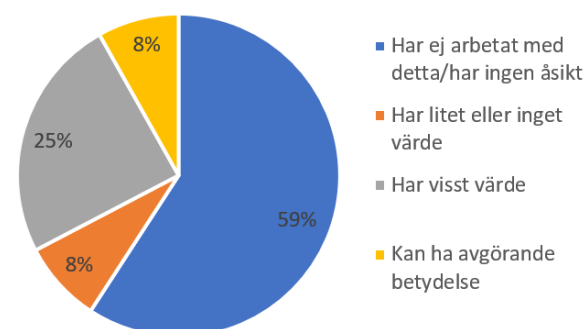
Figur D.18: Elektromagnetisk resistivitetskarterings användning

Resistivetsprofilering



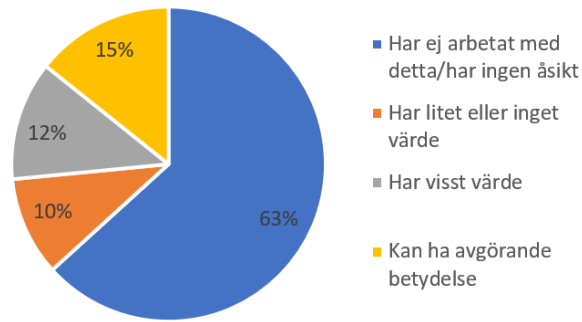
Figur D.19: ERT-användning

Inducerad polaritet



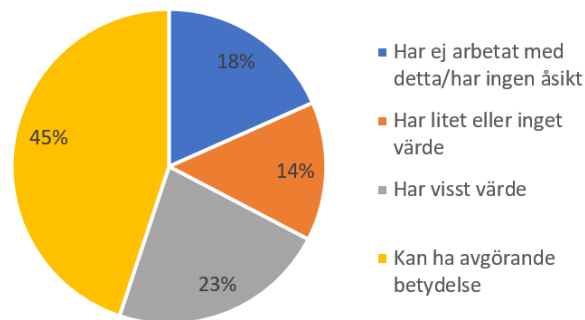
Figur D.20: IP-användning

Magnetometri



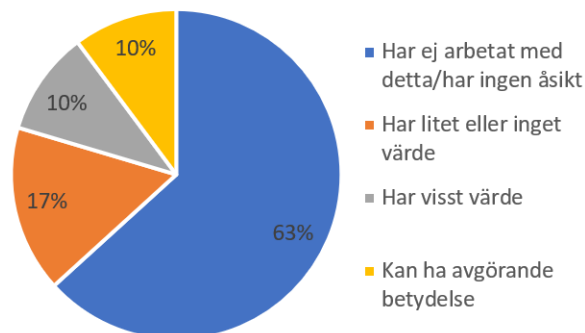
Figur D.21: Magnetometri användning

Georadar



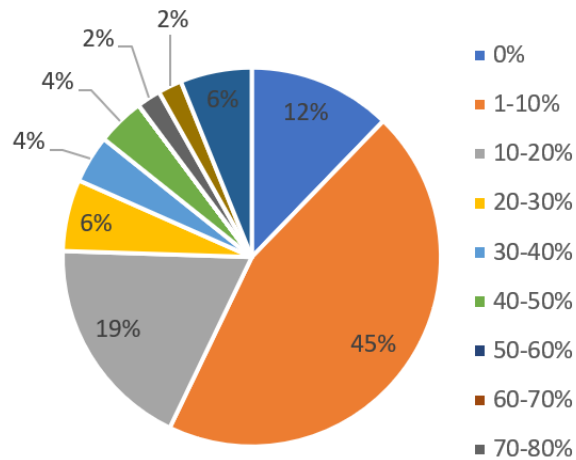
Figur D.22: Georadar användning

Gravimetri



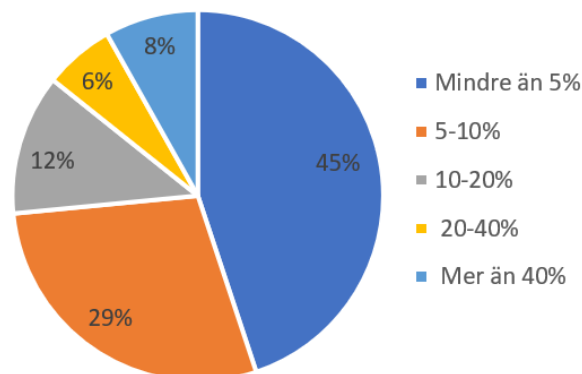
Figur D.23: Gravimetri användning

Hur stor del av den totala projekttiden ägnar ni er vanligtvis åt geofysiska undersökningar under markundersökningsfasen? Detta inkluderar planering, genomförande, tolkning och leverans.



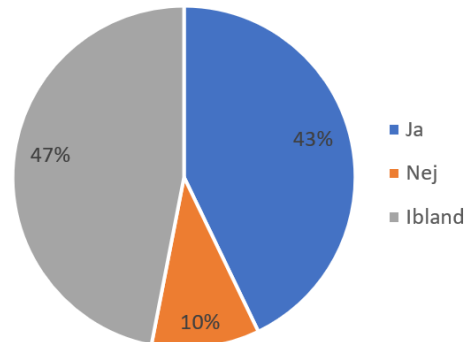
Figur D.24: Andel projektid åt geofysik i förundersökningar.

Hur stor del av projektbudgeten går åt geofysiska mätningar under markundersökningsfasen?



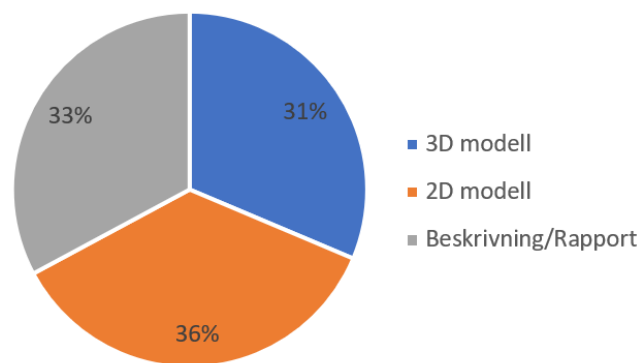
Figur D.25: Andel budget åt geofysik i markundersökningar.

Används vanligtvis någon form av geologisk/hydrogeologisk konceptuell modell i förarbetet för ett infrastrukturprojekt?



Figur D.26: Om modell används

Om markmodeller används i förarbetet (också kallad förväntningsmodell eller geologisk prognos), vilken typ används oftast?

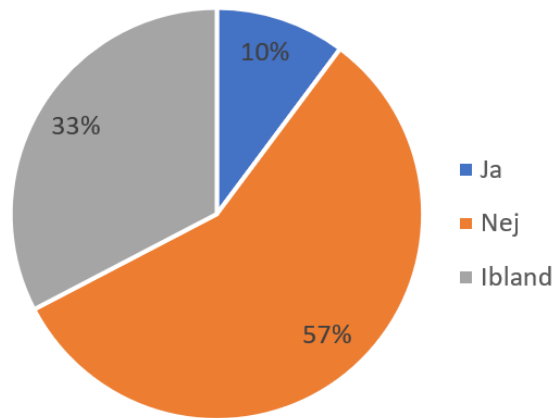


Figur D.27: Typ av modeller

Annat:

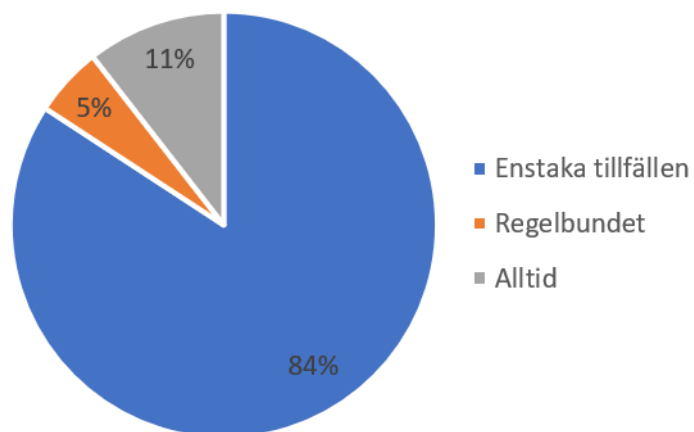
- Vi använder oss av en enkel konceptuell modell i 2D (Geoteknik) som ett underlag vid planering av miljötekniska markundersökningar, endast i större projekt använder vi 3D.
- Varierar stort mellan olika projekt. Angående fråga 13 ovan varierar kostnadsandelen för användning av geofysik från 0 till gissningsvis 25%. Ett infrastrukturprojekt kan ha väldigt olika karaktär och varierande omfattning. Jag rekommenderar nästan att utesluta den frågan och ta muntlig kontakt/intervju istället. Alternativt specificera typ av uppdrag.
- Känner inte till konceptet förväntningsmodell.
- Detta beror lite på vem och projekt. Jag jobbar mycket med 3D-modeller så för mig är det nog betydligt oftare än för andra.

Använder ni någon form av syntetisk modellering eller simulering baserat på er konceptuella markmodell inför genomförandet av geofysiska mätningar?



Figur D.28: Användning av syntetisk modellering.

Om ja, hur ofta används syntetisk modellering inför geofysiska mätningar?



Figur D.29: Hur ofta syntetisk modellering används.

Om ja, vilka modelleringsprogram använder ni er av?

- Rayfract, Res2DInv, ZondRes2D. UBC DCIP3D, ModelVision.
- GeoBIM (om jag har förstått frågan rätt).
- Minns inte, det var inte jag som jobbade med de.
- Mest egen programmering.
- Res2Dmod, GPRsim.net.
- Minns inte vad programmet hette. Forwardmodell inför resistivitetsmätning. Kan ju även räkna för hand.
- Mr3dmod.
- Inte några specifika program, men en grov modell av fysikaliska egenskaper baserade på provtagning och lab-undersökningar eller små fältmätningar.
- Geogiga Modeling, Res2dmod.
- AARHUS Workbench.
- It depends on the method.
- Jag är aldrig inblandad. Vet ej.
- Geostudio/Geoseep
- Civil3D, MicroMine
- Surfer, Sketchup
- Geokalkyl, GeoBIM, FME
- Köps av konsult

Skriv gärna om det finns något att tillägga kring användningen av geofysik i infrastrukturprojekt.

- Det borde användas mer, speciellt i tidiga skeden!
- I förbindelse med detaljplanearbetet i förbindelse med exploatering utför vårt bolag miljötekniska markundersökningar. I tillägg utför andra konsulter geotekniska undersökningar, dessa samkörs ibland med miljöundersökningarna, men vanligtvis inte. De geotekniska undersökningensresultaten används ibland vidare vid planering av sanering, men vanligtvis endast de översiktliga resultaten. Kostnaden för geotekniska utredningar ligger ofta högre än de för miljötekniska utredningarna. Ren geofysik används mer sällan.
- Inget jag kommer på just nu.
- Behövs mer kommunikation mellan universitet och utförare.
- Den begränsande faktorn för användningen av geofysik i infraprojekt tror jag är geoteknikers okunskap om mätmetoderna. Geofysikern/geologen behöver vara pedagogisk och kunna förklara osäkerheter och styrkor på ett bra sätt. Annars kommer man borra på som man gjort i 100 år. :) Lycka till med arbetet.
- Möjligheten att få ut något från geofysiska metoder varierar kraftigt mellan olika geologiska lokaler och vilka geotekniska frågeställningar som är aktuella. Ofta krävs omfattande traditionella geotekniska undersökningar oavsett om geofysik har utförts eller ej, detta för att täcka kunskapsbehov av jordlagrens egenskaper etc. Geofysiska metoder ger oftast mest nytta i inledande faser av projektering och som underlag för kompletterande geotekniska undersökningar. Geofysik ger ofta ett grovt resultat med för låg detaljeringsnivå för byggskede.
- Svårt att bedömma vissa frågor, t.ex. om omfattning. Det beror ju helt på typen av projekt. Geofysiken är oftast en relativt liten kompletterande del i stora multidisciplinära infrastrukturprojekt. Men geofysik kan även vara hela delen av ett projekt. Det beror helt på frågeställning och typ av projekt.
- Bör användas mer.
- 1. Alldeles för lite använt. 2. Flera skäl till det, bla okunskap och rädsla hos beställaren Trafikverket, och till lika stor del hos uppdragsledare hos de konsulter som driver de stora infrauppdragen. De geokunniga är för långt från uppdragsledningen och har därför ofta svårt att påverka införsäljning av geofysik. Uppdragsledarna är ofta rena projektledare eller väg- eller järnvägsprojektörer utan/med begränsad geokunskap. Det finns alltid en Teknikansvarig (TA) Geoteknik i de stora infrauppdragen. Dessa är dock inte med på alla möten med TRV. 3) Svårigheter att få in geofysiska resultat (plottar i 2D/3D) i CAD-programmen där 80% av allt projekteringsarbete utförs. Synd inte geofysiken där får den väldigt liten påverkan där den ligger i en enstaka liten rapport någonstans. Orsaken är olika dataformat. Just nu pågår dock ett projekt i branschen där en Plug-In till

AutoCAD byggs som ska göra de olika formaten mer kompatibla. Vi hoppas på en game changer.

- Jag som geotekniker har oftast använt mig av markradarundersökningar som ett komplement till geotekniska undersökningar, dvs för att fylla ut rummen mellan de geotekniska undersökningspunkterna. Har haft både bra och sämre erfarenheter av hur användbart det har varit, varierar oftast från projekt till projekt.
- Hej. Fråga 5 är konstigt formulerad. Huruvida jag väl känner till en metod säger inget om dess användbarhet. Jag har svarat utifrån användbarheten, men allt beror på". Givetvis är reflektionsseismik avgörande om man ska dra infrastruktur i hav (rör, kablar, tunnel) men inte betydelsefullt för en bergskärning. Svaren alltså snarlika fråga 11.
- Geofysik i infrastrukturprojekt har sitt största värde i tidiga skeden.
- Era frågor ställs som om de var riktade till en konsult/entreprenör, vilket gör att det ibland är svårt att ge svar som ni kan ha glädje av.
- Viktigt att använda rätt metoder för det specifika syftet och förutsättningarna. Viktigt att samverka med andra delar i projektet fungerar: Planering, rätt metod vid rätt tid i projektet, integrerad undersökning och integrerad tolkning.
- It can create great value when interpreted together with geological and geotechnical data.
- Geofysiska undersökningsmetoder ger oftast alltför osäkra resultat för att de ska vara användbara. I sällsynta fall kan de hjälpa till att peka ut områden som är intressanta att undersöka närmre (med mer detaljerade undersökningsmetoder).
- Oftast arbetar jag med mindre anläggningar. Geofysiska metoder kommer då vanligen inte in beroende på att det inte anses ge så stort värde i förhållande till insatsen av resurser (pengar och tid). Hoppas ni får in bättre svar! Lycka till!
- Markradar är väldigt användbart för att kartera torvområden men inte lika bra för att tolka fram djup till berg.
- Har vid upprepade tillfällen upplevt stor differens i resultat från refraktionsseismik jämfört med sondering/ provgropsundersökning. Ser det ändå som användbart men viktigt med kalibreringspunkter.
- Bör oftast användas. Särkilt i tidigt skede för att optimera undersökningsprogram och minska risken för överraskningar.
- Vi använder ofta kombinationer av geofysiska metoder och andra grundundersökningar, tex resistivitet, seismik och j-b sondering. En enskild geofysisk metod är sällan bra på egen hand, men kan vara väldigt värdefull i tillsammans med andra metoder.
- Svårt dra gräns mellan fråga 5 och 11.

Bilaga E

pyGIMLi-koder

ERT

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
"""
```

```
Created on Fri May 10 17:28:08 2024
```

```
@author: Isak Johansson & pyGimli
```

```
Edit of 2D ERT modelling and inversion
```

```
"""
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pygimli as pg
import pygimli.meshtools as mt
from pygimli.physics import ert
from pybert import exportData
#%% Samtliga sektioner är sammanställda nedan. Kör önskad sektion cell för att
#skapa geometrin
```

```
#Viderup sektion 1
```

```
#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
```

```
layer1 = mt.createPolygon([[0.0, 23.5],[13, 23], [25, 22], [38, 18.2],
                           [43.4, 16], [27.3, 16.2], [17, 21.1]],
                           isClosed=True, marker=1, markerPosition=[30, 18])
```

```
layer2=mt.createPolygon([[27.3, 16.2], [43.4, 16], [47.7, 14.3], [67.3, 12.2],
                          [162, 13.2], [250.5, 13.8], [272.2, 14.8], [327.4, 14.9],
                          [365.8, 15], [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
                          [600, 11.8], [365.8, 11], [250.5, 9.8], [162, 10],
                          [58.3, 10.5], [50.9, 10.5], [37.7, 11.2]],
                          isClosed=True, marker=2)
```

```
layer3=mt.createPolygon([[0.0, 23.5], [17, 21.1], [27.3, 16.2], [0, 16.5]],
                          isClosed=True, marker=3)
```

```
layer4 = mt.createPolygon([[0, 16.5], [27.3, 16.2], [37.7, 11.2], [50.9, 10.5],
                            [58.3, 10.5], [162, 10], [250.5, 9.8], [365.8, 11],
                            [600, 11.8], [600, -4.6], [150.9, 0], [0, 3.1]],
                            isClosed=True, marker=4)
```

```
layer5 = mt.createPolygon([[0.0, 3.1], [150.9, 0], [600, -4.6], [600, -58.2],
                            [0, -32.8]],
                            isClosed=True, marker=5)
```

```
layer6 = mt.createPolygon([[600, -58.2], [0, -32.8], [0, -80], [600, -80]],
                            isClosed=True, marker=6)
```

```
layer7 = mt.createPolygon([[38, 18.2], [50, 16], [43.4, 16]],
                            isClosed=True, marker=7)
```

```
layer8 = mt.createPolygon([[50, 16], [67.5, 13], [85, 16], [280.5, 15.9],
                            [272.2, 14.8], [250.5, 13.8], [162, 13.2],
                            [67.3, 12.2], [47.7, 14.3], [43.4, 16]],
                            isClosed=True, marker=8, markerPosition=[90, 14])
```

```
layer9 = mt.createPolygon([[85, 16], [280.5, 15.9], [288.9, 17], [212, 16],
                            [135.2, 17]],
                            isClosed=True, marker=9)
```

```
layer10 = mt.createPolygon([[441.2, 19.7], [444.2, 19.7], [519.5, 17.7],
                             [596, 18.7], [600, 18.7], [600, 18], [519.5, 17],
```

```

        [444.2, 18.8], [441.2, 18.8], [291.9, 16],
        [288.9, 16], [282, 15.9], [280.5, 15.9 ],
        [288.9, 17], [291.9, 16.7], [365.8, 17.7]],
        isClosed=True, marker=10, markerPosition=[443, 19.8])

layer11 = mt.createPolygon([[272.2, 14.8], [327.4, 14.9], [365.8, 15],
        [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
        [600, 18], [519.5, 17], [444.2, 18.8],
        [441.2, 18.8], [291.9,16], [288.9, 16],
        [282, 15.9], [280.5, 15.9]],
        isClosed=True, marker=11)

layer12 = mt.createPolygon([[288.9, 17], [291.9, 17], [365.8, 18], [441.2, 20],
        [444.2, 20], [500, 18.5], [519.5, 18], [600, 19],
        [600, 18.7], [596, 18.7], [519.5, 17.7],
        [444.2, 19.7], [441.2, 19.7],
        [365.8, 17.7], [291.9, 16.7]],
        isClosed=True, marker=12, markerPosition=[330, 17])

geom = (layer1 + layer2 + layer3 +layer4 + layer5 + layer6
+ layer7 + layer8 + layer9 + layer10 + layer11 + layer12)

pg.show(geom)

#%% Viderup sektion 2

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
# har svårt att hitta lagret
layer1=mt.createPolygon([[0.0, 23.5], [13, 23], [25, 22], [38, 18.2],
        [43.4, 16], [0, 16.5]],
        isClosed=True, marker=1)

layer2 = mt.createPolygon([[0, 16.5], [43.4, 16], [47.7, 14.3], [67.3, 12.2],
        [162, 13.2], [250.5, 13.8], [272.2, 14.8],
        [327.4, 14.9], [365.8, 15], [404.3, 15.2],
        [519.5, 14.3], [600, 15.3],
        [600, -4.6], [150.9, 0], [0, 0]],
        isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[0, 0], [150.9, 0], [600, -4.6], [600, -54.9],
        [535.1, -68.6], [502, -72.7], [441, -72.7],
        [302, -58.9], [206.4, -48.5],[0,-35]],
        isClosed=True, marker=3, markerPosition=[100.0, -20.0])

layer4 = mt.createPolygon([[600, -54.9], [535.1, -68.6], [502, -72.7],
        [441, -72.7], [302, -58.9], [206.4, -48.5],
        [0,-35], [0, -80], [600, -80]],
        isClosed=True, marker=4, markerPosition=[100.0, -60])

layer5 = mt.createPolygon([[38, 18.2], [50, 16], [43.4, 16]],
        isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[43.4, 16], [50, 16], [67.5, 13], [85, 16],
        [280.5, 15.9], [272.2, 14.8], [250.5, 13.8],
        [162, 13.2], [67.3, 12.2], [47.7, 14.3]],
        isClosed=True, marker=6)

layer7 = mt.createPolygon([[85, 16], [280.5, 15.9], [288.9, 17], [212, 16],
        [135.2, 17]],
        isClosed=True, marker=7)

```

```

layer8 = mt.createPolygon([[441.2, 19.7], [444.2, 19.7], [519.5, 17.7],
                          [596, 18.7], [600, 18.7], [600, 18],
                          [519.5, 17], [444.2, 18.8], [441.2, 18.8],
                          [291.9, 16], [288.9, 16], [282, 15.9],
                          [280.5, 15.9 ], [288.9, 17], [291.9, 16.7],
                          [365.8, 17.7]],
                          isClosed=True, marker=8, markerPosition=[443, 19.8])

layer9 = mt.createPolygon([[272.2, 14.8], [327.4, 14.9], [365.8, 15],
                          [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
                          [600, 18], [519.5, 17], [444.2, 18.8],
                          [441.2, 18.8], [291.9,16], [288.9, 16],
                          [282, 15.9], [280.5, 15.9]],
                          isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[288.9, 17], [291.9, 17], [365.8, 18], [441.2, 20],
                          [444.2, 20], [500, 18.5], [519.5, 18],
                          [600, 19], [600, 18.7], [596, 18.7], [519.5, 17.7],
                          [444.2, 19.7], [441.2, 19.7],
                          [365.8, 17.7], [291.9, 16.7]],
                          isClosed=True, marker=10, markerPosition=[330, 17])

geom = (layer1 + layer2 + layer3 +layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
        + layer9 + layer10)

pg.show(geom)

#%%% Viderup sektion 3

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
layer1=mt.createPolygon([[0.0, 23.5], [13, 23], [25, 22], [38, 18.2],
                       [43.4, 16], [0, 16.5]],
                       isClosed=True, marker=1)

layer2 = mt.createPolygon([[0, 16.5], [43.4, 16], [47.7, 14.3], [67.3, 12.2],
                          [162, 13.2], [250.5, 13.8], [272.2, 14.8],
                          [327.4, 14.9], [365.8, 15], [404.3, 15.2],
                          [519.5, 14.3], [600, 15.3], [600, 12.3],
                          [411.7, 7.4], [250, 3.9], [156.3, 0],
                          [46.8, -6.3], [30.8, -4.3], [11.1, 4.2], [0,13.5]],
                          isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[600, 12.3], [411.7, 7.4], [250, 3.9], [156.3, 0],
                          [46.8, -6.3], [30.8, -4.3], [11.1, 4.2], [0,13.5],
                          [0, -35.8], [46.7, -40.6], [204.6, -38],
                          [310.7, -33.7], [600,-20.3]],
                          isClosed=True, marker=3, markerPosition=[300, -10])

layer4 = mt.createPolygon([[0, -35.8], [46.7, -40.6], [204.6, -38],
                          [310.7, -33.7], [600,-20.3], [600, -36.4],
                          [227.4, -53.6], [118.2, -61.6], [46.8, -63.7],
                          [0, -45]],
                          isClosed=True, marker=4, markerPosition=[100, -50])

layer5 = mt.createPolygon([[600, -36.4], [227.4, -53.6], [118.2, -61.6],
                          [46.8, -63.7], [0, -45], [0, -80], [600, -80]],
                          isClosed=True, marker=5)

```

```

layer6 = mt.createPolygon([[38, 18.2], [50, 16], [43.4, 16]],
                          isClosed=True, marker=6)

layer7 = mt.createPolygon([[43.4, 16], [50, 16], [67.5, 13], [85, 16],
                          [280.5, 15.9], [272.2, 14.8], [250.5, 13.8],
                          [162, 13.2], [67.3, 12.2], [47.7, 14.3]],
                          isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[85, 16], [280.5, 15.9], [288.9, 17], [212, 16],
                          [135.2, 17]],
                          isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[441.2, 19.7], [444.2, 19.7], [519.5, 17.7],
                          [596, 18.7], [600, 18.7], [600, 18], [519.5, 17],
                          [444.2, 18.8], [441.2, 18.8], [291.9, 16],
                          [288.9, 16], [282, 15.9], [280.5, 15.9 ],
                          [288.9, 17], [291.9, 16.7], [365.8, 17.7]],
                          isClosed=True, marker=9, markerPosition=[443, 19.8])

layer10 = mt.createPolygon([[272.2, 14.8], [327.4, 14.9], [365.8, 15],
                          [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
                          [600, 18], [519.5, 17], [444.2, 18.8],
                          [441.2, 18.8], [291.9, 16], [288.9, 16],
                          [282, 15.9], [280.5, 15.9]],
                          isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[288.9, 17], [291.9, 17], [365.8, 18], [441.2, 20],
                          [444.2, 20], [500, 18.5], [519.5, 18], [600, 19],
                          [600, 18.7], [596, 18.7], [519.5, 17.7],
                          [444.2, 19.7], [441.2, 19.7], [365.8, 17.7],
                          [291.9, 16.7]],
                          isClosed=True, marker=11, markerPosition=[330, 17])

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
+ layer9 + layer10 + layer11)

pg.show(geom)

#%% Ladugårdsmarken sektion 1

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
# har svårt att hitta lagret
layer1 = mt.createPolygon([[0, 75], [50, 75], [88.5, 75.8], [88.5, 75.5],
                          [50, 74.7], [0, 74.7]],
                          isClosed=True, marker=1, markerPosition=[85, 75.6])

layer2 = mt.createPolygon([[91.5, 75.8], [91.5, 75.5], [150, 76.7],
                          [220, 76.7], [220, 77], [150, 77]],
                          isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[223, 77], [275, 77], [450, 74], [550, 74],
                          [600, 73], [600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7],
                          [275, 76.7], [223, 76.7]],
                          isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7], [275, 76.7],
                          [223, 76.7], [223, 75], [220, 75], [220, 76.7],
                          [150, 76.7], [91.5, 75.5], [91.5, 73.8],
                          [88.5, 73.8], [88.5, 75.5], [50, 74.7], [0, 74.7],
                          [0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5],
                          [276.3, 73.5], [448.8, 70.5], [551.5, 70.5],
                          [600, 70]],
                          isClosed=True, marker=4)

```

```

        isClosed=True, marker=4)

layer5 = mt.createPolygon([[0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5], [276.3, 73.5],
    [448.8, 70.5],[551.5, 70.5], [600, 70], [600, 65],
    [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6]],
    isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, 65], [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6],
    [0, 64], [51.2, 64], [149, 66], [275.5, 66],
    [453.5, 63], [600, 63.6]],
    isClosed=True, marker=6, markerPosition=[100, 66])

layer7 = mt.createPolygon([ [0, 64], [51.2, 64], [149, 66], [200, 66],
    [200, -20], [0, -20]],
    isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[210, 66], [275.5, 66], [453.5, 63], [600, 63.6],
    [600, -20], [210, -20]],
    isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[200, 66], [210, 66], [210, -20], [200, -20]],
    isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[88.5, 75.8], [91.5, 75.8], [91.5, 73.8],
    [88.5, 73.8]],
    isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[223, 77], [223, 75], [220, 75], [220, 77]],
    isClosed=True, marker=11)

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
    + layer9 + layer10 + layer11)

pg.show(geom)

#%% Ladugårdsmarken sektion 2

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
layer1 = mt.createPolygon([[0, 75], [50, 75], [88.5, 75.8], [88.5, 75.5],
    [50, 74.7], [0, 74.7]],
    isClosed=True, marker=1, markerPosition=[85, 75.6])

layer2 = mt.createPolygon([[91.5, 75.8], [91.5, 75.5], [150, 76.7],
    [220, 76.7], [220, 77], [150, 77]],
    isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[223, 77], [275, 77], [450, 74], [550, 74],
    [600, 73], [600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7],
    [275, 76.7], [223, 76.7]],
    isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7], [275, 76.7],
    [223, 76.7], [223, 75],[220, 75], [220, 76.7],
    [150, 76.7], [91.5, 75.5], [91.5, 73.8],
    [88.5, 73.8], [88.5, 75.5], [50, 74.7], [0, 74.7],
    [0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5],[276.3, 73.5],
    [448.8, 70.5], [551.5, 70.5], [600, 70]],
    isClosed=True, marker=4)

```

```

layer5 = mt.createPolygon([[0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5], [276.3, 73.5],
                          [448.8, 70.5], [450, 70.5], [456.6, 69.1],
                          [482.2, 67.7], [511.4, 67.7], [542.4, 69.1],
                          [550, 70.5], [551.5, 70.5], [600, 70], [600, 65],
                          [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6]],
                          isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, 65], [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6],
                          [0, 64], [51.2, 64], [100, 65], [121.9, 65.4],
                          [131.9, 65.6], [150, 66], [275.5, 66], [400, 63.9],
                          [453.5, 63], [593.3, 63.6], [600, 63.6]],
                          isClosed=True, marker=6, markerPosition=[100, 66])

layer7 = mt.createPolygon([ [0, 64], [51.2, 64], [100, 65], [121.9, 65.4],
                          [121.9, -20], [0, -20]],
                          isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[131.9, 65.6], [131.9, -20], [600, -20],
                          [600, 63.6], [593.3, 63.6], [453.5, 63],
                          [400, 63.9], [275.5, 66], [200, 66], [150, 66]],
                          isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[131.9, 65.6], [131.9, -20], [121.9, -20],
                          [121.9, 65.4]],
                          isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[88.5, 75.8], [91.5, 75.8], [91.5, 73.8],
                          [88.5, 73.8]],
                          isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[223, 77], [223, 75], [220, 75], [220, 77]],
                          isClosed=True, marker=11)

layer12 = mt.createPolygon([[450, 70.5], [456.6, 69.1], [482.2, 67.7],
                          [511.4, 67.7], [542.4, 69.1], [550, 70.5]],
                          isClosed=True, marker=12)

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
+ layer9 + layer10 + layer11 + layer12)

pg.show(geom)

#%% Ladugårdsmarken sektion 3

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
layer1 = mt.createPolygon([[0, 75], [50, 75], [88.5, 75.8], [88.5, 75.5],
                          [50, 74.7], [0, 74.7]],
                          isClosed=True, marker=1, markerPosition=[85, 75.6])

layer2 = mt.createPolygon([[91.5, 75.8], [91.5, 75.5], [150, 76.7],
                          [220, 76.7], [220, 77], [150, 77]],
                          isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[223, 77], [275, 77], [450, 74], [550, 74],
                          [600, 73], [600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7],
                          [275, 76.7], [223, 76.7]],
                          isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7], [275, 76.7],

```



```

        [223, 76.7], [223, 75], [220, 75], [220, 76.7],
        [150, 76.7], [91.5, 75.5], [91.5, 73.8],
        [88.5, 73.8], [88.5, 75.5], [50, 74.7], [0, 74.7],
        [0, 66.4], [264.6, 67.5], [400, 65], [600, 65]],
        isClosed=True, marker=4)

layer5 = mt.createPolygon([[0, 66.4], [264.6, 67.5], [400, 65], [600, 65],
        [600, 62.3], [550, 63], [450, 63], [275, 66],
        [150, 66], [100, 65], [50, 64], [0, 64]],
        isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, 62.3], [550, 63], [450, 63], [275, 66],
        [150, 66], [100, 65], [50, 64], [0, 64], [0, 55],
        [50, 55], [100, 56], [150, 57], [282.9, 57],
        [437.7, 54.5], [600, 54.7]],
        isClosed=True, marker=6)

layer7 = mt.createPolygon([[210, 57], [282.9, 57], [437.7, 54.5], [600, 54.7],
        [600, -20], [210, -20]],
        isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[0, 55], [50, 55], [100, 56], [150, 57], [200, 57],
        [200, -20], [0, -20]],
        isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[200, 57], [210, 57], [210, -20], [200, -20]],
        isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[88.5, 75.8], [91.5, 75.8], [91.5, 73.8],
        [88.5, 73.8]],
        isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[223, 77], [223, 75], [220, 75], [220, 77]],
        isClosed=True, marker=11)

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
+ layer9 + layer10 + layer11)

pg.show(geom)
### Välj antal elektroder, önskat avstånd och tillhörande topografi

#Antal elektroder
numberElectrodes = 81

#Önskad elektrodavstånd (ändra både sensors och scheme)
#'gr' står för gradient och användes för samtliga mätningar men kan ändras om
#så är önskvärt
sensors = np.linspace(100, 500, numberElectrodes)
scheme = ert.createData(elecs=np.linspace(start=100, stop=500, num=81),
        schemeName='gr')
pos = np.array(scheme.sensors())

def connect_nodes(coordinates):
    x = [coord[0] for coord in coordinates]
    y = [coord[1] for coord in coordinates]
    return x, y

def find_y_given_x(x_value, x, y):
    # Interpolerar y-värden för givet x-värde

```

```

if x_value < min(x) or x_value > max(x):
    return None # x-värdet är utanför gränsen

for i in range(len(x) - 1):
    if x[i] <= x_value <= x[i + 1]:
        # Linjär interpolering
        slope = (y[i + 1] - y[i]) / (x[i + 1] - x[i])
        return y[i] + slope * (x_value - x[i])

# Koordinater för topografin (topplagret från tillhörande geometri)
#Topografi för Ladugårdsmarken [50, 75], [149, 77], [275, 77],
#[450, 74], [550, 74]
#Topografi för Viderup (nedanför i nodes)
nodes = [[100, 16.3], [135.2, 17], [206.2, 16.1], [212, 16.], [288.9, 17.],
         [291.9, 17.], [365.8, 18.], [441.2, 20.], [444.2, 20.], [500, 18.5]]
x_value = sensors

x, y = connect_nodes(nodes)

result_matrix = []

for x_val in x_value:
    y_val = find_y_given_x(x_val, x, y)
    i = np.where(pos[:, 0] == x_val)
    if y_val is not None:
        pos[i,1]=y_val-0.1

scheme.setSensors(pos)

#%% Skapar mesh och ser till att ingen sensor delar polygon
for p in scheme.sensors():
    geom.createNode(p)
    geom.createNode(p - [0, 0.1])

mesh = mt.createMesh(geom, quality=34, area=15, smooth=[1, 10])
# Visar den skapade meshen
ax, _ = pg.show(mesh)
#%% Välj resistiviteten för varje lager från geometrin
# Samtliga resistiviteter är presenterade nedan

# Viderup sektion 1
# [Lagrets marker, Lagrets resistivitet]
rhomap = [[1, 50.],
          [2, 70.],
          [3, 300.],
          [4, 150.],
          [5, 100.],
          [6, 60.],
          [7, 50.],
          [8, 50.],
          [9, 50.],
          [10, 40.],
          [11, 100.],
          [12, 300]]

# Visar lagrens valda resistivitet
pg.show(mesh, data=rhomap, label=pg.unit('res'), showMesh=True)
#%% Viderup sektion 2

rhomap = [[1, 300.],
          [2, 150.],

```

```
[3, 50.],  
[4, 60.],  
[5, 50.],  
[6, 50.],  
[7, 50.],  
[8, 40.],  
[9, 100.],  
[10, 300.]]
```

```
pg.show(mesh, data=rhomap, label=pg.unit('res'), showMesh=True)  
#% Viderup sektion 3
```

```
rhomap = [[1, 300.],  
[2, 70.],  
[3, 100.],  
[4, 80.],  
[5, 60.],  
[6, 50.],  
[7, 50.],  
[8, 50.],  
[9, 40.],  
[10, 100],  
[11, 300.]]
```

```
pg.show(mesh, data=rhomap, label=pg.unit('res'), showMesh=True)
```

```
#% Ladugårdsmarken sektion 1
```

```
rhomap = [[1, 40.],  
[2, 40.],  
[3, 40.],  
[4, 25.],  
[5, 50.],  
[6, 50.],  
[7, 200.],  
[8, 200.],  
[9, 20000.],  
[10, 50],  
[11, 50]]
```

```
pg.show(mesh, data=rhomap, label=pg.unit('res'), showMesh=True)
```

```
#% Ladugårdsmarken sektion 2
```

```
rhomap = [[1, 40.],  
[2, 40.],  
[3, 40.],  
[4, 25.],  
[5, 50.],  
[6, 50.],  
[7, 200.],  
[8, 200.],  
[9, 20000.],  
[10, 50],  
[11, 50],  
[12, 500]]
```

```
pg.show(mesh, data=rhomap, label=pg.unit('res'), showMesh=True)
```

```
#% Ladugårdsmarken sektion 3
```

```

rhomap = [[1, 40.],
          [2, 40.],
          [3, 40.],
          [4, 25.],
          [5, 15.],
          [6, 50.],
          [7, 200.],
          [8, 200.],
          [9, 20000.],
          [10, 50],
          [11, 50]]

pg.show(mesh, data=rhomap, label=pg.unit('res'), showMesh=True)
### Forward simuleringen för att skapa syntetisk data, med tillsatt brus i
# reproducerbart format
data = ert.simulate(mesh, scheme=scheme, res=rhomap, noiseLevel=1,
                  noiseAbs=1e-6, seed=1337)

#Info om datan, min/max och dess avvikelse
pg.info(np.linalg.norm(data['err']), np.linalg.norm(data['rhoa']))
pg.info('Simulated data', data)
pg.info('The data contains:', data.dataMap().keys())
pg.info('Simulated rhoa (min/max)', min(data['rhoa']), max(data['rhoa']))
pg.info('Selected data noise %(min/max)',
        min(data['err'])*100, max(data['err'])*100)

### Tar bort eventuell negativ resistivitet
data.remove(data['rhoa'] < 0)
pg.info('Filtered rhoa (min/max)', min(data['rhoa']), max(data['rhoa']))
data.save('simple.dat')

# Visar pseudosektionen
ert.show(data)

### Invertering av filtrerad
mgr = ert.ERTManager('simple.dat')

inv = mgr.invert(lam=20, verbose=True)
np.testing.assert_approx_equal(mgr.inv.chi2(), 0.7, significant=1)
### Visar den slutliga inverteringen med uppgett skala
ax, _ = mgr.showResult(cMin=50, cMax=150, logScale=False)
# Överlägger geometrins rand för att lättare visualisera hur inverteringen
# jämförs med geometrin
ax, _ = pg.show(geom, ax=ax, fillRegion=False, regionMarker=False)
### Exportering av data till res2Dinv
exportData(data, filename='ERT_V_5m_S1.dat', fmt='res2dinv')

```

Seismik

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Fri May 10 18:50:06 2024

@author: Isak Johansson & pyGimli
Edit of 2D Refraction modelling and inversion
"""
import numpy as np
import pygimli as pg
import pygimli.meshtools as mt
import pygimli.physics.traveltime as tt
import matplotlib.pyplot as plt
#%% Samtliga sektioner är sammanställda nedan. Kör önskad sektion cell för att
#skapa geometrin

#Viderup sektion 1

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
layer1 = mt.createPolygon([[0.0, 23.5],[13, 23], [25, 22], [38, 18.2],
                          [43.4, 16], [27.3, 16.2], [17, 21.1]],
                          isClosed=True, marker=1, markerPosition=[30, 18])

layer2=mt.createPolygon([[27.3, 16.2], [43.4, 16], [47.7, 14.3], [67.3, 12.2],
                        [162, 13.2], [250.5, 13.8], [272.2, 14.8], [327.4, 14.9],
                        [365.8, 15], [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
                        [600, 11.8], [365.8, 11], [250.5, 9.8], [162, 10],
                        [58.3, 10.5], [50.9, 10.5], [37.7, 11.2]],
                        isClosed=True, marker=2)

layer3=mt.createPolygon([[0.0, 23.5], [17, 21.1], [27.3, 16.2], [0, 16.5]],
                        isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[0, 16.5], [27.3, 16.2], [37.7, 11.2], [50.9, 10.5],
                          [58.3, 10.5], [162, 10], [250.5, 9.8], [365.8, 11],
                          [600, 11.8], [600, -4.6], [150.9, 0], [0, 3.1]],
                          isClosed=True, marker=4)

layer5 = mt.createPolygon([[0.0, 3.1], [150.9, 0], [600, -4.6], [600, -58.2],
                          [0, -32.8]],
                          isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, -58.2], [0, -32.8], [0, -80], [600, -80]],
                          isClosed=True, marker=6)

layer7 = mt.createPolygon([[38, 18.2], [50, 16], [43.4, 16]],
                          isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[50, 16], [67.5, 13], [85, 16], [280.5, 15.9],
                          [272.2, 14.8], [250.5, 13.8], [162, 13.2],
                          [67.3, 12.2], [47.7, 14.3], [43.4, 16]],
                          isClosed=True, marker=8, markerPosition=[90, 14])

layer9 = mt.createPolygon([[85, 16], [280.5, 15.9], [288.9, 17], [212, 16],
                          [135.2, 17]],
                          isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[441.2, 19.7], [444.2, 19.7], [519.5, 17.7],
                          [596, 18.7], [600, 18.7], [600, 18], [519.5, 17],
                          [444.2, 18.8], [441.2, 18.8], [291.9, 16],
                          [288.9, 16], [282, 15.9], [280.5, 15.9 ]],
```

```

        [288.9, 17], [291.9, 16.7], [365.8, 17.7]],
        isClosed=True, marker=10, markerPosition=[443, 19.8])

layer11 = mt.createPolygon([[272.2, 14.8], [327.4, 14.9], [365.8, 15],
        [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
        [600, 18], [519.5, 17], [444.2, 18.8],
        [441.2, 18.8], [291.9,16], [288.9, 16],
        [282, 15.9], [280.5, 15.9]],
        isClosed=True, marker=11)

layer12 = mt.createPolygon([[288.9, 17], [291.9, 17], [365.8, 18], [441.2, 20],
        [444.2, 20], [500, 18.5], [519.5, 18], [600, 19],
        [600, 18.7], [596, 18.7], [519.5, 17.7],
        [444.2, 19.7], [441.2, 19.7],
        [365.8, 17.7], [291.9, 16.7]],
        isClosed=True, marker=12, markerPosition=[330, 17])

geom = (layer1 + layer2 + layer3 +layer4 + layer5 + layer6
+ layer7 + layer8 + layer9 + layer10 + layer11 + layer12)

pg.show(geom)

#%% Viderup sektion 2

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
# har svårt att hitta lagret
layer1=mt.createPolygon([[0.0, 23.5], [13, 23], [25, 22], [38, 18.2],
        [43.4, 16], [0, 16.5]],
        isClosed=True, marker=1)

layer2 = mt.createPolygon([[0, 16.5], [43.4, 16], [47.7, 14.3], [67.3, 12.2],
        [162, 13.2], [250.5, 13.8], [272.2, 14.8],
        [327.4, 14.9], [365.8, 15], [404.3, 15.2],
        [519.5, 14.3], [600, 15.3],
        [600, -4.6], [150.9, 0], [0, 0]],
        isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[0, 0], [150.9, 0], [600, -4.6], [600, -54.9],
        [535.1, -68.6], [502, -72.7], [441, -72.7],
        [302, -58.9], [206.4, -48.5],[0,-35]],
        isClosed=True, marker=3, markerPosition=[100.0, -20.0])

layer4 = mt.createPolygon([[600, -54.9], [535.1, -68.6], [502, -72.7],
        [441, -72.7], [302, -58.9], [206.4, -48.5],
        [0,-35], [0, -80], [600, -80]],
        isClosed=True, marker=4, markerPosition=[100.0, -60])

layer5 = mt.createPolygon([[38, 18.2], [50, 16], [43.4, 16]],
        isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[43.4, 16], [50, 16], [67.5, 13], [85, 16],
        [280.5, 15.9], [272.2, 14.8], [250.5, 13.8],
        [162, 13.2], [67.3, 12.2], [47.7, 14.3]],
        isClosed=True, marker=6)

layer7 = mt.createPolygon([[85, 16], [280.5, 15.9], [288.9, 17], [212, 16],
        [135.2, 17]],
        isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[441.2, 19.7], [444.2, 19.7], [519.5, 17.7],

```

```

        [596, 18.7], [600, 18.7], [600, 18],
        [519.5, 17], [444.2, 18.8], [441.2, 18.8],
        [291.9, 16], [288.9, 16], [282, 15.9],
        [280.5, 15.9 ], [288.9, 17], [291.9, 16.7],
        [365.8, 17.7]],
        isClosed=True, marker=8, markerPosition=[443, 19.8])

layer9 = mt.createPolygon([[272.2, 14.8], [327.4, 14.9], [365.8, 15],
        [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
        [600, 18], [519.5, 17], [444.2, 18.8],
        [441.2, 18.8], [291.9,16], [288.9, 16],
        [282, 15.9], [280.5, 15.9]],
        isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[288.9, 17], [291.9, 17], [365.8, 18], [441.2, 20],
        [444.2, 20], [500, 18.5], [519.5, 18],
        [600, 19], [600, 18.7], [596, 18.7], [519.5, 17.7],
        [444.2, 19.7], [441.2, 19.7],
        [365.8, 17.7], [291.9, 16.7]],
        isClosed=True, marker=10, markerPosition=[330, 17])

geom = (layer1 + layer2 + layer3 +layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
        + layer9 + layer10)

pg.show(geom)

#% Viderup sektion 3

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
layer1=mt.createPolygon([[0.0, 23.5], [13, 23], [25, 22], [38, 18.2],
        [43.4, 16], [0, 16.5]],
        isClosed=True, marker=1)

layer2 = mt.createPolygon([[0, 16.5], [43.4, 16], [47.7, 14.3], [67.3, 12.2],
        [162, 13.2], [250.5, 13.8], [272.2, 14.8],
        [327.4, 14.9], [365.8, 15], [404.3, 15.2],
        [519.5, 14.3], [600, 15.3], [600, 12.3],
        [411.7, 7.4], [250, 3.9], [156.3, 0],
        [46.8, -6.3], [30.8, -4.3], [11.1, 4.2], [0,13.5]],
        isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[600, 12.3], [411.7, 7.4], [250, 3.9], [156.3, 0],
        [46.8, -6.3], [30.8, -4.3], [11.1, 4.2], [0,13.5],
        [0, -35.8], [46.7, -40.6], [204.6, -38],
        [310.7, -33.7], [600,-20.3]],
        isClosed=True, marker=3, markerPosition=[300, -10])

layer4 = mt.createPolygon([[0, -35.8], [46.7, -40.6], [204.6, -38],
        [310.7, -33.7], [600,-20.3], [600, -36.4],
        [227.4, -53.6], [118.2, -61.6], [46.8, -63.7],
        [0, -45]],
        isClosed=True, marker=4, markerPosition=[100, -50])

layer5 = mt.createPolygon([[600, -36.4], [227.4, -53.6], [118.2, -61.6],
        [46.8, -63.7], [0, -45], [0, -80], [600, -80]],
        isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[38, 18.2], [50, 16], [43.4, 16]],
        isClosed=True, marker=6)

```

```

layer7 = mt.createPolygon([[43.4, 16], [50, 16], [67.5, 13], [85, 16],
                          [280.5, 15.9], [272.2, 14.8], [250.5, 13.8],
                          [162, 13.2], [67.3, 12.2], [47.7, 14.3]],
                          isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[85, 16], [280.5, 15.9], [288.9, 17], [212, 16],
                          [135.2, 17]],
                          isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[441.2, 19.7], [444.2, 19.7], [519.5, 17.7],
                          [596, 18.7], [600, 18.7], [600, 18], [519.5, 17],
                          [444.2, 18.8], [441.2, 18.8], [291.9, 16],
                          [288.9, 16], [282, 15.9], [280.5, 15.9 ],
                          [288.9, 17], [291.9, 16.7], [365.8, 17.7]],
                          isClosed=True, marker=9, markerPosition=[443, 19.8])

layer10 = mt.createPolygon([[272.2, 14.8], [327.4, 14.9], [365.8, 15],
                           [404.3, 15.2], [519.5, 14.3], [600, 15.3],
                           [600, 18], [519.5, 17], [444.2, 18.8],
                           [441.2, 18.8], [291.9, 16], [288.9, 16],
                           [282, 15.9], [280.5, 15.9]],
                           isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[288.9, 17], [291.9, 17], [365.8, 18], [441.2, 20],
                           [444.2, 20], [500, 18.5], [519.5, 18], [600, 19],
                           [600, 18.7], [596, 18.7], [519.5, 17.7],
                           [444.2, 19.7], [441.2, 19.7], [365.8, 17.7],
                           [291.9, 16.7]],
                           isClosed=True, marker=11, markerPosition=[330, 17])

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
+ layer9 + layer10 + layer11)

pg.show(geom)

#% Ladugårdsmarken sektion 1

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
# har svårt att hitta lagret
layer1 = mt.createPolygon([[0, 75], [50, 75], [88.5, 75.8], [88.5, 75.5],
                          [50, 74.7], [0, 74.7]],
                          isClosed=True, marker=1, markerPosition=[85, 75.6])

layer2 = mt.createPolygon([[91.5, 75.8], [91.5, 75.5], [150, 76.7],
                          [220, 76.7], [220, 77], [150, 77]],
                          isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[223, 77], [275, 77], [450, 74], [550, 74],
                          [600, 73], [600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7],
                          [275, 76.7], [223, 76.7]],
                          isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7], [275, 76.7],
                          [223, 76.7], [223, 75], [220, 75], [220, 76.7],
                          [150, 76.7], [91.5, 75.5], [91.5, 73.8],
                          [88.5, 73.8], [88.5, 75.5], [50, 74.7], [0, 74.7],
                          [0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5],
                          [276.3, 73.5], [448.8, 70.5], [551.5, 70.5],
                          [600, 70]],
                          isClosed=True, marker=4)

```



```

layer5 = mt.createPolygon([[0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5], [276.3, 73.5],
                          [448.8, 70.5],[551.5, 70.5], [600, 70], [600, 65],
                          [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6]],
                          isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, 65], [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6],
                          [0, 64], [51.2, 64], [149, 66], [275.5, 66],
                          [453.5, 63], [600, 63.6]],
                          isClosed=True, marker=6, markerPosition=[100, 66])

layer7 = mt.createPolygon([ [0, 64], [51.2, 64], [149, 66], [200, 66],
                          [200, -20], [0, -20]],
                          isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[210, 66], [275.5, 66], [453.5, 63], [600, 63.6],
                          [600, -20], [210, -20]],
                          isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[200, 66], [210, 66], [210, -20], [200, -20]],
                          isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[88.5, 75.8], [91.5, 75.8], [91.5, 73.8],
                          [88.5, 73.8]],
                          isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[223, 77], [223, 75], [220, 75], [220, 77]],
                          isClosed=True, marker=11)

```

```

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
       + layer9 + layer10 + layer11)

```

```

pg.show(geom)

```

```

#%% Ladugårdsmarken sektion 2

```

```

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret

```

```

layer1 = mt.createPolygon([[0, 75], [50, 75], [88.5, 75.8], [88.5, 75.5],
                          [50, 74.7], [0, 74.7]],
                          isClosed=True, marker=1, markerPosition=[85, 75.6])

layer2 = mt.createPolygon([[91.5, 75.8], [91.5, 75.5], [150, 76.7],
                          [220, 76.7], [220, 77], [150, 77]],
                          isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[223, 77], [275, 77], [450, 74], [550, 74],
                          [600, 73], [600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7],
                          [275, 76.7], [223, 76.7]],
                          isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7], [275, 76.7],
                          [223, 76.7], [223, 75],[220, 75], [220, 76.7],
                          [150, 76.7], [91.5, 75.5], [91.5, 73.8],
                          [88.5, 73.8], [88.5, 75.5], [50, 74.7], [0, 74.7],
                          [0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5],[276.3, 73.5],
                          [448.8, 70.5], [551.5, 70.5], [600, 70]],
                          isClosed=True, marker=4)

layer5 = mt.createPolygon([[0, 71.5], [51, 71.5], [149, 73.5], [276.3, 73.5],
                          [448.8, 70.5], [450, 70.5], [456.6, 69.1],

```

```

        [482.2, 67.7], [511.4, 67.7], [542.4, 69.1],
        [550, 70.5], [551.5, 70.5], [600, 70], [600, 65],
        [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6]],
        isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, 65], [400, 65], [266, 67.5], [0, 66.6],
        [0, 64], [51.2, 64], [100, 65], [121.9, 65.4],
        [131.9, 65.6], [150, 66], [275.5, 66], [400, 63.9],
        [453.5, 63], [593.3, 63.6], [600, 63.6]],
        isClosed=True, marker=6, markerPosition=[100, 66])

layer7 = mt.createPolygon([ [0, 64], [51.2, 64], [100, 65], [121.9, 65.4],
        [121.9, -20], [0, -20]],
        isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[131.9, 65.6], [131.9, -20], [600, -20],
        [600, 63.6], [593.3, 63.6], [453.5, 63],
        [400, 63.9], [275.5, 66], [200, 66], [150, 66]],
        isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[131.9, 65.6], [131.9, -20], [121.9, -20],
        [121.9, 65.4]],
        isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[88.5, 75.8], [91.5, 75.8], [91.5, 73.8],
        [88.5, 73.8]],
        isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[223, 77], [223, 75], [220, 75], [220, 77]],
        isClosed=True, marker=11)

layer12 = mt.createPolygon([[450, 70.5], [456.6, 69.1], [482.2, 67.7],
        [511.4, 67.7], [542.4, 69.1], [550, 70.5]],
        isClosed=True, marker=12)

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
+ layer9 + layer10 + layer11 + layer12)

pg.show(geom)

#%% Ladugårdsmarken sektion 3

#Ange nodkoordinater för samtliga lager. Markerposition kan hjälpa om koden
#har svårt att hitta lagret
layer1 = mt.createPolygon([[0, 75], [50, 75], [88.5, 75.8], [88.5, 75.5],
        [50, 74.7], [0, 74.7]],
        isClosed=True, marker=1, markerPosition=[85, 75.6])

layer2 = mt.createPolygon([[91.5, 75.8], [91.5, 75.5], [150, 76.7],
        [220, 76.7], [220, 77], [150, 77]],
        isClosed=True, marker=2)

layer3 = mt.createPolygon([[223, 77], [275, 77], [450, 74], [550, 74],
        [600, 73], [600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7],
        [275, 76.7], [223, 76.7]],
        isClosed=True, marker=3)

layer4 = mt.createPolygon([[600, 72.7], [550, 73.7], [450, 73.7], [275, 76.7],
        [223, 76.7], [223, 75], [220, 75], [220, 76.7],
        [150, 76.7], [91.5, 75.5], [91.5, 73.8],

```

```

        [88.5, 73.8],[88.5, 75.5], [50, 74.7], [0, 74.7],
        [0, 66.4], [264.6, 67.5], [400, 65], [600, 65]],
        isClosed=True, marker=4)

layer5 = mt.createPolygon([[0, 66.4], [264.6, 67.5], [400, 65], [600, 65],
        [600, 62.3], [550, 63], [450, 63], [275, 66],
        [150, 66], [100, 65], [50, 64], [0, 64]],
        isClosed=True, marker=5)

layer6 = mt.createPolygon([[600, 62.3], [550, 63], [450, 63], [275, 66],
        [150, 66], [100, 65], [50, 64], [0, 64], [0, 55],
        [50, 55], [100, 56], [150, 57], [282.9, 57],
        [437.7, 54.5], [600, 54.7]],
        isClosed=True, marker=6)

layer7 = mt.createPolygon([[210, 57], [282.9, 57], [437.7, 54.5], [600, 54.7],
        [600, -20], [210, -20]],
        isClosed=True, marker=7)

layer8 = mt.createPolygon([[0, 55], [50, 55], [100, 56], [150, 57], [200, 57],
        [200, -20], [0, -20]],
        isClosed=True, marker=8)

layer9 = mt.createPolygon([[200, 57], [210, 57], [210, -20], [200, -20]],
        isClosed=True, marker=9)

layer10 = mt.createPolygon([[88.5, 75.8], [91.5, 75.8], [91.5, 73.8],
        [88.5, 73.8]],
        isClosed=True, marker=10)

layer11 = mt.createPolygon([[223, 77], [223, 75], [220, 75], [220, 77]],
        isClosed=True, marker=11)

geom = (layer1 + layer2 + layer3 + layer4 + layer5 + layer6 + layer7 + layer8
+ layer9 + layer10 + layer11)

pg.show(geom)

#%% Välj antal geofoner, önskat avstånd och tillhörande topografi
numberGeophones = 81

#Önskad geofonavstånd
sensors = np.linspace(100, 500, numberGeophones)
scheme = tt.createRAData(sensors)
pos = np.array(scheme.sensors())

def connect_nodes(coordinates):
    x = [coord[0] for coord in coordinates]
    y = [coord[1] for coord in coordinates]
    return x, y

def find_y_given_x(x_value, x, y):
    # Interpolate y-value for the given x using linear interpolation
    if x_value < min(x) or x_value > max(x):
        return None # x_value is outside the range

    for i in range(len(x) - 1):
        if x[i] <= x_value <= x[i + 1]:
            # Linear interpolation formula

```

```

        slope = (y[i + 1] - y[i]) / (x[i + 1] - x[i])
        return y[i] + slope * (x_value - x[i])

# Koordinater för topografin (topplagret från tillhörande geometri)
#Topografi för Ladugårdsmarken [50, 75], [149, 77], [275, 77],
#[450, 74], [550, 74]
#Topografi för Viderup (nedanför i nodes)
nodes = [[100, 16.3], [135.2, 17], [206.2, 16.1], [212, 16.], [288.9, 17.],
         [291.9, 17.], [365.8, 18.], [441.2, 20.], [444.2, 20.], [500, 18.5]]
x_value = sensors

x, y = connect_nodes(nodes)

result_matrix = []

for x_val in x_value:
    y_val = find_y_given_x(x_val, x, y)
    i = np.where(pos[:, 0] == x_val)
    if y_val is not None:
        pos[i,1]=y_val

scheme.setSensors(pos)

#%% Skapar mesh och ser till att ingen sensor delar polygon
for p in scheme.sensors():
    geom.createNode(p)
    geom.createNode(p - [0, 0.1])

mesh = mt.createMesh(geom, quality=34, area=15, smooth=[1, 10])
# Visar den skapade meshen
ax, _ = pg.show(mesh)
#%% Välj hastighet för varje lager från geometrin
# Samtliga hastigheter är presenterade nedan

# Viderup sektion 1
# [Lagrets marker, Lagrets resistivitet]
vp = np.array(mesh.cellMarkers())
vp[vp == 1] = 1000
vp[vp == 2] = 1000
vp[vp == 3] = 1500
vp[vp == 4] = 1500
vp[vp == 5] = 2000
vp[vp == 6] = 3000
vp[vp == 7] = 700
vp[vp == 8] = 700
vp[vp == 9] = 700
vp[vp == 10] = 400
vp[vp == 11] = 1400
vp[vp == 12] = 600

ax, _ = pg.show(mesh, vp, colorBar=True, logScale=False, label='v in m/s')
pg.viewer.mpl.drawSensors(ax, scheme.sensors(), diam=1.0,
                          facecolor='white', edgecolor='black')

#%% Viderup sektion 2
vp = np.array(mesh.cellMarkers())
vp[vp == 1] = 600
vp[vp == 2] = 1500
vp[vp == 3] = 2000
vp[vp == 4] = 3000
vp[vp == 5] = 700

```

```

vp[vp == 6] = 700
vp[vp == 7] = 700
vp[vp == 8] = 400
vp[vp == 9] = 1400
vp[vp == 10] = 600

ax, _ = pg.show(mesh, vp, colorBar=True, logScale=False, label='v in m/s')
pg.viewer.mpl.drawSensors(ax, scheme.sensors(), diam=1.0,
                          facecolor='white', edgcolor='black')

#% Viderup sektion 3

vp = np.array(mesh.cellMarkers())
vp[vp == 1] = 600
vp[vp == 2] = 1000
vp[vp == 3] = 2000
vp[vp == 4] = 2500
vp[vp == 5] = 3000
vp[vp == 6] = 700
vp[vp == 7] = 700
vp[vp == 8] = 700
vp[vp == 9] = 400
vp[vp == 10] = 1400
vp[vp == 11] = 600

ax, _ = pg.show(mesh, vp, colorBar=True, logScale=False, label='v in m/s')
pg.viewer.mpl.drawSensors(ax, scheme.sensors(), diam=0.5,
                          facecolor='white', edgcolor='black')

#% Ladugårdsmarken sektion 1

vp = np.array(mesh.cellMarkers())
vp[vp == 1] = 400
vp[vp == 2] = 400
vp[vp == 3] = 400
vp[vp == 4] = 1700
vp[vp == 5] = 2000
vp[vp == 6] = 2000
vp[vp == 7] = 3500
vp[vp == 8] = 3500
vp[vp == 9] = 6500
vp[vp == 10] = 700
vp[vp == 11] = 700

ax, _ = pg.show(mesh, vp, colorBar=True, logScale=False, label='v in m/s')
pg.viewer.mpl.drawSensors(ax, scheme.sensors(), diam=1.0,
                          facecolor='white', edgcolor='black')

#% Ladugårdsmarken sektion 2

vp = np.array(mesh.cellMarkers())
vp[vp == 1] = 400
vp[vp == 2] = 400
vp[vp == 3] = 400
vp[vp == 4] = 1700
vp[vp == 5] = 2000
vp[vp == 6] = 2000
vp[vp == 7] = 3500
vp[vp == 8] = 3500
vp[vp == 9] = 6500
vp[vp == 10] = 700
vp[vp == 11] = 700
vp[vp == 12] = 700

```

```

ax, _ = pg.show(mesh, vp, colorBar=True, logScale=False, label='v in m/s')
pg.viewer.mpl.drawSensors(ax, scheme.sensors(), diam=0.5,
                           facecolor='white', edgecolor='black')
#%% Ladugårdsmarken sektion 3

vp = np.array(mesh.cellMarkers())
vp[vp == 1] = 400
vp[vp == 2] = 400
vp[vp == 3] = 400
vp[vp == 4] = 1700
vp[vp == 5] = 2000
vp[vp == 6] = 2000
vp[vp == 7] = 3500
vp[vp == 8] = 3500
vp[vp == 9] = 6500
vp[vp == 10] = 700
vp[vp == 11] = 700

ax, _ = pg.show(mesh, vp, colorBar=True, logScale=False, label='v in m/s')
pg.viewer.mpl.drawSensors(ax, scheme.sensors(), diam=1.0,
                           facecolor='white', edgecolor='black')
#%% Forward simuleringen för att skapa syntetisk data, med tillsatt brus i
# reproducerbart format
data = tt.simulate(slowness=1.0 / vp, scheme=scheme, mesh=mesh,
                  noiseLevel=0.001, noiseAbs=0.0005, seed=1337, verbose=True)
data.save('Sei_V_5m_S1.txt') #för överföring till Geogiga, behövs inte annars
tt.show(data)
#%% Invertering av simulerad data
mgr = tt.TravelTimeManager(data)
vest = mgr.invert(secNodes=2, paraMaxCellSize=15.0,
                 maxIter=15, verbose=True)
np.testing.assert_array_less(mgr.inv.inv.chi2(), 1.3)
#%% Visar den slutliga inverteringen med uppgett skåla
ax, _ = mgr.showResult(cMin=400, cMax=4000, logScale=False)
# Överlägger geometrins rand för att lättare visualisera hur inverteringen
# jämförs med geometrin
ax, _ = pg.show(geom, ax=ax, fillRegion=False, regionMarker=False)

```

Mätkod

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Mar 21 20:04:39 2024

@author: Isak Johansson
"""

import os
import glob
#Välj själv vart filer ska hämtas/skickas
path = 'c:\\Users\\Admin\\Documents\\Examensarbete\\Viderup\\RES2DINV\\'
os.chdir(path)
files=glob.glob('*.*dat')
#%%
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pygimli as pg
import pygimli.meshtools as mt
from pygimli.physics import ert
from pybert import importData

#%% Exportering av data till res2Dinv

#Välj relevant .dat-fil
data = importData('ERT_Viderup_2m_Ed.dat')

data["err"] = ert.ERTManager().estimateError(data)

data["k"] = ert.createGeometricFactors(data)

#%%
data.remove(data['rhoa'] < 0)
pg.info('Filtered rhoa (min/max)', min(data['rhoa']), max(data['rhoa']))

data.save('simple.dat')

ert.show(data)

#%% Invertering av forward datan
mgr = ert.ERTManager('simple.dat')
inv = mgr.invert(lam=20, verbose=True)
np.testing.assert_approx_equal(mgr.inv.chi2(), 0.7, significant=1)

#%% Visa resultat av invertering
mgr.showResult(cMin=10, cMax=150, logScale=False)
```