

# Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsför- höjande markegenskaper kring fjärr- värmeledningar i Ängelholm

*Anders Plan*

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,  
kandidatarbete, nr 485  
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2016



# **Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsför- höjande markegenskaper kring fjärr- värmeledningar i Ängelholm**

Kandidatarbete  
Anders Plan

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2016

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>5</b>
1.1	Inledning	5
1.2	Syfte	5
1.3	Frågeställning	5
1.4	Avgränsningar	5
<b>2</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>6</b>
2.1	Allmänt	6
2.2	Lokaler	6
2.2.1	Lokal 1 – Pomonavägen	6
2.2.1.1	Områdesbeskrivning	6
2.2.1.2	Ledningsrör	7
2.2.2	Lokal 2 – Nyhemsleden	7
2.2.2.1	Områdesbeskrivning	7
2.2.2.2	Ledningsrör	8
2.3	Geologi	8
2.3.1	Berggrund	8
2.3.2	Kvartära avlagringar	8
2.3.3	Hydrogeologi	9
<b>3</b>	<b>Fjärrvärme</b>	<b>9</b>
3.1	Introduktion	9
3.2	Fjärrvärmesystemet	9
3.3	Ledningsrör	9
3.3.1	Uppbyggnad	9
3.3.2	Värmebärare	10
3.3.3	Anläggning	10
3.3.4	Driftproblem	10
<b>4</b>	<b>Geofysiska metoder</b>	<b>12</b>
4.1	Mångkanalig markradar – MIRA	12
4.1.1	Introduktion – Radar	12
4.1.2	Allmän teori – Markradar	12
4.1.3	Geologiska aspekter och tillämpningar	14
4.1.4	MIRA	14
4.2	Resistivitet	14
4.2.1	Introduktion	14
4.2.2	Allmän teori	14
4.2.3	Geologiska aspekter och tillämpningar	15
4.2.4	Praktiskt utförande	16
4.2.5	Multielektrodmätning – CVES	17
<b>5</b>	<b>Studiemetodik</b>	<b>17</b>
5.1	Mångkanalig markradar (MIRA)	17
5.1.1	Undersökningsområde – Profiler	17
5.1.2	Utrustning och databearbetning	18
5.2	Resistivitetsmätningar (CVES)	18
5.2.1	Genomförande – Profiltlägg	18
5.2.2	Databearbetning	18
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>19</b>
6.1	Mångkanalig markradar (MIRA)	19
6.2	Resistivitetsmätningar (CVES)	20
6.2.1	Lokal 1 – Pomonavägen	20
6.2.2	Lokal 2 – Nyhemsleden	20
6.3	Resistivitetsmätningar – 3D-modeller	20
<b>7</b>	<b>Diskussion och tolkning</b>	<b>20</b>
7.1	Lokal 1 – Pomonavägen	20
7.2	Lokal 2 – Nyhemsleden	24
<b>8</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>27</b>
<b>9</b>	<b>Tackord</b>	<b>27</b>
<b>10</b>	<b>Referenser</b>	<b>27</b>
	<b>Bilaga 1: Berggrundskarta, Ängelholms stad</b>	<b>29</b>
	<b>Bilaga 2: Hydrogeologiska kartan, Ängelholms stad</b>	<b>29</b>
	<b>Bilaga 3: 3D-modeller, Lokal 1 – Pomonavägen</b>	<b>30</b>
	<b>Bilaga 4: 3D-modeller, Lokal 2 – Nyhemsleden</b>	<b>31</b>
	<b>Bilaga 5: Resistivitetsmodeller, Lokal 2 – Pomonavägen</b>	<b>32</b>
	<b>Bilaga 5: Resistivitetsmodeller, Lokal 2 – Nyhemsleden</b>	<b>32</b>
	<b>Bilaga 6: Inversionsinställningar, RES2DINV</b>	<b>33</b>

**Omslagsbild:** Fotograf från fältarbetet vid Pomonavägen, CVES-mätningar är i full gång. Foto: Anders Plan

# Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsförhöjande markegenskaper kring fjärrvärmeledningar i Ängelholm

ANDERS PLAN

Plan, A., 2016: Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsförhöjande markegenskaper kring fjärrvärmeledningar. i Ängelholm *Exsamenarbete i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 485, sid 34. 15 HP

**Sammanfattning:** Fjärrvärmeledningar vid två lokaler i Ängelholm har undersökts med två geofysiska metoder, markradar och resistivitetsundersökningar. Fjärrvärmeledningar är ständigt utsatta för påverkan av yttre faktor som t.ex. skjuvspänningar, och inre faktorer t.ex. termal expansion. Som följd av dessa faktorer förslits ledningar i varierad takt och läckage kan slutligen uppstå. Ledningsägare önskar att tekniker utvecklas för att enklare förvalta ledningsnätet (FV- och VA-ledningar). Ett tre-årigt Vinnovaprojekt startades i slutet av 2015 vars mål är att bl.a. validera och utvärdera fem olika metoder. I detta examensarbete utvärderas en av dessa metoder, vilket går ut på att korrelera två geofysiska undersökningsmetoder, markradar (GPR, *Ground Penetrating Radar*) och resistivitetsundersökningar (ERT, *Electrical Resistivity Tomography*). Det som har undersökts i denna studie är främst markförhållanden kring ledningsrör, förhållanden som kan utgöra förhöjd skaderisk för ledningarna. Här söks främst områden där jordartsövergångar påvisas. Dessa kan utgöra potentialskillnader i marken vilket kan leda initiera korrosionsprocesser. Markradar är en metod vilket ger utslag om objekt i marken innehar en god eller dålig reflektoryta. Om den elektromagnetiska pulsen dämpas, utgörs området sannolikt utav lerrika jordar. Korrelerat med resistivitetsundersökningar borde dessa zoner erhålla låg resistivitet då lerrika jordar är lågresistiva. Resultaten från de geofysiska undersökningarna har korrelerats. Utav tolkningen framgår det att jordartsövergångar inryms vid båda lokalerna, där man kunde påvisa en jordartsövergång vid vardera lokal. Detta ger en indikation att metoden fungerar för att lokalisera jordartsövergångar i relativ stor skala. Utgrävningar av lokalerna kommer att göras under ett senare skede i projektet, varvid man då erhåller ett slags ”facit” över ledningarnas tillstånd.

**Nyckelord:** resistivitet, markradar, MIRA, fjärrvärme, ledningar, korrosion, lera, markförhållanden, energi, Vinnova

**Handledare:** Torleif Dahlin, Matteo Rossi, Ulf Söderlund

**Ämnesinriktning:** Geofysik

*Anders Plan, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: plan.anders@gmail.com*

# Ground penetrating radar- and resistivity measurements – Geophysical surveys of corrosion enhancing soil properties around insulated district heating pipes

ANDERS PLAN

Plan, A., 2016: Ground penetrating radar- and resistivity measurements – a surveys of corrosion enhancing soil properties around district heating pipes in Ängelholm. *Dissertations in Geology at Lunds university*, Nr. 485, 34 pp. 15 ECTS credits.

**Abstract:** District heating pipes at two localities in Ängelholm have been investigated with two geophysical methods; ground penetrating radar (GPR) and resistivity measurements (ERT, *Electrical Resistivity Tomography*). District heating pipes are constantly exposed to the influence of external- and internal forces. As a result the pipes degrade over time, and leakage can eventually occur. Management owners have expressed a wish that techniques should be developed for easier management of the grid (DH- and sewerage pipes). A three-year Vinnova project was therefore launched in late 2015, with the aim to implement and evaluate five different methods. In this study one of these methods is evaluated, which is to correlate the two geophysical survey methods; ground penetrating radar and resistivity measurements. The rationale of this study has been to mainly examine soil conditions in areas around the pipes and to detect soil transitions zones since these constitute potential differences in the ground, which can lead to corrosion. These conditions may pose an increased risk of damage to the pipes. Ground penetrating radar is a method which provides information whether or not objects in the ground can act as a reflector. If the electromagnetic pulse is suppressed, the area can for example contain clay rich soils. Correlated with resistivity measurements these areas should obtain lower resistivity, since clay rich soils exhibit low resistance. The results of the geophysical surveys have been correlated. From the interpretation, it is clear that the soil transitions are housed in the two premises, where a soil transition in each locality could be detected. The conclusion is that this method has good potential to detect soil transitions in relative large scale. Excavations of the premises will be made at a later stage in the Vinnova project, which will provide a kind of "hindsight" of the pipes condition.

**Keywords:** resistivity, ground penetrating radar, MIRA, district heating, pipes, corrosion, clay, soil, energy, Vinnova

**Supervisor(s):** Torleif Dahlin, Matteo Rossi, Ulf Söderlund

**Subject:** Geophysics

*Anders Plan, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: plan.anders@gmail.com*

# 1 Introduktion

## 1.1 Inledning

Fjärrvärmesystem (FV) är i grunden utformat för att effektivisera våra samhällsresurser. Konceptet är enkelt. Istället för att fastighetsuppvärmning sker via enskilda, fristående pannor så distribuerar ett system värmebehovet via ett större ledningsnät. Energin erhålls ifrån olika källor vilka sammankopplas till ett system. Industriell spill- och geotermisk värme, sol- och vindenergi samt avfallsförbränning, är några exempel av energikällor som idag nyttjas (svenskfjärrvarme.se 2016). Fjärrvärmesystemet är en hörnsten i det Svenska samhället och utgör en av våra vitala infrastrukturer, vars återinvesteringsvärde uppgår till ~400 miljarder kronor (Rindelöv 2015).

Sveriges första kommunala fjärrvärmearläggning invigdes 1948 i Karlstad (karlstadsenergi.se 2016). Allt sedan dess har branschen växt, och genomgick kraftiga expansioner i samband med miljonprogrammet under 1960- och 70-talet, samt vid 70-talets oljekriser (svenskfjärrvarme.se 2016). Fjärrvärmenätet utgörs i dagsläget utav ~24 000 kilometer ledningar fördelat över 215 ägare, där 65 % är kommuner (Bernstad 2009). Energi från systemet når ut till 285 utav Sveriges 290 kommuner, samt 650 av de 900 största tätorterna. Samtaget levereras ~50 TWh, vilket värmer upp en stor del utav Sveriges alla fastigheter. 93 % går till flerfamiljsbostäder, 82 % till lokaler och 16 % till småhus (svenskfjärrvarme.se 2016).

Distributionen av energin till kunderna pågår kontinuerligt. Läckage och driftstopp är oundvikliga faktorer då ledningsrören ständigt utsätts för förslitningar av såväl yttre faktor som t.ex. skjuvspänningar, och inre faktorer t.ex. termal expansion. Statusbedömning, service, och utbyte av ledningar måste därför ständigt göras, vilket är kostsamt. Ledningsägare önskar med detta som bakgrund att tekniker utvecklas som hjälpmedel för att effektivare kunna förvalta ledningsnätet (FV- och VA-ledningar). Tekniker som kan påvisa zoner som innebär förhöjda skaderisker för ledningsrör eftersöks.

I slutet av 2015 påbörjades ett tre-årigt projekt, ”Statusbedömning och förvaltning av ledningsnät”, finansierat via Sveriges innovationsmyndighet, Vinnova. Aktörer inom olika branscher är involverade i projektet, allt från ledningsägare, kommuner, till forskare. Målet är att utveckla pålitliga-, kostnads- och tidseffektiva metoder för att motverka och förebygga driftstopp i ledningsnäten. Under projektets gång kommer fem metoder användas för att undersöka olika generationers VA- och FV-ledningar, vilka senare kommer utvärderas:

- *Metod 1 – Delta-t (akustisk metod)*
- *Metod 2 – Markradar (ledningar)*
- *Metod 3 – Markradar och resistivitets- mätningar (markförhållanden)*
- *Metod 4 – Elektrokemisk metod*
- *Metod 5 – Kamera med läckljuds-inspelning*

Schaktning och utbyte utav ledningsrör kommer att ske i omgångar längs planerade servicesträckor. Detta

medför att geofysiska undersökningar utav ledningar kan genomföras, och dessa resultat kan jämföras med observationer från schaktningen, genom korrelationen erhålls då ett slags ”facit”.

## 1.2 Syfte

Målet med denna studie är att undersöka isolerade fjärrvärmeledningar med ”Metod 3 – Markradar och resistivitetmätningar (markförhållanden)”. Projektet leds delvis utav Torleif Dahlin och Matteo Rossi på LTH (Lunds tekniska högskola), vilka även handleder detta arbete. Företaget Guideline Geo är även involverad, och står för markradarmätningar

Kandidatarbetets syfte var att utföra resistivitetsundersökningar inom två lokaler, båda belägna i Ängelholm. De undersökta strukturerna omfattar främst isolerade FV-ledningar (3:e generationens, direktskummande plastmantelrör), samt omkringliggande material. Som underlag för de geoelektriska undersökningarnas placering finns redan insamlad och bearbetad markradardata.

Data skall bearbetas och tolkas, därefter ska en diskussion föras, och slutsatser ska dras. Undersökningarna hoppas ge svar på rådande- och potentiellt skadliga markförhållanden kring de undersökta FV-ledningarna.

Undersökningar och slutsatser kommer att delvis ligga i grund för delmomentet, metod 3, inom Vinnovaprojektet.

## 1.3 Frågeställning

I kandidatarbetet har tre huvudsakliga frågeställningar formulerats:

- Kan man inom lokalerna påvisa potentiellt skadliga markförhållanden för fjärrvärmeledningarna genom att kombinera GPR- och ERT-mätningar ?
- Är det möjligt att identifiera jordartsövergångar inom lokalerna, utifrån insamlad data?
- Kan den valda profilkonfigurationen för resistivitetmätningar erbjuda kvalitativ data mot projektets mål?

## 1.4 Avgränsningar

På grund av det ringa tidsspannet måste avgränsningar göras. Markradardata kommer i första hand användas som underlagsinformation, medan projektets fokus inriktas mot resistivitetsundersökningar.

Kandidatarbetet berör olika discipliner och branscher, men inriktar sig främst mot geologi, geofysik samt energi och samhälle. Kandidatarbetets innehåll riktas mot samtliga involverade aktörer inom Vinnovaprojektet. Då aktörerna är spridda över olika branscher, med skilda kompetenser, valdes det att författa kapitel så att oinvidga läsare kan bilda en uppfattning och ta del utav slutsatser och resultat. Teorin bakom markradar och resistivitetsundersökningar redogörs något

ingående. En kortfattad introduktion till fjärrvärme ges även.

## 2 Bakgrund

Två lokaler har undersökts. Båda belägna inom Ängelholms kommun i NV Skåne (Figur 3). I kapitlet presenteras lokalerna i sig, de rådande geologiska- och hydrogeologiska förhållandena samt ledningsinformation.

Information om jorddjup och hydrogeologiska förhållanden har delvis hämtas från SGUs databaser, brunnarkivet och kartgeneratoren.

### 2.1 Allmänt

Vetskap om undersökningsområdets geologiska förhållanden är väsentligt när man utför geofysiska undersökningar och tolkar erhållna data. En god geologisk uppfattning om undersökningsområdena förenklar tolkningar då man stödjer sig på geologiskt rimliga modeller.

Värt att ha i åtanke är att de båda lokalerna befinner sig i urban miljö, och därför är det rimligt att anta att jordlagrens översta skikt har utsatts för någon form av antropogen påverkan. Vid anläggning av vägar och byggnader, samt vid ledningsdragningar utförs olika marktekniska ingrepp. Exempelvis schaktas jordmassor upp och installationer omgärdas av varierande byggnadsmaterial enligt rådande praxis. När arbetet är slutfört återfylls utgrävningsområdet. Informationen är även väsentlig då yttre faktorerna främst orsakar förslitning och skador på ledningsrör. Sediments vattenmättnadsgrad och lerhalt samt jordartsövergångar är bara några nämnvärda faktorer.

### 2.2 Lokaler

Ledningsrörsinformation är baserad från muntlig- och skriftlig kommunikation med Tony Boman (2016), projektledare på Öresundskraft AB. Bolaget är ledningsägarna inom de båda undersökta lokalerna. Innan fältarbetet inleddes hade Öresundskraft AB GPS-punktade ut ledningsgravens mitt. Utifrån dessa markeringar lades sedan ERT-profilerna. Profilutläggningar inom områdena består av fem profiler i vardera lokal (Figur 1, markeringar px, Figur 2 markeringar nx). Profillängd: 41 m, med 1 m avstånd mellan profilerna (utmärkta i Figur 3). Samtaget resulterar det i ett 205 m<sup>2</sup> stort undersökningsområde för ERT-undersökningarna, per lokal.

#### 2.2.1 Lokal 1 – Pomonavägen

##### 2.2.1.1. Områdesbeskrivning

Lokalen är belägen något norr om Ängelholms stad, vid Luntertun (Figur 3). Området omges utav tre vägar, Persikovägen, Varvsvägen samt Kungsgårdsleden. Den sistnämnda vägen är tungt trafikerad, och antas därmed att vägsalter här kan infiltrera i större grad. Marken anses tidigare ha brukats för jordbruk, men saknar i dagsläget någon direkt användning. Markytan är plan och är fri från topografiska skillnader. Sluttar dock flackt mot SÖ (22 – 21 m.ö.h. från NV till SÖ), varav antagandet görs att ytvattenström-



Fig. 1. Lokal 1, Pomonavägen. Fem ERT-profiler är utmärkade, p1 – p5. Dessa är 41 meter långa vardera, och har 1 meter avstånd mellan varandra. Foto och illustration: Anders Plan, 2016.



Fig. 2. Lokal 2, Nyhemsleden. Fem ERT-profiler är utmärkade, n1 – n5. Dessa är 41 meter långa vardera, och har 1 meter avstånd mellan varandra. Foto och illustration: Anders

riktningen följer gradienten.

Elektrodena kunde med enkelhet föras ned 2–3 dm i marken, vilket tyder på att jordlagrens ytskikt består utav finkorniga, sorterade sediment. Okulärt bekräftades silt till finkornig sand och även lera. Detta stödjer delvis SGUs jordartskarta (Figur 4) även om området redovisas här som lerfritt. Ett mäktigt lerfält breder ut sig ~500 m öster om lokalen (Figur 4). Lokalen domineras utav postglacial grovsilt till finsand. Omkring 100 m från lokalen påträffas isälvssediment i grusfraktion. Dessa ser ut att höra samman med den ås som skärs itu utav Rössjöholmsås, för att sedan löpa vidare längst Skäldervikens kustområden. Kringområden vittnar om en varierad jordmäktighet. Omkring 500 m norr om lokalen, vid Bjälleruds källor (Brunns-id 32300012) är jordlagret magert, endast 14 m. Varierande jordmäktigheter påträffas S och Ö från lokalen. Fastigheten Rebbelberga 8:25 (Brunns-id 32300004) påvisar endast ett 12 m jordlager. 1 km SV om fastigheten uppgår jordlagren till 113 m (brunns-id 32300093). Djupvariationen antas ha koppling till den spröda deformationszonen, tillhörande Sorgenfri-Tornquistzonen, vilket skär diagonal genom lokalen (SGU 2016, bilaga 1). Vattenuttagningsmöjligheterna





Fig. 3. Översiktsfigur över de båda undersökningsområdena. Lokal 1, Pomonavägen är beläget något norr om Ängelholms centrum. Lokal 2, Nyhemsleden ligger några hundra meter öster om centrum. På de bägge lokalerna har GPR- (grön zon) och ERT-mätningar (röd zon) plottats in, även partier av FV-ledningarna (grön zon). Infogas även ERT-profilernas utläggningsläge inom lokalerna. I diagrammet kan GPS-kordinater utläsas i sweref 99 TM format. Bilder hämtat från © Lantmäteriet 2016, © Wikimedia 2016. Illustration: Anders Plan, 2016.

från brunnar i nära anslutning uppgår till mellan några tusen l/h och uppemot 25 000 l/h.

### 2.2.1.2 Ledningsrör

Information om ledningsrören är mager p.g.a. åldern. Enligt dokumentation från ABB anlades rören 1997 på ett djup av  $\sim 1$  m. Det rör sig om två enkelrör, ett framledningsrör och ett returrör. Rörklass DN200 ( $\varnothing$  219,1 4,5 mm), inkluderat med det omslutande höljet uppgår diametern till 355 mm (Isolerings klass: serie 2) (Fredriksen & Werner 2014). Ledningarnas uppbyggnad tros vara i likhet med dagens standard, direktskummande plastmantelrör (se kapitel 3).

## 2.2.2 Lokal 2 – Nyhemsleden

### 2.2.2.1 Områdesbeskrivning

Lokal 2 är lokaliserad i nära anslutning till Ängelholms centrum, ca 700 m österut från stadens centrum (Figur 3). Lokalen omges av bostadshus, och inryms i ett parkliknande flackt grönområde (Figur 2). Ledningsrören löper längs en cykelväg, samt ett vattenfylt

dike. Omkring 100 m i NÖ-riktning från platsen meandrar sig Rönne å genom staden. I nära anslutning till ån har SGU karterat svämsediment, bestående utav sand, vilka är de avsättningar som påträffas inom lokalen (Figur 4). Omkring 100 – 150 m från lokalen har SGU karterat postglacial grovsilt till sand, samt ett mindre lerbält (Figur 4). I likhet med lokal 1 var elektroder enkla att föra ned i marken, med undantag i profilernas mitt och vidare i NÖ riktning. Svårigheterna tros bero på trädrötter. Okulärt bekräftades även lera i markens ytskikt.

Kringområden uppvisar ett jorddjup om 60 – 100 m. Uttagskapaciteterna är små, mellan 3600 l/h (Brunns-id 32300926) och 4500 l/h (Brunns-id 32300201) i nära anslutning till undersökningsområdet. Topografiska skillnader utläst från *Google Earth* indikerar att undersökningsområdet är belägen i en svacka, där kringområden infinns på  $\sim 6$  –  $\sim 10$  m.ö.h. Tagna GPS-punkter i fält visar att området är beläget  $\sim 2,5$  m.ö.h. vid profilernas startpunkter i SV, och slutpunkterna i NÖ är lokaliserade  $\sim 3,2$  m.ö.h.

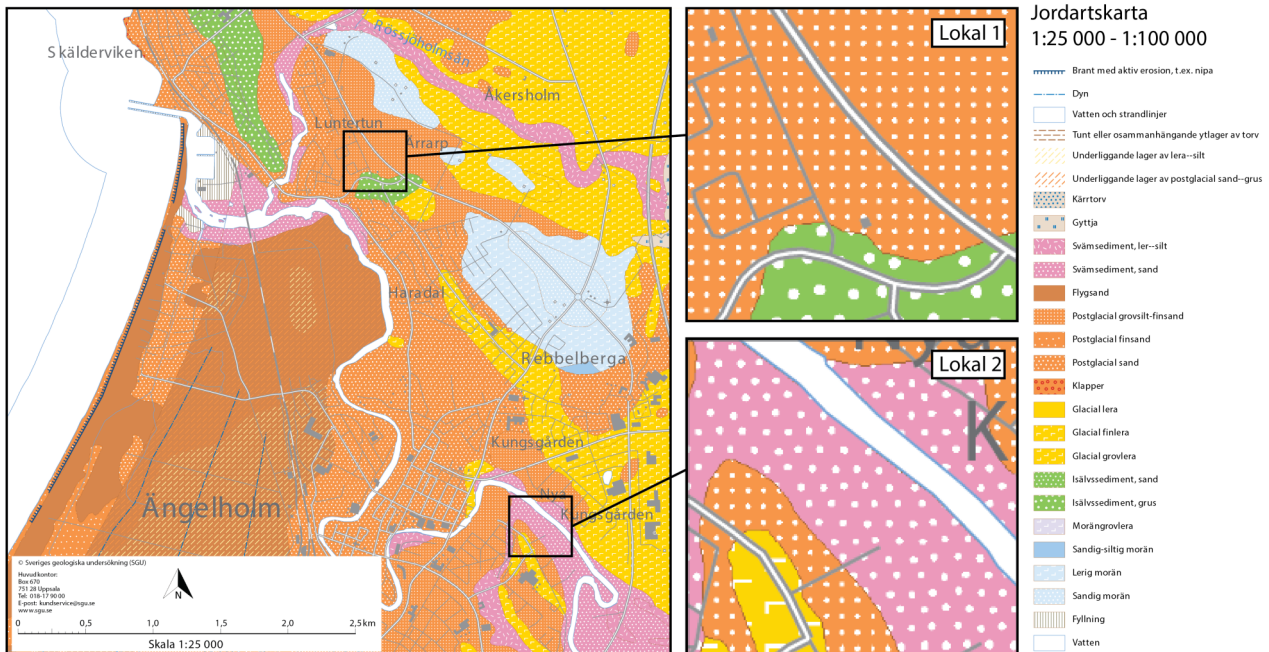


Fig. 4. Jordartskarta över Ängelholms stad, med förstoringar över lokalerna. I lokal 1 dominerar postglaciala avsättningar utav silt och finsand. Lokal 2 utgörs av svämsediment bestående av sand från Rönne å. Modifierad efter © SGU 2016.

Antas därmed att ytvatten leds in mot svackan.

#### 2.2.2.2 Ledningsrör

I likhet med lokal 1 är informationen mager, men enligt ABBs dokumentation anlades rören 1980. Antaget anläggningsdjup är ca 1 m. Rörklass DN350 ( $\varnothing$  355,6 5,6 mm), inkluderat med det omslutande höljat uppgår diametern till 500 mm (Isolerings klass: serie 1) (Fredriksen & Werner 2014). Två enkelrör är här anlagda, ett framledningsrör samt ett returrör. Returröret är anlagt närmast cykelvägen (SÖ om ledningsmarkering, Figur 3). Ledningsrören tros vara uppbyggd likt dagens direktskummande plasmantelrör (se kapitel 3). Skumisoleringen kan eventuellt utgöras av andra komponenter. Skarvlängder är inte dokumenterade, tros dock vara 12 m eller 16 m skarvlängder. Skarvhylsor (muffar) är troligtvis metalhylsor fyllt med PUR-skum (polyuretanplast).

### 2.3 Geologi

Endast en kortfattad berggrundsgeologisk beskrivning redogörs. Detaljerad information uteblir p.g.a. jordlagrets mäktighet, vilket överstiger +10 m inom de båda lokalerna. Med vald profilkonfiguration för ERT när mätningarna ett praktiskt nedträngningsdjup av ~7,4 m. Berggrunden kommer därmed inte påverka undersökningarna i någon större utsträckning.

#### 2.3.1 Berggrund

Berggrunden inom Ängelholms kommun utgörs av den sydvästsvenska gnejsregionen, även kallad den Svekonorvegiska provinsen (Norling & Wikman 1990). Namnet är taget från orogenesisen av samma namn, vars bildning påbörjades för ~1,15 Ga sedan (Lundqvist et al. 2011). Provinsen utgörs bl.a. av sydväst-Sveriges Prekambriska berggrund och domineras av ca 1.7–0.9 Ga gnejser och granitiska bergarter. Geologin är tämligen komplex då området vid åtskil-

liga tillfällen utsatts för omfattande tektoniska händelser och kontinent-kontinent kollisioner (Lundqvist et al. 2011). I söder (bl.a. Skåne) är den kristallina berggrunden nedsänkt och överlagras av fanerozoiska sedimentära bergarter som, kalksten- och kvarts- och fältspatrika sandstenar (bilaga 1). Dess litologiska karaktär i området för denna studie utgörs till mestadels av ler- och sandstens facies vilka växellagras om vartannat (Norling & Wikman, 1990).

Ett spricksystem vilket till stor del präglar Skånes topografi, är den så kallade Sorgenfri-Tornquistzonen (STZ). Zonen sträcker sig från Skageraks hav ner mot Donau vid Svarta havet (Andreasson 2006). Likt ett 100 km brett ”ärr” skär den igenom den Skånska berggrunden diagonalt, i nordväst-sydöstlig riktning. Zonen består av ett rikt sprick- och förkastningssystem vilket utgör en av Europas större deformationszoner. I den sprickrika urberggrunden förekommer bl.a gångbergarten diabas, och ställvisa stråk av amfibolit påträffas (Muller 2010).

Som följd av STZ kan åtskilliga förkastningsområden skådas inom det Skånska landskapet. Horstar och gravsänkor bildar här topografiska skiljemönster. Ängelholmstråget är en av dessa. Sänkan avgränsas utav Hallandsåsen i NÖ och Söderåsen i SV. Tråget utgör i dag den slättmarken som Ängelholms stad vilar sig på.

#### 2.3.2 Kwartära avlagringar

Berggrunden överlagras av ett jordtäckte vars mäktighet uppgår till 40 – 110 meter (Jorddjupskarta, SGUs kartgenerator 2016, Esko 1978). Sänkan utgörs av ett karaktäristiskt slättlandskap, vilket uteslutande består av åker- och betesmarker. Sänkan stupar i V-SV riktning från Hallandsåsen. Google Earth uppvisar att topografin uppgår emot 150 m.ö.h närmast horsten, för att sedan flacka ut mot Skälderviken (0 m.ö.h).

En komplexa kvartär stratigrafi framträder inom Ängelholmsänkan (Esko 1978). Variationsrikedomen är stor även i lateralled (Figur 4). Lera är i särklass det dominerande sedimentet. Tunna stråk av grövre fraktioner och moräner uppträder dock ställvis inom lagret (Esko 1978). Leran pålagras utav diverse grövre sediment innehållande varierad sorteringsgrad. Postglacial svallsand och flygsand med dynbildningar påträffas likt ett tunt ytskikt längs Skäldervikens kust. Även områden av klapper förekommer. Undertill vilar ett moränlager vilket tros tillhöra de komplexa ändmoräner som påträffas mellan Västra Ljungby och Ängelholm (Esko 1978). Öster, in mot landet dominerar återigen lera. Leriga moräner uppträder ytligt vid stadens norra områden. Partier av svämsediment och gytta förekommer främst i anknytning till Rönne å och Rössjöholmsån.

### 2.3.3 Hydrogeologi

Majoriteten av grundvattentillgångarna förekommer i de kvartära avlagringarna, främst isälvsavlagringar som åsrygg (Muller 2010). Ängelholms huvudvattentäkt befinner sig i anslutning mot Hallandsåsen, kring Rössjön. Nio av de tio största grundvattenförekomsterna finns i nära anslutning till sjöns utlopp, Rössjöholmsån (Muller 2010). Ån meandrar sig nedåt, genom Ängelholms stad än Skälderviken. Uttagningsmätt om fåtalet liter per sekund, uppemot 50 l/s har dokumenterats (Muller 2010).

Den sprickfrekventa berggrunden inom området ger förhöjda uttagningsmöjligheter sett till övriga delar i Sverige (Muller 2010). Bergsbrunnar vittnar kapaciteter mellan 600 – 60 000 l/h. Den sedimentära berggrunden i kommunens SV delar är här mer potent, uttagmässigt sett, än den kristallina urberggrunden i NÖ (Muller 2010).

Grundvattnets strömriktning följer till största delsänkans markgradienten, d.v.s. V-SV riktning. En rörlig vattendelare finns norr om Ärrarp, vilket riktar flödet motsatt, i SÖ- riktning (bilaga 2).

Då kommunens landyta huvudsakligen utgörs av jordbruksmark har detta medfört förhöjda halter av föroreningar i yt- och grundvatten. Anmärkningsvärda koncentrationer utav fosfor, kväve, ammoniak samt pesticider har påträffats inom kommunen (Reiter 2007).

## 3 Fjärrvärme

För mer ingående information om fjärrvärmesystemet och dess tekniska aspekter rekommenderas: Fjärrvärme och fjärrkyla av Fredriksen & Werner (2014).

### 3.1 Introduktion

Fjärrvärmens grundidé har anor från Romarriket, där man ledde uppvärmt vatten vidare via kanaler och ledningar längs stadsgator (Fredriksen & Werner 2014). Industriell fjärrvärme utvecklades under 1800-talets slut, och såg dagens ljus vid invigningen 1882 av Manhattans ångsystem (Fredriksen & Werner 2014). Sedan dessa har tekniken expanderat globalt, och FV-nätverk finns i så gott som samtliga länder inom norra

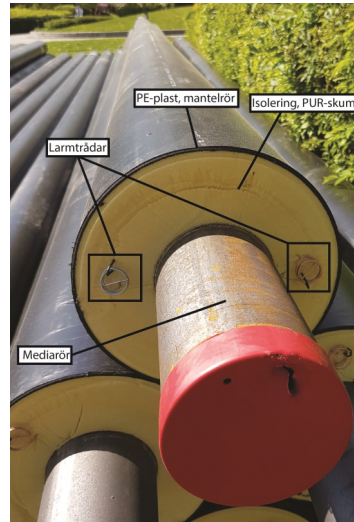


Fig. 5. Figuren åskådliggör tredje generationens FV-ledningars inre uppbyggnad. Yttersta höljet utgörs av mantelröret i PE-plast. Sedan följer isolering av PUR-skum, vilket omgärdar mediaröret av kolstål. Larmtrådar är dragna i isoleringen. Foto och illustration: Anders Plan 2016.

halvklotet. I dagsläget är omkring 5000 fjärrvärmesystem i drift, enbart inom EU (Fredriksen & Werner, 2014).

### 3.2 Fjärrvärmesystemet

Fjärrvärmesystemet är uppbyggt, något förenklat beskrivet, utav tre huvudsakliga komponenter, nämligen produktionsanläggningar, distributionsledningar samt fjärrvärmecentralen (Johansson 2007). Distributionsledningar, även kallat Fjärrvärmeledningar (FV-ledningar), innefattar ett framledningsrör samt ett returrör. Ledningsrören anläggs uteslutande under markytan, och löper parallellt med varandra. I dessa flödar värmemediet, kallat värmebäraren. I Sverige består värmebäraren utav avjoniserat vatten, vilket hettas upp till cirka 70 – 120 °C i produktionsanläggningar (svenskfjarrvarme.se 2016). Via framledningsröret leds värmebäraren mot slutdestination, fjärrvärmecentralen, vilken ofta inryms i slutkundens fastighet. En värmeväxlare fördelar här energin/värmen till de inkopplade enheterna i fastigheten. Värmebäraren återvänds sedan vidare mot produktionsanläggningen via returröret, nu i temperaturer omkring 40 – 50 °C (svenskfjarrvarme.se 2016). Cirkulationen fortlöper sedan i systemet.

### 3.3 Ledningsrör

#### 3.3.1 Uppbyggnad

Fjärrvärme och dess kringkomponenter har under driftåren genomgått flera tekniska förändringar, vilket har lett fram till den tredje generationens FV-ledningar, direktskummande plastmantelrör. Dessa ledningar introducerades under 1960-talet och har sedan dess dominerat marknaden (Fredriksen & Werner 2014).

Figur 5 åskådliggör uppbyggnaden av 3:e generationens FV-ledningar. Ytterst utgörs ledningen av ett hölje, ett mantelrör i polyetenplast (PE). Undertill följer skumisolering utav polyuretanplast (PUR-skum), vilket omsluter ett kolstål, mediaröret (Fredriksen & Werner 2014). Mediarör i andra utföranden finns på marknaden t.ex. i koppar och plast, dessa utgör dock endast en liten del av marknaden. Koppartrådar löper längs mediaröret i skumisoleringen, dessa fungerar som larm vilket kontinuerligt bevakar ledningars fuktighetshalt. Styva och flexibla ledningar i längder om

6, 12, 16 och 18 meter är standard (Fredriksen & Werner 2014). Ledningsdimensioner finns i utföranden:  $\varnothing 90 \text{ mm}$  (DN20) –  $\varnothing 1200 \text{ mm}$  (DN1000) (Fredriksen & Werner 2014). Valet av dimension styrs till största dels av systemets kapacitet, men även markförhållander och omgivande klimatet kan spela in. PUR-skum som ledningsisolering introducerades under 1960-talet, och kom under 1990-talet att nästintill helt att dominera marknaden (Fredriksen & Werner 2014). Fördelarna som skummet erhåller är dess goda lastbärande egenskaper samt att PUR innehar en låg värmekoduktivitet (Sjökvist et.al 2012). Isoleringens hålrum, cellerna, upptas av fyllnadsgas, vilken ytterligare förbättrar ledningens isolatoriska förmåga (Sjökvist et al. 2012). Vedertaget används idag en blandning utav cyclopentane ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ ) och koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) som fyllnadsgas (Sjökvist et.al 2012). Dessa gaser har  $\sim 50\%$  lägre värmekoduktivitet sett till luft.

Vid anläggning skarvsvetsas mediarrören samman. Därefter försluts de blottade skarvarna med en yttermantelskarv, en så kallad muff (t.ex. svetsmuff och krympmuff) (Fredriksen & Werner 2014). Muffarna förekommer i en mängd olika utföranden och prisklasser, vilka i sig har både för- och nackdelar (Fredriksen & Werner 2014).

### 3.3.2 Värmebärare

Värmebäraren är det medium som transporterar energin i FV-systemet. I Sverige agerar avjoniserat vatten värmebäraren. Vanligt annars är att ånga agerar värmebärare, vilket dominerar b.l.a. den Amerikanska marknaden. I produktionsanläggningar hettas värmebäraren upp till  $70 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$ , beroende på klimat och säsong (sommars & vinter). Innan vatten får agera värmebärare måste vissa kriterier uppfyllas, detta för att förebygga inre korrosionsangrepp. Gynnsamma förhållanden uppnås om vattnet har låg syrehalt (under  $10 \mu\text{g/kg}$ ), innehar basiskt pH-värde ( $9,5 - 10$ ) samt är lågkonduktivt, d.v.s. avjonat (Svensk fjärrvärme 2012). Vid ledningsläckage kan det medföra att värmebärarens vattenkemi förändras varvid korrosionsangrepp ökar, vilket i slutändan kan leda till utmattningsbrott med driftstopp som följd.

Om vattenförlust sker i systemet tillsätts så kallat, spädvatten. Vid påfyllning av spädvatten kan syre introduceras, mängden syre beror på spädvattnets avgasningsgrad (svenskfjarrvarme.se 2016). Vid låg avgasning förhöjs angreppsrisken för invändig korrosion då gaser introduceras i systemet (Rindelöv 2015).

Färgämnet pyranin tillsätts i fjärrvärmevattnet, vilket ger den dess gröna karaktäristiska färg. Detta görs för att läckage, eller felkopplingar enklare ska kunna detekteras. Ämnet är ett luktfritt natriumsalt vilket har fluorescerande egenskaper, och framträder därmed i UV-ljus (luleaenergi.se 2016). Ämnet är ofarligt och är livsmedelsklassat, förekommer i b.l.a. tvål och diskmedel (luleaenergi.se 2016).

### 3.3.3 Anläggning

Detta kapitel är baserat från "Läggingsanvisningar för fjärrvärme- och fjärrkylledning", Tekniska bestämmelser (D:211), av Svenska fjärrvärme (2012). Fjärrvärmeledningar kan dras ovan jord, men anläggs uteslutande under markytan av praktiska- och isolato-

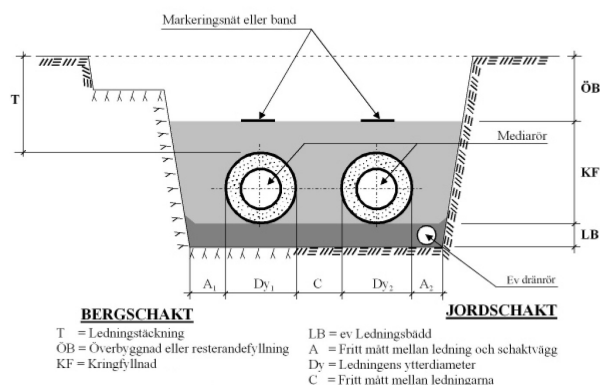


Fig. 6. Illustration vilket uppvisar hur FV-ledningar anläggs i berg- respektive jordschakt. Svensk fjärrvärme, 2012. Återgiven med tillstånd.

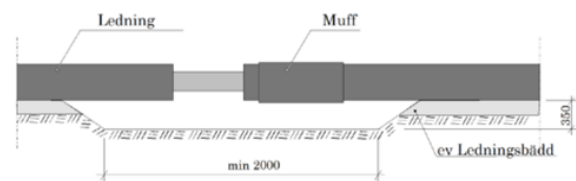


Fig. 7. Illustration utav en FV-lednings muff. Enligt statistik är muffen den komponent som är ledningsrörets svaghetspunkt, då de flesta skador inträffar här. Svensk fjärrvärme, 2012. Återgiven med tillstånd.

riska skäl. Vid anläggning schaktas en ledningsgrav ut. Gravens utförande skiljer sig beroende på om anläggningen sker i berggrund eller lösa avlagringar (Figur 6). För att uppnå gynnsamma förhållanden för ledningsrören görs diverse marktekniska ingrepp. Rörens undergrund, ledningsbädden (Figur 6, LB), skall bearbetas och täckas så att en väl fungerande, naturlig dränering finns. Oftast överlagras krossmaterial utav sorterad sand. I ledningsbädden kan även ett dräneringsrör anläggas, för att ytterligare förbättra dräneringen. Sand, och/eller grövre fraktioner packas och omger ledningsrören, dessa utgör den så kallade kringfyllnaden (Figur 6, KF). Kringfyllnaden ska uppfylla vissa kriterier: Kornstorlek får inte överstiga  $35 \text{ mm}$ , och får enbart utgöras av friktionsjord, d.v.s. sediment vars skjuvhållfasthet huvudsakligen byggs upp av kornens friktionskrafter (ne.se 2016). Fyllnaden ska också vara fri från humus, lera och silt. Detta för att b.l.a. undvika markkemiska förändringar (t.ex. pH), att marksättningar kan uppstå. Resterande material, pålagringsfyllnad (Figur 6, ÖB) ska utgöras av material i nära överensstämmelse med den ursprungliga lagerföljden, ledningsgravens schaktmassor används därmed. Något vedertaget begravningsdjup (Figur 6, T) för fjärrvärmeledningar existerar således inte. Vanligt begravningsdjup brukar vara mellan  $0,5 - 1,5 \text{ m}$ . Viktig är dock att ledningarna är belägna ovan grundvattennivå, och under tjälgränsen.

### 3.3.4 Driftproblem

Ledningsrör är under ständig påverkan av såväl yttre som inre förhållanden. Termal expansion från värmebäraren, vibrationer, skjuspänningar och korrosion är exempel av förekommande stressmoment. Följden blir

att rörens livlängden påverkas. Ett materials livlängd beräknas i cyklar, vilket är ett hållfasthetsbegrepp för att beskriva de antal cykliska belastningar som ett material står emot innan ett utmattningsbrott uppstår (ne.se 2016).

Styva mediarör är vanligast i Sverige. Tillverkas till största delen utav kolstål, i dimensioner om  $\varnothing 26,9 \cdot 2,6 \text{ mm}$  (DN20) till  $\varnothing 1016 \cdot 10 \text{ mm}$  (DN1000) (Fredriksen & Werner 2014). Kolstål kan jämföras med konstruktionsstål. Varierad statistik förekommer över konstruktionsståls livslängd. Överlag uppskattas det att stålet klarar av 10 000 cykler innan ett brott inträffar (Fredriksen & Werner 2014). En cykel motsvarar här ungefär 1 driftdag, med förutsättningen att värmebäraren håller en temperatur kring  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uppskattad livslängd blir då  $\sim 30$  år. För tredje generationens fjärrvärmeledningar är detta också den vedertagna livlängden. Vid lägre drifttemperaturer förlängs livslängden, 40 år uppskattas i den Nord Amerikanska marknaden (Fredriksen & Werner 2014). Om ledningar skadas, anläggs eller monteras felaktigt kan det leda till en negativ påverkan av deras livslängd.

I äldre grå- och segjärnsledningar (VA- och FV-ledningar) utgör korrosionsangrepp den övervägande skaderisken. Korrosion är således även den största skaderisken i tredje generationens FV-ledningar (Fredriksen & Werner 2014). Om än inte i samma utsträckning då mantelröret och isoleringen skyddar mediaröret mot korrosionsangrepp. Svensk och Tysk skadestatistik påvisar att muffar (Figur 7) är fjärrvärmesystemets svagaste länk (Fredriksen & Werner 2014). Skadetrenden för muffar har dock ständigt avtagit sedan 90-talets mitt. Monteringsutförande, typ av material samt yttre faktorer (t.ex. sediments vattenmättnad och kornfraktion, temperaturväxlingar, tung trafik och markrörelser) påverkar muffarnas prestation. Över tid kan försvagningar uppstå i såväl svets skarvar som ytterhöljet, och dess fogar. Följden blir att mediaröret exponeras för yttre faktorer, och kan därmed utsättas för korrosionsangrepp. Olika typer av korrosion existerar. Dessa identifieras genom de element som ingår i processerna. Två typer av korrosion sker uteslutande på FV-ledningar: Allmän korrosion och lokal korrosion (Rindelöv 2015).

Med allmän korrosion menas att angreppet sker likformigt över en sammanhängande yta, vilken täcks av en elektrolyt (Rindelöv 2015). Allmän korrosion sker via elektrokemiska processer, och kan initieras vid närvaro av en galvanisk cell. För processen krävs en anod, en katod samt en elektrolyt. Mediaröret består oftast av legering kolstål, vars beståndsdelar utgörs till största delen utav kol och järn. Kombinerat kan dessa bilda den galvaniska cellen. I cellen oxideras (anod) ett ämne, medan ett ämne reduceras (katod). Kolet agerar katod, och järnet bildar anoden. Följden blir bildningen av järnjoner, och järnet börjar att successivt oxideras enligt (Aastrup et al. 1990):

Om syrehalten (elektrolyten) ständigt närvarar kan oxidationen fortlöpa och slutligen bildas hematit

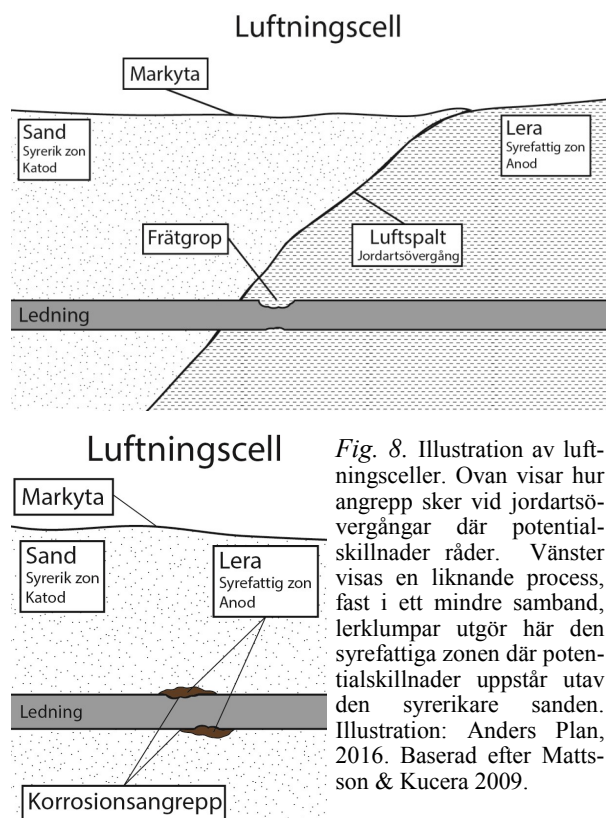
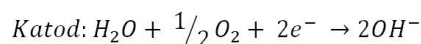
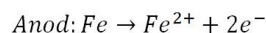


Fig. 8. Illustration av luftningsceller. Ovan visar hur angrepp sker vid jordartsövergångar där potentialskillnader råder. Väster visas en liknande process, fast i ett mindre samband, lerklumpar utgör här den syrefattiga zonen där potentialskillnader uppstår utav den syrerikare sanden. Illustration: Anders Plan, 2016. Baserad efter Mattsson & Kucera 2009.



( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), även kallad rödrost (Rindelöv 2015). Vid låga syrehalter bildas magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), även kallad svartrost.

Över tid bildas en magnetitfilm i ledningars inre yta, detta p.g.a. att värmebäraren avgasas innan den introduceras i systemet, varvid syrehalten reduceras. Magnetitfilmen agerar här, paradoxalt som ett skydd mot lokal korrosion, vilket är ett aggressivare angrepp sett mot allmän korrosion (Tarkpea 1997). Punktangrepp (gropkorrosion) kan då ske vid zoner där filmen är som svagast, t.ex. vid svetsfogar. Likvärdigt gäller för det yttre oxidskiktet (Bjurström 2000).

Allmän korrosion har långsam korrosionshastighet då angreppet sker likvärdigt över en yta. Lokal korrosion är betydligt aggressivare. Risken för läckage förhöjs avsevärt om ledningsrör utsätts för detta angrepp (Rindelöv 2015). Lokal korrosion kan uppstå vid jordartsövergångar, här kan potentialskillnader i mark uppstå vilket kan initiera korrosionsprocesser. Syrgashalt och sedimentens permeabilitet spelar här in. Pondera att ledningar anläggs, och omgärdas utav enskilda jordartslager bestående av sand och lera. Jordartsövergången bildar då en så kallad luftningscell (Figur 8, överst) (Mattsson & Kucera 2009). Detta eftersom sand har en högre permeabilitet sett mot lera. Potentialskillnader uppstår då sandlagret är syrerikt och lerlagret syrefattigt. Sandlagret utgör då katoden medan lerlagret bildar anoden (Bjurström 2000). Syre agerar oftast även här elektrolyt.

Luftningsceller kan även uppstå i mindre skala, under liknande förutsättningar. Om kringfyllnaden och/eller fyllnadsmassor innehåller lerklumpar kan potentialskillnader även här uppstå varpå rören kan utsättas för angrepp (Figur 8, vänster) (Mattsson & Kucera 2009).

Andra typer utav korrosionsangrepp förekommer på FV-ledningar. Samtaget är dock förloppet det samma, ett utmattningsbrott sker varpå röret börjar läcka. När väl ett läckage uppstår i systemet accelereras angreppsförloppet då ovälkomena komponenter introduceras i systemet och vattenkemin förändras. Ridelöv (2015) identifierar två typer utav läckage: Inläckage av markvatten utifrån, samt utläckage av fjärrvärmevatten till isoleringen. Inläckage är här vanligast. I och med detta kan t.ex. syrgashalten förhöjas i systemet, varpå korrosionsprocesser kan initieras och/eller accelereras. Vid utläckages av fjärrvärmevatten försämras ledningens isolatoriska förmåga. Följden blir att energin lämnar systemet p.g.a. den bristande isoleringen, korrosionsrisken förhöjs även. Vid förlust av värmebäraren i systemet, fylls kvoten upp med spädvatten (Fredriksen & Werner 2014). Om spädvattnet, inte är tillräckligt avgasat förändras systemets vattenkemi varvid korrosionsrisken ökar (Fredriksen & Werner 2014).

I studien undersöks markförhållanden som kan leda till initierande och accelererade korrosionsangrepp. Undersökningen inriktar sig därmed på att främst finna: lera, jordartsövergångar, vattenmättat sediment.

## 4 Geofysisk metodik

### 4.1 Mångkanalig markradar – MIRA

För läsare som önskas mer utförliga fakta om GPR-tekniken rekommenderas *An introduction to applied and environmental geophysics* av J.M. Reynolds. Mer information om MIRA hittas på malags.com (2016).

#### 4.1.1 Introduktion – Radar

Radar, en akronym från engelskan *Radio Detecting And Ranging*. Tekniken utvecklades under tidigt 1900-tal i Tyskland, främst med avseende på att detektera båtar under ofördelaktiga väderförhållanden. De första moderna radartekniker såg dagens ljus under 1930-talets mitt då man lyckades visualisera radarekon på bildskärmar. Militären uppmärksammade tekniken och började bruka den mer frekvent under andra världskriget (ne.se 2016). I dagsläget är radar en välutvecklad och utbred teknik vars användningsområden finns inom såväl militära- och civila samband. Konventionell radar använder radiovågor för att erhålla information.

#### 4.1.2 Allmän teori – Markradar

Teorin bakom markradar, GPR (*Ground Penetrating Radar*), har varit känd sedan 1910. Men det var först under 1970-talet som undersökningsmetod introducerades (Ellis 2003). Markradar är en reflektionsmetod där man utnyttjar elektromagnetiska (EM) pulser



Fig. 9. Principiella tillvägagångssätt för att samla in markradardata. geo-analysis.com, 2016. Återgivet med tillstånd.

egenskaper och uppträdande i olika medium (Jeppsson 2016). Förenklat sett så mäts tidsdifferensen mellan utsändandet och mottagandet utav pulser, och den EM-pulsens signalstyrka. Arbetsmetodik är snabb och tillförlitlig. Oftast framförs radarenheten monterat på ett fordon, men man kan även via manskraft föra enheten längs med profiler (Figur 9). Data kan behandlas och visualiseras på olika sätt, vanligt är i ett radargram (Figur 9), vilket ses som vertikal profil. Data kan även redovisas som skiktbilder, där bilder uppvisar data från specifika, angivna markdjup. Georadar är främst anpassat till att detektera strukturer och material under markytan.

Ovan ses en principiell illustration (Figur 9) över en georadarinsamling, läsare hänvisas i löptexten nedan till denna.

Vid Georadarmätningar förs radarenheten över undersökningsytan varvid pulser transmitteras från enhetens antenn ( $T_x$ ) inom givna tidsintervall. Radarpulsens hastighet,  $v$ , i vakuum är likvärdigt med ljusets hastighet,  $c = 300\,000\text{ km/s}$ . Dock varierar pulsens hastighet beroende på mediets specifika materialegenskaper (Jeppsson 2016):

$$\text{Elektrisk permittivitet} - \epsilon$$

Där  $\epsilon$ , elektrisk permittivitet är en storhet vilken beskriver polariseringsförmågan hos ett specifikt medium (ne.se 2016).

$$\text{Magnetisk permeabilitet} - \mu$$

Magnetisk permeabilitet,  $\mu$ , avser ett mediums kapacitet att upprätthålla ett magnetfält, vars potens erhålls utav kvoten mellan dess magnetiska fältstyrka,  $H$ , och magnetiska flödestäthet,  $B$ , (ne.se 2016). Vid geologiska undersökning förutsätter man att  $\mu_r = 1$  (relativa magnetiska permeabilitet), eftersom denna faktor är relativt oföränderlig inom disciplinens material

Tabell. 1. Elektromagnetisk pulsens hastighet i utvalda material. Tabell baserad efter Jepsson (2016).

Medium	Relativ permittivitet ( $\epsilon_r$ )	Hastighet (v, m/ $\mu$ s)
Luft/Vakuum	1	300
Is	3-4	150-170
Vatten	81	33
Torr sand, grus	3-5	130-170
Våt sand, grus	10-30	55-95
Vattenmättad lera	5-40	50-135
Urberg	4-8	100-150
Torv	60-80	30-40

(Jepsson 2016). Detta medför att den elektromagnetiska pulsens hastighetsekvation kan förenklas:

Ekvation 3.1

$$v = c \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \rightarrow v \approx c \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$c$  = Ljusets hastighet i vakuum.

$v$  = Utbredningshastighet.

$\epsilon_r$  = Relativa elektrisk permittivitet.

$\mu_r$  = Relativa magnetiska permeabilitet.

Hastighets sambandet utnyttjas vid GPR-mätningar, då markens förhållande varierar i dimensionsled och dess sammansättning ofta uppvisar en heterogen karaktär. Vid gränssytor där material påvisar variationer i elektrisk permittivitet och magnetisk permeabilitet kommer pulsen delvis reflekteras. Genom att beräkna gångtiden från då pulsen transmitterades tills den registrerats utav radarenhetens mottagarantenn ( $R_x$ ), kan man utvinna information om lagerhorisonters position, samt varierande markstrukturer. Tabell 1 redovisar exempel utav hastighetsvariationer och relativ permittivitet i utvalda geologiska material.

Hastighet kan definieras som dimensionell förändring av ett givet läge per förfluten tidsenhet. Utifrån detta kan djupet till gränssytor härledas och beräknas. Täljaren lär här divideras med 2 då pulsen följer en tvåvägsfärd (Jepsson 2016):

Ekvation 3.2

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

$d$  = Lagerdjup under markyta.

$v$  = Utbredningshastighet.

$t$  = Gångtid.

När en elektromagnetisk våg transmitteras försvagas dess amplitud ständigt längs dess färd i marken. Upplösning av data försämras allteftersom vågenergi förloras. Detta medför att markradarns praktiska nedträngning djup varierar mellan 0,5 – 10 meter (Jepsson 2016). Flera faktorer är här avgörande, tekniska som geologiska.

Pulsens geometri utvidgas likt en konform i djupled. Detta medför att vågen distribueras över en större och ökande yta längs z-led. Vilket leder i sin tur till att vågens amplitud, d.v.s. dess styrka, avtar längs färdan. Ett fenomen kallat geometrisk spridning

(Jepsson 2016).

Diffraction, ett annat fenomen som uppstår när mindre strukturer som ledningar och block påträffas längs radarpulsens färdväg. Vågen splittras då och sprids radiellt från objektet (Jepsson 2016). Karakteristiska mönster uppträder i radargram vid diffraction. Vid t.ex. punktdiffraction kommer radargrammet att uppvisa konvex form runt objektet, p.g.a. den radiella spridningen (Figur 9).

Vågenergi går även förlorad vid reflektioner som uppstår längs gränssytor, då en andel utav pulsen återsänds medan resterande andel sprids vidare. Teoretiskt betecknas detta som reflektionskoefficienten,  $R$ . Enligt Jepsson (2016) är  $R$  "kvoten mellan reflekterad och inkommande vågenergi". Vilket uttrycks matematiska enligt följande:

Ekvation 3.3

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad R = \text{Reflektionskoefficienten.}$$

$$\epsilon_x = \text{Lagers elektriska permittivitet.}$$

Vågenergin dämpas även via mediets absorption. Faktorn tillskrivs som,  $\alpha$ , absorptionskoefficienten vilket är beroende utav vågens givna frekvens samt materialets egenskaper (Jepsson 2016). Attributer som här tas i hänsyn är:

Magnetisk permeabilitet –  $\mu$   
 Elektrisk permittivitet –  $\epsilon$   
 Resistivitet –  $\rho$   
 Frekvens –  $f$

Frekvens,  $f$ , är en storhet vilket anger antalet svängningar hos den elektromagnetiska pulsen under givet tidsintervall. Resistivitet,  $\rho$ , denoterar materialets elektriska motståndskraft, vilket förklaras närmare i kapitel 4.2, resistivitetsmätningar. Som följd uteblir reflektioner där pulsen dämpas, vilket förekommer t.ex. vid mätningar över lerrika områden (pers. kom Torlefi Dahlin 2016).

För att erhålla kvalitativ data är därmed valet av frekvens betydelsefullt. Här uppstår en balansgång mellan praktisk djupnedträngning och kvalitativ data. Detta eftersom höga frekvenser ger god upplösning, men samtidigt dämpas energin mer, varvid djupnedträngningen bli lidande. Motsatsen gäller för låga frekvenser (Jepsson 2016).

Vertikal- och horisontellupplösningen avser det minsta objektet man kan erhålla anseilig information (i dimensionsled) ifrån för att kunna tolka objektet som en enskild enhet, t.ex. avståndet mellan två gränssytor (Jepsson 2016). Man förutsätter här att objektet har en cirkulär geometri. Uttrycks då som:

Ekvation 3.4

$$r_e \geq \sqrt{\frac{\lambda h}{2}} = \sqrt{\frac{v h}{2 f}}$$

$r_e$  = Objektets radie.

$\lambda$  = Våglängd.

$h$  = Markens djup.

$f$  = Vågfrekvens.

$v$  = Utbredningshastighet.

En tumregel är att man kan urskilja ett objekt vars storlek är 10 % utav radarns nedträngningsdjup (pers. kom. Manuel Gabler 2016). Om man t.ex. har ett nedträngningsdjup på 2 m, kan man därmed urskilja objekt med storleken  $\sim 2$  dm.

#### 4.1.3 Geologiska aspekter och tillämpningar

Rent geologiskt sett presterar georadar som bäst i undersökningar av homogena, grovkorniga sediment, t.ex. mellansand. Dämpningsfaktorn påverkar då resultaten i mindre utsträckning, sett till finkornigare sediment. En annan viktig aspekt är sedimentens fuktighetsgrad (Muller 2010). Då vatten är en god elektrisk ledare, förhöjs därmed dämpningsfaktorn ju mer vattenmättat sedimentet är. Mättingsförbättringar kan dock göras beroende på vilket material som ska undersökas. Lågresistiva material, som lera, absorberar betydligt mer energi från pulsen sett till ett högresistiva medium, exempelvis sand. Vid undersökningar där leriga markförhållanden råder bör därför en antenn med låg frekvens brukas för att erhålla data under dess skikt. Frekvenser som vanligtvis används vid GPR undersökningar är inom frekvensspannet 10 MHz – 10 GHz (Skolnik 2008).

Georadarns tillämpningar:

- Arkeologiska och kriminaltekniska undersökningar.
- Lokalisera gränsytor, objekt, strukturer samt föroreningsutbredning.
- Markkartering av t.ex. torv, lera etc.
- Påvisa djup till berggrund.

#### 4.1.4 MIRA

MALÅ *Imaging Radar Array*, MIRA (Figur 10) opererar under de tidigare beskrivna principerna. Systemet kan ses som en helhetslösning, där man erhåller processade 3D-radarbilder i realtid (malags.com 2016). Undersökningarna sker därmed effektivt och stora områden kan täcks in under kortare tidsintervall. Markytan i omfånget 2500 m<sup>2</sup>/h har tidigare undersökts (malags.com 2016). Enheten består utav ett flertal antenner, uppemot 30 st, vilka transmitterar pulser i samverkan längs undersökningsprofilerna.

Markradarbilder från en MIRA-enhet kan presenteras på olika sätt. I detta kandidatarbete ges bilderna ut som skiktbilder. Där var bild representerar anomalier av ett givet djup (Figur 10). Bilder kan även framställas som profiler, likt radargram.

Skiktbilder visar mätvärden över pulsens signalstyrka, där kontrastrika markeringar indikerar god signal, d.v.s. att man får reflektioner. Vita zoner är områden där pulsen inte penetrerar, vilket indikerar en svag signal, förklaring kan vara att pulsen dämpas. Anomalierna (Figur 10) är objekt och/eller material med god reflektoryta, t.ex. ledningsrör eller variationsrika avsättningar.

## 4.2 Resistivitet

### 4.2.1 Introduktion



Fig. 10. Insamling av data med en MIRA-enhet från en av de undersökta lokalerna. Infogad ruta är en exempelbild utav markradardata där skiktbilder visas. Guideline Geo, 2016. Återgivet med tillstånd.

Vid resistivitetsundersökningar utnyttjar man, något enkelt beskrivet, den elektriska responsen hos material. Resistivitet som materialteknisk undersökningsmetod utvecklades och introducerades under tidigt 1900-tal. Först på 1970-talet vann tekniken mark då man nu med enkelhet kunde behandla data med hjälp utav datorkraft (Reynold 2011). I dagsläget är resistivitetsundersökningar en av de mest använda geofysiska metoderna, och tillämpas i b.l.a. malm-, miljö- och hydrogeologiska undersökningar.

### 4.2.2 Allmän teori – Resistivitet

I teorin beskrivs elektricitet som ett flöde av positivt och/eller negativt laddade partiklar (t.ex. elektroner och joner), vilka attraherar eller repellerar varandra (ne.se 2016). Flödet följer potentialskillnader, där positivt laddade partiklar attraheras mot ett negativt laddat fält, minuspolen, och vice versa. Elektrisk ström (flödet),  $I$ , mäts i enheten ampere,  $A$ , vilket är ett flödesmått av antalet elektriskt laddade partiklar som passerar en given punkt i ett medium med givna specifika egenskaper (ne.se 2016). 1 ampere anger passerandet av  $6,24 \cdot 10^{18}$  elektroner per sekund. Förflyttningen av laddade partiklar mellan två ändpunkter i en ledare definieras som den elektriska potentialen. Ledarens påverkar strömmen,  $I$ , eftersom ett naturligt motstånd finns i alla material. Potentialskillnaden,  $U$  (enheten volt,  $V$ ), anger i hur stor mån strömmen har påverkats längs dess färdväg. Motståndet, resistans,  $R$ , härleds via Ohms lag:

Ekvation 4.1

$$R = \frac{U}{I}$$

Materials förmåga att leda en elektrisk ström definieras som elektrisk konduktivitet,  $\sigma$ . Där en god ledare tillskrivs som hög konduktiv. Faktorn mäts i enhet Siemens,  $S$ , per meter ( $S\text{m}^{-1}$ ). Dess invers tillskrivs som resistivitet,  $\rho$ , vilket betecknas med enheten  $\Omega\text{m}$  (ohm-meter) (Jeppsson & Dahlin 2016). Resistiviteten styrs av tre faktorer. Resistansen,  $R$ , vilket är en materialegenskap som anger mediets isolatriska förmåga, d.v.s. dess elektriska motståndskraft. De två kvarstående faktorerna är av geometrisk natur och anger mediets längd,  $L$ , samt dess tvärsnittsarea,  $A$



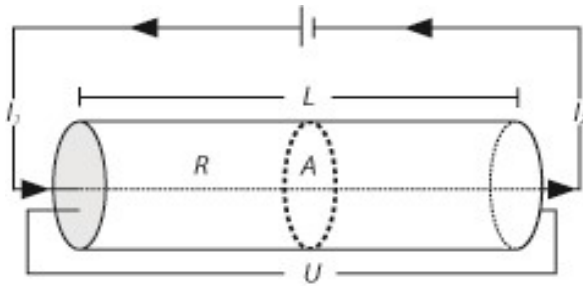


Fig. 11. Principiell illustration över hur strömmen påverkas utav mediet. Baserad efter Kearey et al, 2002

(Jeppsson & Dahlin 2016). I Figur 11 illustreras resistansen hos en cylinder (t.ex. en koppartråd). Där strömflödet,  $I_1$ , leds genom kroppen varvid den påverkas utav dess dimensionering ( $L =$  längd och  $A =$  tvärsnittsarea) samt resistansen,  $R$ . Strömmen passerar kroppens ändpunkt vars energi nu minskat som följd av påverkan utav de tre ovangivna faktorerna. Strömflödet erhåller nu strömstyrkan,  $I_2$ .

Då potens av  $R$  är proportionerligt mot materialets dimensionering erhålls därmed inte statiska resistansvärden för ett specifikt material. Utan resistansen varierar beroende på  $L$  och  $A$ . Förhållandet tillskriv som den geometriska faktorn,  $G$ , och utifrån denna kan resistivitet,  $\rho$ , härledas (Jeppsson & Dahlin 2016). Resistansen och resistiviteten i ett specifikt medium blir således:

Ekvation 4.2

$$R = \frac{\rho L}{A} \rightarrow \rho = R \frac{A}{L} \rightarrow \rho = \frac{UA}{IL} \text{ (}\Omega\text{m)}$$

Formeln är en sammanslagning utav ekvation 4.1 och första delen av ekvation 4.2 då ( $U/I = \rho L/A$ ). Enligt Jeppsson & Dahlin (2016) kan den geometriska faktorn avskrivas. Då spänningsskillnaden,  $U$ , härleds från elektrisk fältstyrka,  $E$  ( $V/m$ ), samt avståndet,  $L$  ( $m$ ): Vilket ger  $U = E \cdot L$ . I sin tur deriverar strömmen,  $I$ , från strömtätheten,  $J$  ( $A/m^2$ ) samt arean,  $A$ : Vilket ger  $I = J \cdot A$ . Sammantaget fås då:

Ekvation 4.3

$$\frac{\rho L}{A} = \frac{E \cdot L}{J \cdot A} \rightarrow \rho = \frac{E}{J}$$

Information ovan visar att resistivitet är en materialspecifik egenskap. Vilket utnyttjas vid resistivitetsundersökningar då geologiska materials egenskaper är fastställda, och kan därmed tolkas via modelleringar.

#### 4.2.3 Geologiska aspekter och tillämpningar

Resistivitetsvariationer inom geologiska material sträcker sig över ett brett intervall. Från silvrets ( $Ag$ ) lågresistiva natur,  $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega m$ . Till högresistiva material som svavel ( $S$ ),  $10^{16} \Omega m$  (Rynolds 2011). Då berg- och jordarter är heterogent uppbyggda och oftast kan betraktats som löst sammansatta, påverkas strömmens ledningsförmåga (Jeppsson & Dahlin 2016). Resistiviteten styrs då dels av dess sammansättning,

men även dess sammanhållning, samt av yttre omständigheter. Jeppsson & Dahlin (2016) anger att strömmen har tre ledningsvägar inom geologiska material: Genom mineralkorn, via kornens ytskikt samt ledning i porvätskan.

*Ledning genom mineralkorn* styrs främst av avsättningens (berg- och jordarter) beståndsdelar. Geologiska avsättningars innehåll uppvisar en stor variationsrikedom utav olika mineral, där mineralkornen i sig uppvisar olika resistiviteter. T.ex. pyritrika bergarter uppvisar en lägre resistivitet ( $2,9 \cdot 10^{-5} \Omega m - 1,5$ ) sett till kvartsrika bergarter ( $300 - 10^6 \Omega m$ ). Mineralkornens morfologi fyller också en roll. Om t.ex. en bergarts struktur är folierad förhöjs kontaktytan mellan mineral, varvid ledningsförmågan förstärks (Jeppsson & Dahlin 2016). Sammantaget är dock denna ledningsväg (genom mineralkorn) inte så betydelsefull då de vanligt förekommande mineralen uppvisar en hög resistivitet och därmed agerar som isolatorer (Jeppsson & Dahlin 2016).

*Ledning längs mineralkornens ytskikt* är här en mer betydande faktor. Likt ett ytskikt kring kornen binds laddade joner, då kornen oftast erhåller en negativ laddning (Jeppsson & Dahlin 2016). Det är denna egenskap som gör att lösa, finkorniga avsättningar erhåller hög konduktitet. Lera är här ett gott exempel. Lera är en benämning av de finaste kornfraktionerna ( $<0,002 \text{ mm}$ ), vilket erhåller en låg resistivitet ( $1 - 10 \Omega m$ ). Lerkorns totala yt-area inom en given volym är flerfaldigt större sett till samma volym innehållande t.ex. grusfraktion ( $2 - 60 \text{ mm}$ ). Lerminerals ytladdning är negativt, därmed attraheras positivt laddade joner mot dess yta. Om lera påträffas inom en markvolym erhålls därmed en högre jonkoncentration. Följden blir att zonen uppträder mer lågresistiv.

*Ledning i porvätskan* utgör den förhärskade ledningsvägen, och styrs utav tre faktorer: Porositeten, porfyllnadsgraden samt porvätskans resistivitet (Jeppsson & Dahlin 2016). Porositeten och sprickfrekvensen hos bergarter är därmed en viktig och avgörande faktor. Sedimentära bergarter är oftast därmed mer lågresistiva sett till kristallin berggrund, eftersom sedimentära bergarter oftast erhåller en högre porositetsgrad. Bergartens ålder är värt att räkna in som en bidragande faktor. Äldre, prekambiska bergarter uppvisar ofta en högre resistivitet sett till lagrade bergarter. Under tidens lopp sker en sekundär mineralisering i porutrymmen, varvid porfyllnadsgraden ökar (Rynolds 2011). Följden blir att porositets- och permeabilitetsgraden minskar och därmed även ledningsförmågan (Rynolds 2011). Vattenmättade avsättningar uppvisar ofta låg resistivitet, detta styrs till största dels utav grundvattenytans (gvy) läge. Om t.ex. en jordart infinner sig ovan gvy, i kapillärzonen, erhåller porerna mindre innehåll sett om jordarten skulle infinna sig i den mättade zonen, därmed erhålls en högre resistivitet. Under gvy, i den mättade zonen, fylls porerna utav vatten varvid avlagringen erhåller lägre resistivitet, då vatten är en god ledare (Jeppsson & Dahlin 2016). En annan viktig aspekt är om porvätskan innehåller en hög salinitetsgrad, om så är fallet agerar den som en god ledare, sett till låg salinitetsgrad. Porfyllnad i form utav gaser höjer avsättningens resistivitet då partikel-flödet påverkas. Porvätska uppvisar även varierad resistivitet beroende av dess temperatur (Jeppsson &

Dahlin 2016). Detta har med att göra att vattnets egenskaper förändras, varvid partikelflödet i sin tur påverkas (Jeppsson & Dahlin 2016).

Lerrika sediment innehåller i regel mer vatten sett till grovkorniga. Detta har att göra med att deras specifika yta är betydligt mer omfattande sett till en lika stor volym utav grövre fraktioner. Vattenmolekyler är polära och binds här hårt mot lerkornens yta via elektromagnetiska krafter. Vattnet betecknas då som hygroskopiskt vatten.

Då strömmens ledningsväg främst sker via elektrolytiska reaktioner i porvätska är därmed bergartens porositet,  $\Phi$ , en avgörande faktor (Reynolds 2011). En hög jonkoncentration i porvätskan leder till att elektrolysen förstärks, varvid bergartens ledningsförmåga höjs (Dahlin & Johansson 1995). Utifrån detta, och ovan beskrivna samband kan ett empiriskt samband härledas, Archies lag:

Ekvation 4.4

$$\rho = a\Phi^{-m}S^{-n}\rho_w$$

$a, m, n = \text{Konstanter.}$   
 $\Phi = \text{Porositeten.}$   
 $f = \text{Andelen porvolym som är vattenfyllda.}$   
 $\rho_w = \text{Porvätskans resistivitet.}$   
 $\rho = \text{Formationens resistivitet.}$

Archies lag gäller dock inte om ledningsvägen sker via korns ytskikt, exempelvis i lermineral (Jeppsson & Dahlin 2016).

I tabell 2, redovisas utvalda materials resistivitetsintervaller vilka anses vara relevant för studien. Som redovisat överlappas intervallen varandra och sträcker sig över ett brett intervall. Tolkning av resistivitetsundersökningar försvåras i och med detta. Kunskap om geologiska förhållanden är därmed väsentligt då man lär utgå från geologiskt rimliga modeller.

#### 4.2.4 Praktiskt utförande

Undersökning av marklagers resistivitet följer principerna nämnt innan. I Figur 12.1 illustreras förloppet konceptuellt. Ett instrument (terrameter) sänder ut en ström med känd spänning,  $I$ , till två strömelektroder,  $C$ , vilka är nedstuckna i marken. Elektroderna elektrificeras och en elektrisk krets bildas mellan dem. Ett tredimensionellt spänningsfält (illustreras i Figur 12.1 som streckade linjer, strömlinjer) bildas i kretsen och breder ut sig i marken likt formen av en itu delad apelsin (Jeppsson & Dahlin 2016). Mellan elektroderna finns potentialelektroder,  $P$ , dessa mäter spänningsskillnaden,  $U$ , mellan potentialelektroderna. Kvoten utav spänningsskillnaden och den utsända strömmen kan då beräknas med Ohms lag (ekvation 4.2), och utifrån sambandet kan markens resistans härledas. För att beräkna resistiviteten lär man i sin tur ta i hänsyn till den geometriska faktorn,  $G$ , vilket beskrivs i ekvation 4.4. Faktorn styrs här av avståndet,  $L$ , vilket är mätpunkten belägen mellan potentialelektroderna,  $P$ . Vid ändring av avståndet mellan ytterelektroderna

Tabell. 2. Förekommande resistivitetsintervall av några material som kan tänkas förekomma i undersökningarna.

Material	Resistivitetsintervall ( $\Omega m$ )
Moränlera	20 – 200
Morän, lerfattig	300 – 3 000
Torr sand	800 – 5 000
Våt sand	100 – 500
Lera	1 – 100
Urberg, sprucket	200 – 4 000
Sandsten	100 – 20 000
Kalksten	300 – 3 000
Salt	> 10 000
Havsvatten	$10^{-1} - 10^5$
Hushållsavfall	10 – 50
Rivningsavfall	30 – 3 000
Industriavfall	1 – 10 000

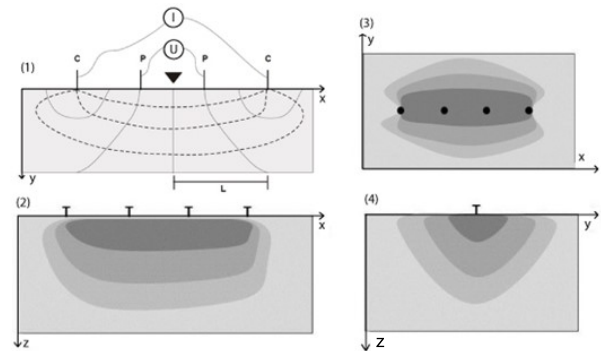


Fig. 12. Figurerna är principiella illustrationer. (1) visar utförande konceptet utav resistivitetsundersökningar. Där  $I$  är strömmen,  $U$  är spänningsskillnaden,  $C$  är strömelektroder,  $P$  är potentialelektroder, triangeln är mätpunkten,  $L$  är avståndet mellan mätpunkt och  $C$ , de streckade linjerna är strömlinjer. Figurerna (2) – (4) illustrerar hur strömmen breder ut sig tredimensionellt i marken, den så kallade 3D-effekten (Jeppsson & Dahlin 2016, återgivet med tillstånd).

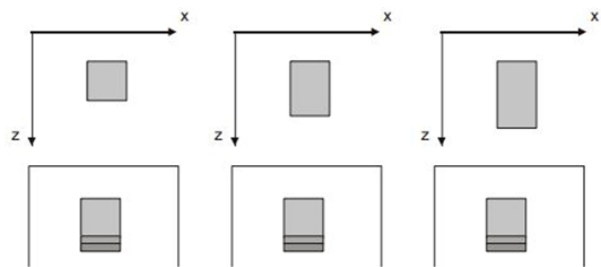


Fig. 13. Principiell illustration över ekvivalensproblem som kan uppstå i samband med ERT-mätningar. Figurerna ovan illustrerar objekt i marken med skilda geometrier. Figurerna nedan visar erhållna resultat efter databehandling. Geometrierna är här likvärdiga och fel representerat (Jeppsson & Dahlin 2016, återgivet med tillstånd).

påverkas därmed den geometriska faktorn. Följden blir att strömtätheten i den elektriska kretsen försvagas då den fördelas över en större volym. Utifrån detta åskådliggörs att djupnedträngning och dataupplösning är

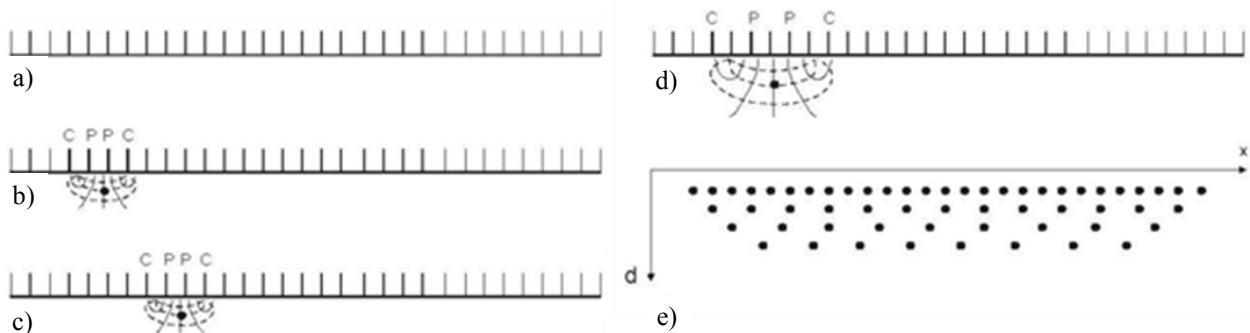


Fig. 14. Principiell illustration över Multielektrodmätning, CVES. Elektroder I är utsatta längs en profil (a). Mätinstrumentet anger efter läst protokollfil vilka elektroder som ska agera potentialelektroder och strömelektroder (b - d). Flertalet mätpunkter från sondering och profilering erhålls via genomförandet (Jeppsson & Dahlin 2016, återgivet med tillstånd).

beroende utav markens egenskaper, strömstyrka samt vald profilkonfiguration för elektroderna.

Som tidigare diskuterat, är geologiska avsättningar av heterogen natur. Varav resistivetsundersöknings data representerar medelvärdet utav alla medium inom den uppmätta volymen (Jeppsson & Dahlin 2016). Detta betecknas som skenbar resistivitet,  $\rho_a$ , och beskrivs som 3D-effekter. För att erhålla enskilda lagars resistivitet lär den skenbara resistiviteten bearbetas via inversion. Processen sker i mjukvaruprogram, t.ex. *RES2DINV*. Utifrån bearbetningen erhålls en pseudo-sektion vilket illustrerar marklagars resistivitet i 2D.

Den så kallade 3D-effekten, nämnt ovan, är viktiga faktorer att ta i åtanke vid resistivetsundersökningar. Figur 12.2 – 12.4 illustrerar principiellt hur strömfältet breder ut sig tredimensionellt i marken. Omkringliggande materials resistivitet påverkar därmed profilens mät punkt. Då data redovisas tvådimensionell kan avvikelser runt omkring profilen tillräknas, vilket i sin tur påverkar den skenbara resistiviteten. Mätprofiler anläggs därmed i största mån för att undvika 3D-effekter.

Ytterligare en faktor att ta i hänsyn är ekvivalensproblem vilket kan uppstå i samband med ERT-mätningar. Strukturers geometri kan i data avbildas felaktigt, och två olikformade objekt kan avbildas med samma geometri (Jeppsson & Dahlin 2016) (Figur 13). Resistivetsvärden kan missvisas i modellen, där övre delen av strukturen redovisas mer korrekt sett till den undre delen där data försämrats och kan återges visuellt felaktigt (Jeppsson & Dahlin 2016) (Figur 13). Data försummas därmed på djupet i större mån om man mäter ovan ett högkonduktiva lager. Undertill kan då hög resistiva artefakter med geometrisk likhet bildas.

#### 4.2.5 Multielektrodmätning – CVES

Kapitlets löptext hänvisar till Figur 14.

Multielektrodmätning, CVES (*Continuous Vertical Electrical Soundings*), utvecklades under 1990-talet för att effektivisera insamlandet utav data i samband med ERT-undersökningar. Förförandet sker genom att flertalet elektroder placeras längs en undersökningsprofil (a), med givna avstånd mellan varandra (t.ex. 1 meter). Mätinstrumentet som sänder ut strömmen är

programmerat till att variera vilka elektroder som ska agera strömelektroder, C, samt potentialelektroder, P, (b till d i Figur 14). Utifrån variationen förändras mät punkten (illustrerat som svart cirkel mellan potentialelektroder). Genom att använda sig av tekniken kan man smidigt och snabbt erhålla data från både profilering (variation av mät punkt i x-led) samt sondering (variation av mät punkt i z-led) (Jeppsson & Dahlin 2016). Sammantaget kan markvolymen karteras i likhet med illustrationen, (e), där flertalet mätpunkter slås ihop och bildar en helhetsbild.

## 5 Studiemetodik

ERT-profilernas start- och slutpunkt mättes in med en TOPCON GR3 GPS-enhet, med kordinatsystemet sweref 99 tm

### 5.1 Mångkanalig markradar – MIRA

Som tidigare nämnt har företaget Guideline Geo utfört GPR-undersökningarna samt bearbetat data. Mätningarna utfördes utav Manuel Gabler under den 14 – 16 mars, 2016. Från skriftlig kontakt med Manuels erhöles hans preliminära rapport, ”*Vinnova project – pipe inspections*”, samt medgivande att använda resultaten. Manuel har även plottat in GPS-markeringar för ERT-profilernas start och slutpunkt.

Tanken är här att utifrån GPR-data finna intresseområden för vidare undersökning med CVES. Intresseområden är zonövergångar i markradar anomalier längs profilerna. Dessa zoner förmodas utgöra avvikande markförhållanden, t.ex. lera till sand, vilket medför förhöjd skaderisk för ledningsrören. Kapitel innehåller endast en kort inblick utav undersökningsområdet samt använd utrustningen och programvara. För utförlig information rekommenderas Guideline Geos kommande rapport.

#### 5.1.1 Undersökningsområde - Profiler

Figur 15 & 16 är översiktsbilder utav markradarnas undersökningsområde. Förstoringsrutan uppvisar anomalizoner av intresse, vid dessa områden valdes vidare undersökning med CVES. ERT-profilerna är markerade i figurerna (GPS-punkt).

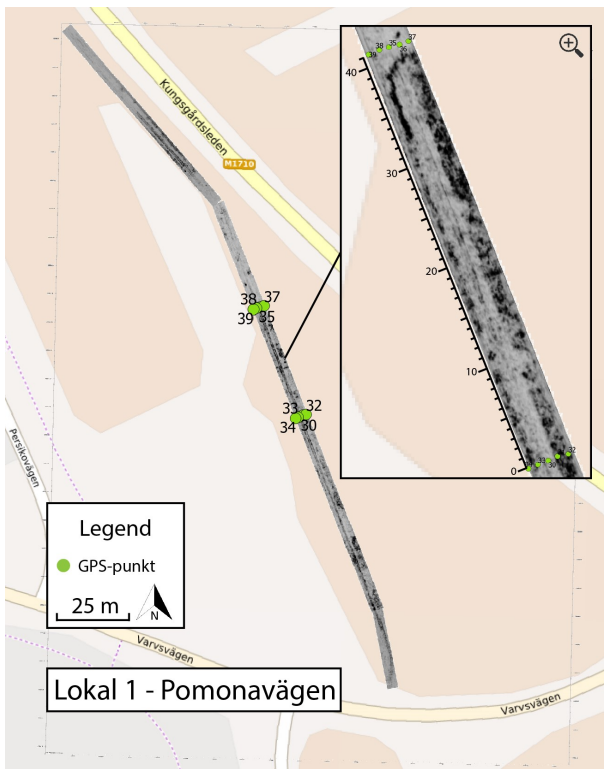


Fig. 15. Markradardata från lokal 1 infogat på kartunderlag. Gröna punkterna (GPS-punkt) visar vart ERT-mätningar har utförts. Guideline Geo, 2016. Återgiven med tillstånd. Modifierad av Anders Plan, 2016.

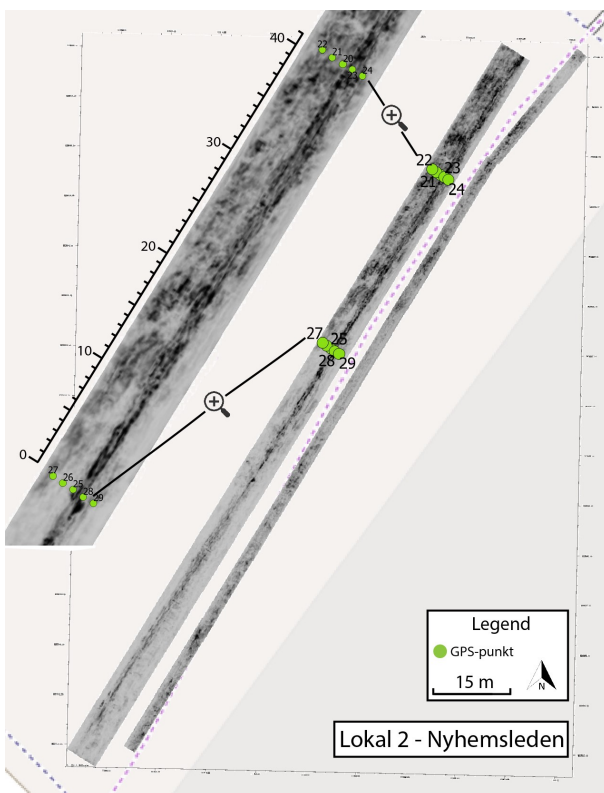


Fig. 16. Markradardata från lokal 2 infogat på kartunderlag. Gröna punkterna (GPS-punkt) visar vart ERT-mätningar har utförts. Guideline Geo, 2016. Återgiven med tillstånd. Modifierad av Anders Plan, 2016.

- Lokal 1, Pomonavägen (Figur 15) inmättes ett 263 · 4,5 meters område.
- Lokal 2, Nyhemsleden (Figur 16) inmättes ett 165 · 9 meters område.

### 5.1.2 Utrustning och databearbetning

Undersökningen utfördes med en 16-kanalig MALÅ MIRA enheten, monterad på ett fordon (ATV, Figur 10). Enheten var utrustad med en skärmad antenn på 400 MHz, vilket under goda markförhållanden har ett effektivt nedträningsdjup på ~3 m. Använda programvaror: *MIRAsoft*, vid insamling av data (rd3). *RSlicer* för bearbetning av data.

Data presenteras här som enskilda lagerskiktbilder, där var bild representerar en specifik position i z-led (markdjup).

## 5.2 Resistivetsmätningar (CVES)

Mätningar genomfördes under april månad, 2016. Lokal 1 undersöktes den 11:e april, lokal 2 den 14:e.

### 5.2.1 Genomförande – Profilutlägg

Undersökningsområdet för CVES uppgår i sin tur till 205 m<sup>2</sup> per lokal. Fem profilutlägg anlades (Figur 17 & 18) med utgång från ledningsgravens mitt. Ytterligare två profiler anlades på vardera sida om centrumprofilen, med 1 m avstånd mellan varandra. Profilerna utgjordes av 42 elektroder med avståndet 1 m mellan varandra, profillängd: 41 m. Elektrodena fördes ned i marken ca 2 dm och kopplades sedan samman via jumpers i två multiledarkablar (med 20 elektrodduttag vardera, 2 m uttagsavstånd). Kablarna löpte längs profilen med elektrodduttag om varannan meter. Profilmätningar gjordes i omgångar, när en profilmätning var klar flyttades kablarna över till nästa profil.

Huvudenheten utgjordes av en 12-kanalig terrameter, ABEM Terrameter LS (Figur 19). Vilket har en intern strömkälla, som drivs huvudsakligen av ett 12 V batteri. Använd protokollfil under mätningarna: "GradExp7sep42X", vilket ger 833 mätpunkter i x- och z-led.

### 5.2.3 Databearbetning

Under fältarbetet gjordes "testkörningar" innan mätskedet för att fastställa god elektrodkontakt. Första testet angavs lägsta strömstyrka för elektrodkontakt till 1 kΩm, d.v.s. om elektrodkontakten var högre än 1 kΩm markerade terrametern detta. Värdet anses som väldigt god kontakt. I nästa test fas höjdes strömstyrkan till 5 kΩm, vilket fortfarande anses som en god kontakt. Om samtliga elektroder kom under värdet förlöpte mätningen, vilket så var fallet under mätningarna i samtliga lokaler. God elektrodkontakt ger oftast god datakvalitet. Efter insamling påbörjades bearbetning utav data, vilket gjordes på LTH med programmet *RES2DINV*. Tre sektioner redovisas vid inversion via programmet: Uppmätt skenbar resistivitet, beräknad resistivitet samt inversions modell. I samtliga sektioner anger den horisontella axeln djup i meter, och den vertikala axeln anger profillängden i meter. Färgskalan anger resistiviteten inom de olika sektionerna (Figur 20). Den uppmätta pseudosektionen (*measured apparent resistivity pseudosection*) är de

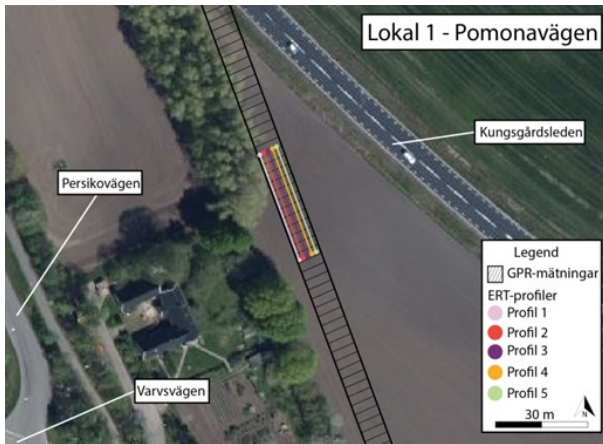


Fig. 17. Karta över lokal 1 – Pomonavägen. GPR- och ERT-mätningar, samt landmärken och intressanta områden är här utmarkerade. Kartunderlag © Lantmäteriet 2016. Illustration: Anders Plan, 2016.

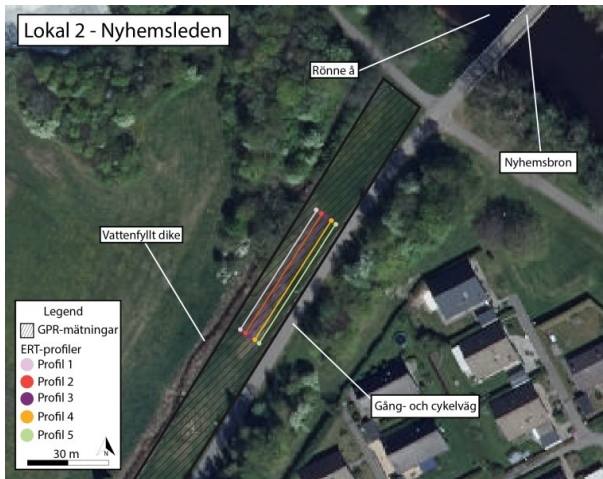


Fig. 18. Karta över lokal 2 – Nyhemsleden. GPR- och ERT-mätningar, samt landmärken och intressanta områden är här utmarkerade. Kartunderlag © Lantmäteriet 2016. Illustration: Anders Plan, 2016.



Fig. 19. Fältutrustning som användes vid undersökning utav de båda lokalerna. Foto: Anders Plan, 2016.

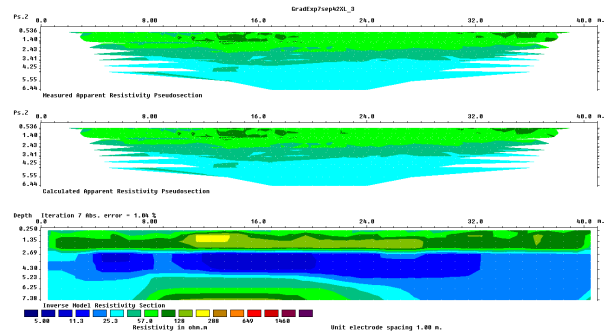


Fig. 20. Exempel på behandlad med programmet RES2DINV. Översta sektionen är *measured apperent resistivity pseudosection*. Mellersta sektionen är *calculated apperent resistivity pseudosection*. Den nedersta sektionen är *inverse model resistivity section*. Data bearbetad av Anders Plan, 2016.

faktiska mätvärdena. Beräknad pseudosektion (*calculated apperent resistivity pseudosection*) illustrerar resistiviteten utifrån kalkyleringar mot programmets startmodell. Den slutgiltiga sektionen, inversionsmodellen (*inverse model resistivity section*) redovisar markens modellerade resistivitet (RES2DINV manual). Denna fås genom att beräkna differensen utav den uppmätta resistiviteten och den beräknade. Programmet utför beräkningar i omgångar, kallat iteration. Mellan 3 till 10 iterationer är vanliga (Jeppsson & Dahlin 2016) (i kandidatarbetet gjordes 7 st). Den procentuella avvikelsen utav markens resistivitet sett till modellens anges som Abs. error. Hög procentats påvisar dålig mätdata, då modelleringen avviker i större grad från markens resistivitet. I Figur 20 har sju iterationer gjorts, med ett Abs. Error på 1,04 %. Data och modellen kan därmed anses som mycket god.

Modellerna i denna studie har processerats med inställning *extended modell*. Data modelleras och interpoleras då över hela volymen (se Figur 20, *inverse model resistivity section* mot sektionerna ovan).

Utifrån ERT-profilerna har Matteo Rossi, en av mina handledare på LTH, sammanslagit data till en tredimensionell modell i programmet *BERT - GIMLi*. 3D-modeller presenteras i bilaga 3 & 4, dessa ska endast ses som visuella hjälpmedel i dess nuvarande skede, då modellering utav ledningsrör kvarstår.

Genomgående utförande och information om delen uteblir p.g.a. projektavgränsningar, samt att 3D-modelleringarna ännu inte är helt färdigställda. Slutresultatet kommer att behandlas i Matteos kommande rapport.

## 6 Resultat

### 6.1 Mångkanalig markradar (MIRA)

Kontrastgränser vid markradaranomalier är av intresse för studien, då dessa indikerar markförhållander som förmodat kan påverka FV-ledningars negativt, då luftningsceller här kan bildas.

På nästkommande sida presenteras skiktbilder (Figur 21) från varierande djup över intresseområdena inom de båda lokalerna. Här åskådliggörs åtskilliga anoma-

lier vilka kan vara av intresse för studien.

## 6.2 Resistivitetmätningar (CVES)

Resistivitetsmodeller i originalutförande redovisas i bilaga 5. Samtliga profiler uppvisar ett lågt Abs. error, maxvärde på endast  $\sim 1\%$ , vilket flaggar för kvalitativ data. Resistivitetsmodeller med tolkningar presenteras i Kapitel 7 – Diskussion och tolkning.

Genomgående för de båda lokalerna, och för samtliga modeller är uppvisandet utav ett högresistivt lager vid markytan vilket överlagras ett lågresistivt lager.

Att ha i åtanke är att inversionen har processerats med *extended modell* inställningar. Vilket interpolerar ut data så att hela diagramvolymen fylls. Därmed kan data undertill, i sidorna, ge något missvisande värden. I bilaga 6 redovisas samtliga inställningar som användes vid bearbetning i *RES2DINV*.

### 6.2.1 Lokal 1 – Pomonavägen

#### 6.2.1.1 Resistivitets – 2D-modell

De fem profilerna inom undersökningsområdet åskådliggör en nästintill överensstämmande uppbyggnad. Ett högresistivt lager påträffas närmast markytan, vilket sträcker sig ned till ett djup mellan  $\sim 2$  till  $\sim 3$  m. Lagret uppvisar en resistivitet omkring  $\sim 70$  till  $300 \Omega m$ , innehållande ett fåtal, relativt små extrempunkter där resistiviteten uppgår till omkring  $+500 \Omega m$ . Undertill åskådliggörs ett relativt homogent låg resistivt lager, sett till lagret ovan, vilket sträcker sig ned mot  $\sim 5$  m djup. Resistivitet varierar här mellan  $\sim 10$  till  $80 \Omega m$ , där de relativa hög resistiva zonerna ( $\sim 80 \Omega m$ ) uppträder likt inklusioner. Den understa lagerenheten (ned till  $7,38$  m) uppvisar resistivitetsvärden i likhet med det översta lagret,  $\sim 70$  till  $250 \Omega m$ . En hög resistiv zon framträder vid  $\sim 5,5 - 6$  m djup, längs profilen mellan  $19 - 32$  m (x-led). Resistivitetsvärden uppgår här till  $+500 \Omega m$ . Ovan anomalin påträffas en lågresistivt zon, vilket sedan överlagras utav ett ytterligare högresistivt område.

### 6.2.2 Lokal 2 – Nyhemsleden

#### 6.2.2.1 Resistivitets – 2D-modell

I likhet med lokal 1 följer profilerna inom undersökningsområdet en genomgående uppbyggnad. Två lagerenheter kan här urskiljas. Översta lagret uppvisar en resistivitet i intervallet  $\sim 150 - +1000 \Omega m$ . Lagerdjupet varierar mellan  $\sim 3$  till  $\sim 5$  m, och ökar något mot profilens slut, d.v.s. i NÖ-riktning. Nästföljande lager uppvisar lägre resistivitet. I profilerna 1, 2 och 3 uppträder lagret relativt homogent resistivitetsmässigt sett. Resistiviteten uppgår här till  $\sim 50 - \sim 140 \Omega m$ . I profil 4 och 5, från  $8$  m till  $34$  m, respektive  $40$  m (x-led) framträder en anomalizon. Zonen är lågresistivt, med värden inom intervallet  $\sim 10$  till  $\sim 50 \Omega m$ . En generell trend uppvisas i den understa lagerenheten. Resistiviteten avtar här mot de NÖ-delarna av profilerna.

## 6.3 Resistivitet – 3D-modell

3D-modellerna (bilaga 3 & 4) åskådliggör, i likhet med 2D-modellerna, ett högresistivt lager närmast markytan vilket underlagras utav ett lågresistivt lager.

Resistiviteterna i 3D-modellerna följer samma generella trender som 2D-modellerna.

## 7 Diskussion och tolkning

Markradaranomalier uppstår där pulsen har en god reflektoryta, t.ex. block, ledningar, rötter. Zoner där pulsen dämpas, vid t.ex. lera, uteblir reflektioner, varvid områden uppträder kontrastfritt på markradarn.

Lerrika- och vattenmättade jordar uppvisar en lägre resistivitet sett till grovkorniga och/eller torra sediment (Jeppsson & Dahlin 2016). Sammantaget kan korrelationer av markradardata och resistivitetsundersökningarna göras. Markradaranomalier som uppvisar hög resistivitet kan tolkas som grovkorniga och/eller variationsrika avsättningar. Områden där markradaranomalier uteblir, och resistiviteten är låg, kan ses som konduktivare material med eventuellt högre vattenmättnadsgrad, t.ex. lera. Markradaranomalier som uppvisar distinkt geometri, t.ex. linjära strukturer, kan tänkas bero på antropogen påverkats, t.ex. objekt som tillförts i marken vid anläggningsarbeten, eller schakt-diken. Detta eftersom naturen sällan är linjär. Från markradardata inom de bägge lokalerna åskådliggörs ledningsgraven som en skarp linjär kontrast (Figur 22 & 24). I den tolkade ledningsgraven ses inga distinkta anomalier bortsett från rören, sett till sidan om ledningsgraven.

### 7.1 Lokal 1 – Pomonavägen

Jordartskartan från SGU anger postglacial- grovsilt till finsand inom undersökningsområdet. Omkring  $500$  m österut breder ett lerfält ut sig. Det kan därmed tänkas att de postglaciala sedimenten överlagras lera. Om så är fallet borde lagret undertill erhålla låg resistivitet relativt till det ovanliggande lagret.

Intill Varsvägens väggkant,  $\sim 200$  m från undersökningsområdet, har SGU karterat isälvsediment i grusfraktion. Dessa sediment kan troligen även påträffas inom undersökningsområdet, och borde då uppträda som högresistiva zoner.

Markradardata indelas här i tre zoner, zon 1 – zon 3, Figur 22.

- Zon 1 infinner sig vid  $0 - 7$  m i ERT-profil 4 & 5, och framträder som tydligast vid  $86 - 123$  cm djup. Här framträder även en linjär struktur vilket löper diagonalt över zonen i SV-NÖ riktning.
- Zon 2 är belägen inom samtliga profiler, mellan  $14 - 21$  m, anomalin är som starkast vid  $86 - 147$  cm djup. Vinkelrätt mot strukturen, åskådliggörs linjära strukturer mellan  $17 - 20$  m längs profilen.
- Zon 3 sträcker sig över ett större område mot undersökningsområdets slut,  $25 - 40$  m, och är belägna inom samtliga ERT-profiler. Zonen framträder som tydligast mellan  $73 - 110$  cm djup. Två distinkta anomalistrukturer framträder här. Den sydligaste uppträder geometriskt likt strukturen i zon 1. Den nordligaste strukturen, med form av ett upp och nedvänt "J" framträder som tydligast vid  $73 - 110$  cm.

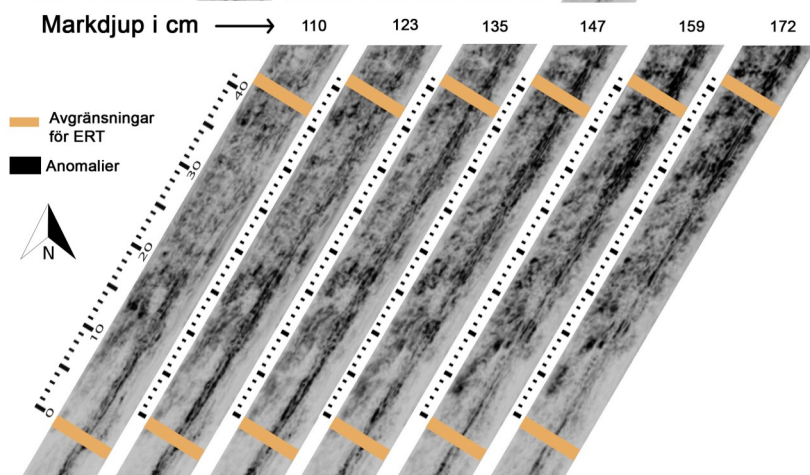
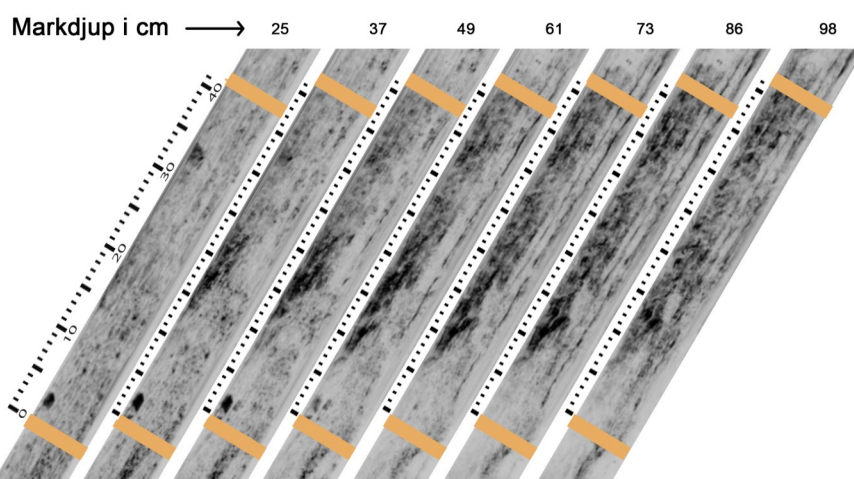
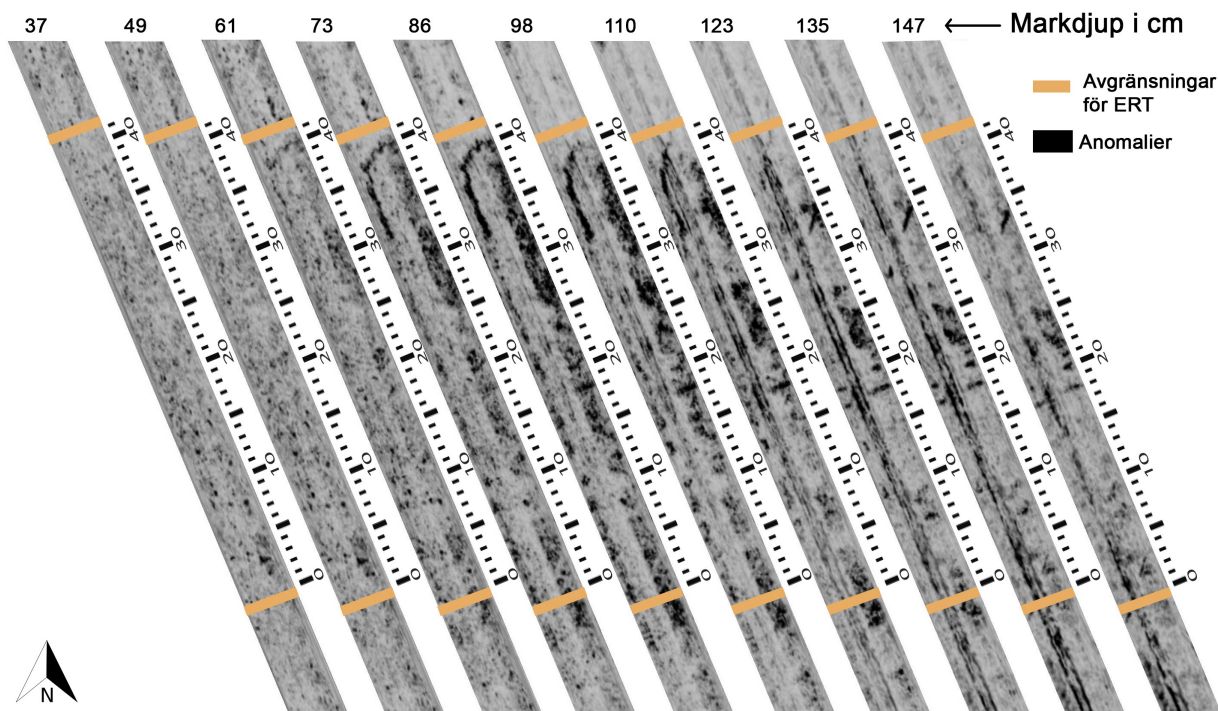


Fig. 21 (ovan). Resultat från markradarmätningar inom lokal 1. Bilder presenteras här som skiktbilder, där enskild bild visar anomalier vid vissa djup. Djupen är här mellan 37 cm till 147 cm under markytan. Avgränsningar för ERT har gjorts (orange markering) Guideline Geo, 2016. Återgiven med tillstånd. Modifierad av Anders Plan, 2016.

Fig. 21 (vänster). Resultat från markradarmätningar inom lokal 2. Bilder presenteras här som skiktbilder, där enskild bild visar anomalier vid vissa djup. Djupen är mellan 25 cm till 172 cm under markytan. Avgränsningar för ERT har gjorts (orange markering) Guideline Geo, 2016. Återgiven med tillstånd. Modifierad av Anders Plan, 2016.

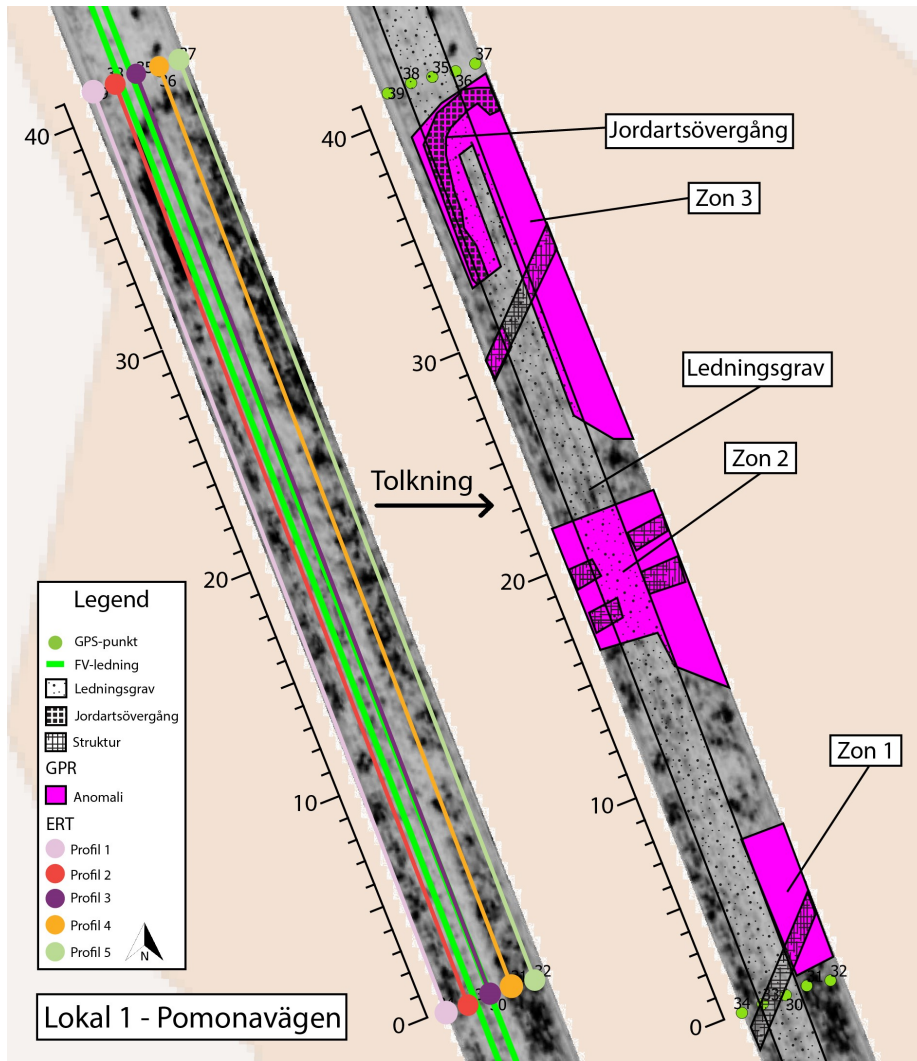


Fig. 22. Till vänster visas markradardata med ERT-profiler och FV-ledningar utmarkerade. Till höger är tolkningar av markradardata. Anomalier är markerade i lila, tre distinkta zoner kan här urskiljas. Anomalier av intresse, vilka uppvisar strukturer, är ifyllda inom zonerna. GPS-punkter anger vart ERT-profilerna startar och slutar. Markradardata från Guideline Geo, 2016. Återgiven med tillstånd. Modifierad och tolkat av Anders Plan, 2016.

Resistivetsprofiler tolkas enskilt, och redogörs i Figur 23. Här delas profilerna in i tre lagerenheter, lager 1 (0 – ~2,8 m), lager 2 (~2,8 – ~5 m) och lager 3 (~5 – 7,38 m) Markradardata sträcker sig ned till ett djup av 147 cm, korrelationer mellan GPR- och ERT-data görs därmed endast i lager 1. Zon 1, zon 2 och zon 3, hänvisar till Figur 22 och Figur 23.

- **Zon 1, korrelerat med lager 1**

Zonen är relativt liten och uppträder längs profil 4 & 5, mellan 0 – 7 m. Markradaranomalier framträder här som tydligast vid 73 – 123 cm markdjup. Resistivetsmässigt utläses inga direkta skillnader, då de båda profilerna erhåller ~170  $\Omega m$  inom zonen. Zonen tolkas som variationsrikt, något grovkornigt material.

Strukturen som skär diagonalt genom zonen tolkas som en antropogen struktur p.g.a. dess linjära geometri. Troligen kan det röra sig om en äldre dräneringsledning (kanske i keramik) som vanligt används i och vid jordbruksmark (pers. kom. Manuel Gabler 2016).

- **Zon 2, korrelerat med lager 1**

Zonen innefattar samtliga ERT-profiler. Anomalier framträder här mellan 14 – 22 m, vid 73 – 147 cm djup. Resistiviteten verkar här ha koppling till strukturen som framträder i markradardata. Även här åskådliggörs linjär struktur. Denna framträder ungefär vid det djupet där ledningsrören framträder, 86 – 98 cm djup. Strukturen sträcker sig ned till markradarns sista skiktbild på 147 cm djup, dock okänt vart strukturen slutar då underlagsdata saknas. I ERT-profilerna, 1 – 3, uppvisas här hög-resistiva områden, ~170 – ~400  $\Omega m$ , vid ytskiktet och ned mot ~1,3 m djup. Även denna struktur tros vara en äldre dräneringsledning (pers. kom. Manuel Gabler 2016).

- **Zon 3, korrelerat med lager 1**

Zon 3 framträder i markradarn vid samma djupsom zon 2. Tros därmed att det finns samband. Resistivetsprofilerna inom zonen SÖ-delar (25 – 30 m) är svårtolkade. Hög- och låg resistivetsvärden växellagras här om vartannat. Strukturen som upp-



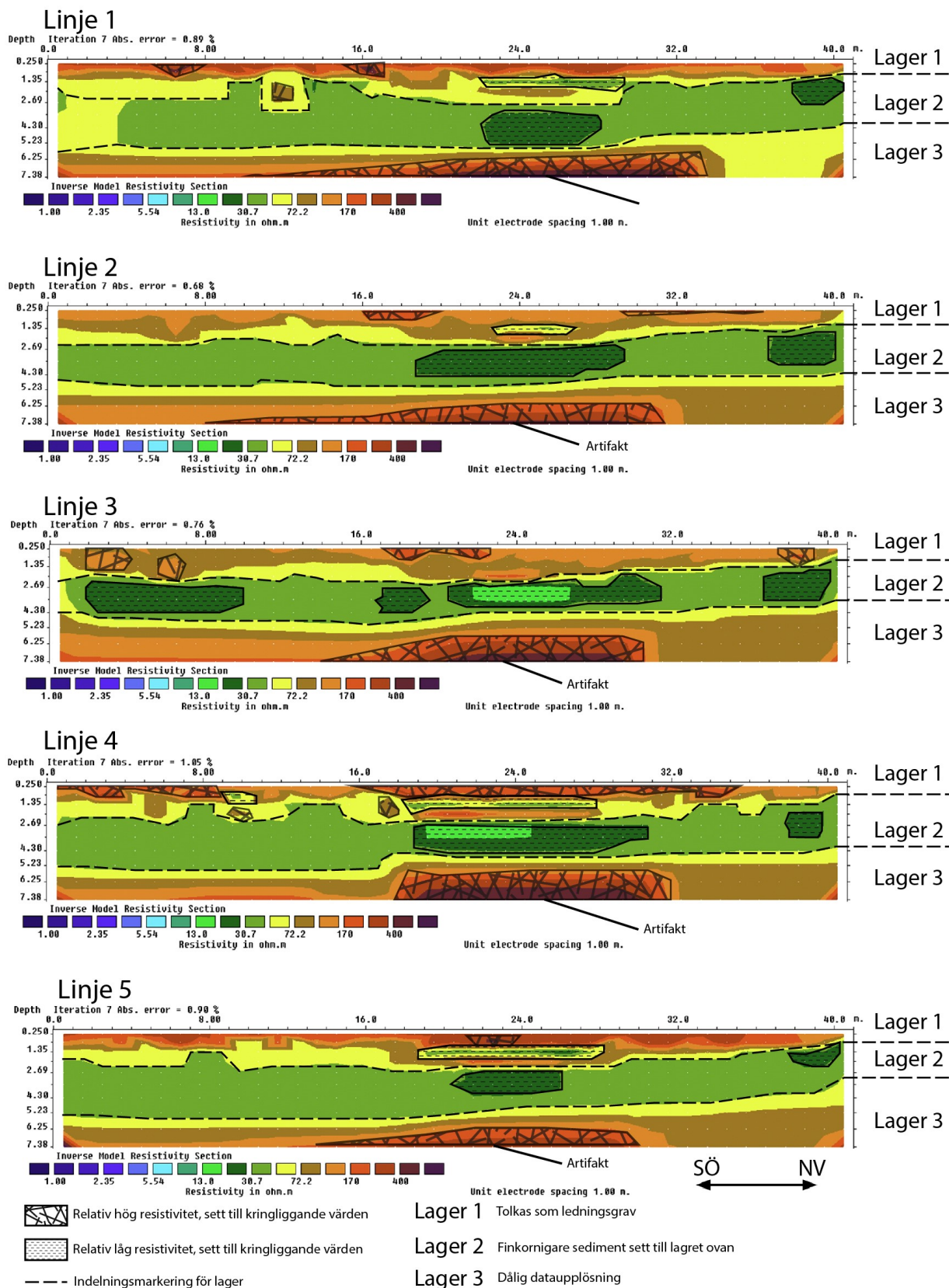


Fig. 23. Resistivitetsmodeller inom undersökningsområdet. Linje 1 befinner sig i lokalens västra delar. Profilerna förflyttar sig sedan 1 meter i östlig led per "linje". Färgskalan är logaritmisk upp uppvisar resistivitetsvärden i  $\Omega m$ . x-axeln anger profilens längd i meter, z-axel anger markdjupet. Tre lagerenheter har delats in utifrån markerade resistivitetskontraster. Lager 1 tolkas som ledningsgraven, lager 2 tolkas som mer lerrika jordar, lager 3 ses som en enhet av försämrade data, varpå tolkning uteblir. I enheterna har relativa höga- och låga resistivitetszoner markerats.

träder likt ett upp och nedvänt ”J” finns på ERT-profilerna 2 & 3 vid 32 – 40 m. Ytskiktet uppträder på profil 2 som något högresistivt, ~300  $\Omega m$ , sett till samma område i profil 3, ~170  $\Omega m$ . Strukturen tolkas som en jordartsövergång mellan mer lerrika marker i NV, och grovkornigare jordar i SÖ. Området är av intresse för studien.

Den linjära strukturen vilket skär diagonalt genom zon 3s mitt tolkas även här som en äldre dräneringsledning p.g.a. dess linjära natur (pers. kom. Manuel Gabler 2016).

- **Lager 1**

Lagret tolkas som ledningsgraven, dels p.g.a. den högre resistiviteten sett till det undre lagret, men även att dess kaotiska utseende utblir något vid profilerna (2 & 3) ovan ledningarna. Lagret upplevs som intressant då samtliga ERT-profilerna här uppvisar stråklika lagerskikt utav resistivitetsvariationer (18 – 29 m). Närmast markytan uppgår resistiviteten till ~170  $\Omega m$ . Under skiktet påträffas ett lågresistivt tunt stråk, ~70 - ~30  $\Omega m$ . Under lagret ökar åter resistiviteten, ~170  $\Omega m$ . Korrelerat med lager 2 erhålls ännu lägre värden, mellan (17 – 29 m). Resistiviteten är här endast ~10 - ~30  $\Omega m$ . Tolkningen är svår, det kan röra sig om artefakter, variations- och mer lerrikt material. I 3D-modellerna uppvisas inte strukturen. Tolkning utblir. Då det kan röra sig om missvisande data eller geologiskt och/eller antropogent komplexa variationer.

Lagrets ytskikt, ovan rören profil 2 och 3, är något mer lågresistivt sett till de övriga profilerna, 3D-effekten kan här spela en roll, då profiler utanför ledningsgraven sammanslagna resistivitetsvärde blir högre p.g.a. mer variationsrikt material.

- **Lager 2**

Lagret framträder som relativt homogent, och erhåller en låg resistivitet. Tolkas som något lerrik mark p.g.a. den låga resistiviteten. Zoner av låg resistivitet framträder i profil 3 SÖ delar (2 – 10 m) samt vid samtliga profiler vid 18 – 29 m. Troligtvis orsakas variationerna utav geologiska markskillnader.

- **Lager 3**

Tolkas som ett lager av något sämre data. Då lagret ovan är högkonduktivt avtar upplösningen mot djupet. Den utmärkande högresistiva zonen som finns i samtliga profiler, mellan ~16 – 30 m, tros vara en artefakt av det högkonduktiva lagret, och strukturerna ovan. Tolkning utblir.

## 7.2 Lokal 2 – Nyhemsleden

SGUs jordartskartor påvisar svämsediment bestående utav sand inom undersökningsområdet. Svämsedimenten tros överlagra postglaciala grovsilt till finsand, då dessa påträffas några 10-tals meter NV från undersökningsområdet. Om så är fallet borde resistiviteten minska med djupet.

I markradardata framträder tydliga anomalier nästintill

över hela undersökningsområdet (Figur 24, zon 1). Zon 1 infinner sig längs 5 – 41 m i samtliga profiler, och uppträder vid djupen mellan 37 – 172 cm djup i markradardata. En mindre, yt-nära anomali framträder även vid ERT-profil 1 & 2s startpunkter (Figur 24, zon 2, 0 – 4 m). Anomalin framträder här mellan 25 – 61 cm djup.

Markradardata sträcker sig ned till ett djup av 172 cm, korrelationer mellan GPR- och ERT-data kan därmed endast göras i det översta lagret, lager 1. Zon 1 och zon 2, hänvisar till Figur 24 och Figur 25. Ledningsgraven är här något svår att urskilja. Dock syns en skarp gräns vid ungefär profil 2, gränsen är utmarkerad i Figur 24.

Resistivetsprofiler tolkas enskilt. Här delas lagret in i två enheter, lager 1 och lager 2, hänvisat till Figur 24.

- **Zon 1, korrelerat med lager 1**

Anomalizonens SV-delar, 9 – 20 m, framträder som tydligast vid 37 till 98 cm djup. Resistivetsmässigt sammanfaller detta med profil 1 och 2. Vid profilerna påträffas ett högresistivt område vid ~8 till 18 m i profil 1, och 22 m i profil 2 (+1000  $\Omega m$ ). Detta ses som en korrelation. Området tolkas som en zon av varierade avlagringar innehållande växtrotter. Från ungefär hälften av profilen tar vegetationen vid längs diket mot väster. Under fältarbetet stötte vissa elektroder på motstånd i marken vid nedförande, ungefär vid detta område, och bortåt. Orsaken tros vara växtrotter. Korrelationen görs då rotter ger något lägre resistivitet i deras närområde, detta eftersom växternas rotsystem ”suger upp” vattnet och på så sätt dränerar porer i viss mån (pers. kom. Matteo Rossi 2016). Rotter ger även tydliga markradar reflektioner (pers. kom. Manuel Gabler 2016).

I början av zonen SV delar och längre bortåt utanför zonen, 0 – ~13 m, påvisas lägre resistivetsvärden (~300  $\Omega m$ ) sett bort mot profilernas NÖ-delar (+1000  $\Omega m$ ). Detta tolkas som en jordartsövergång, dels p.g.a. resistivetskontrasten, men även att markradarens signal dämpas vid 0 – ~6 m. Troligtvis är markens SV-delar något mer lerrik sett till de NÖ-delarna. Övergången är av intresse för studien.

Vid 135 cm djup uppvisar zonen NÖ-delar, 30 – 41 m (profilens slut och bortåt), distinkta anomalier mot de östliga profilerna, 3, 4 & 5. Anomalernas intensitet ökar med djupet (159 – 172 cm). Resistivetsvärden i dessa profiler är något distinktare och mer sammanhängande sett till profil 1 & 2. Samtaget i profilerna 1, 2 & 3, uppvisas likvärdiga resistivetsvärden, ~400 – +1000  $\Omega m$ , och uppbyggnader. Förklaring kan även här vara rotter (pers. kom. Manuel Gabler 2016).

- **Zon 2, korrelerat med lager 1**

Anomalistrukturen som ses vid början utav profil 1 & 2 (Figur 24, 0 – 4 m) uppvisar inget utstickande resistivetsvärde sett till samma område inom profil 3 – 5 (~300  $\Omega m$ ). Strukturen påträffas ytligt i

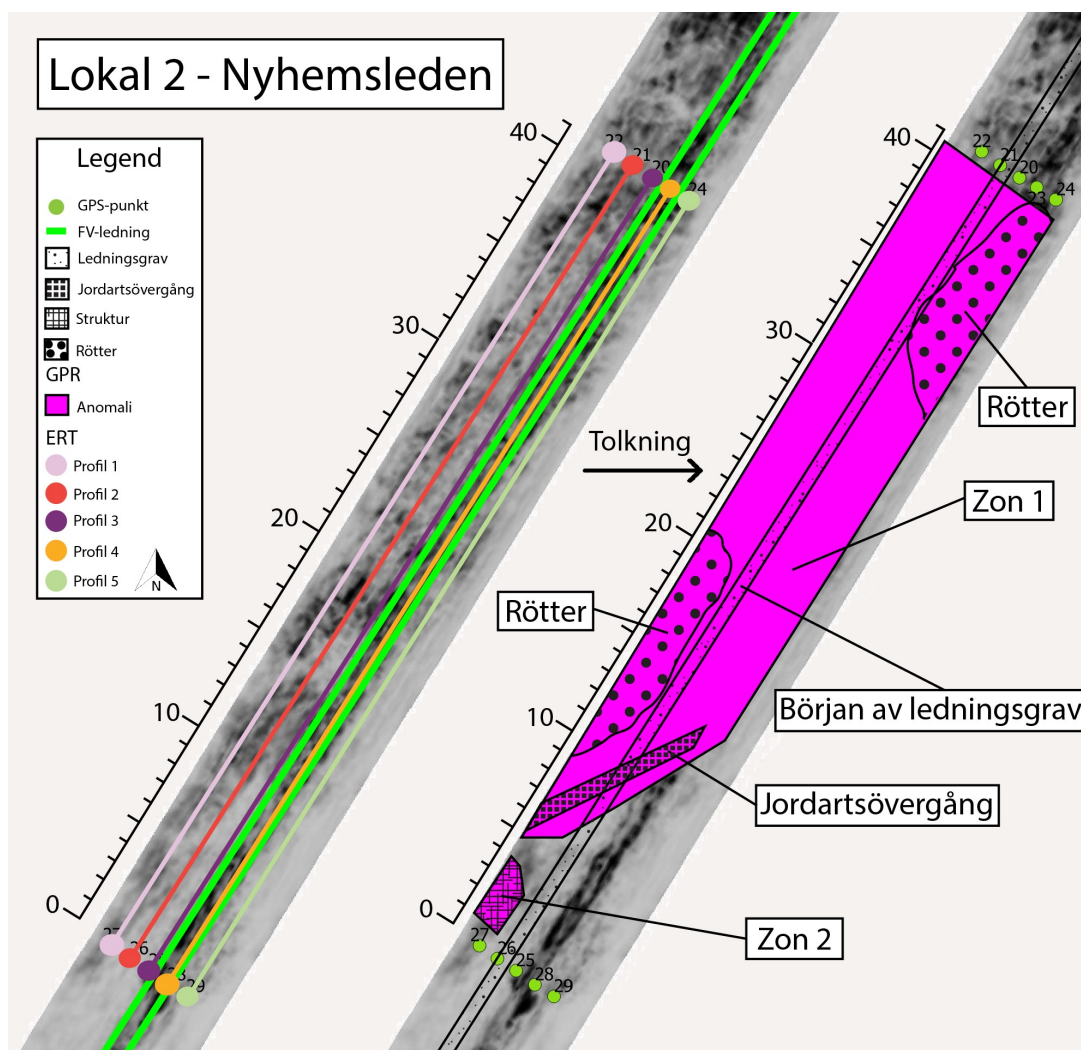


Fig. 24. Till vänster visas markradardata med ERT-profiler och FV-ledningar utmarkerade. Till höger är tolkningar av markradardata. Anomalier är markerade i lila, tre distinkta zoner kan här urskiljas. Anomalier av intresse, vilka uppvisar strukturer, är ifyllda inom zonerna. GPS-punkter anger vart ERT-profilerna startar och slutar. Markradardata från Guideline Geo, 2016. Återgiven med tillstånd. Modifierad och tolkat av Anders Plan, 2016.

markradardata, och blottläggs vid 25 cm, för att sedan försvinna vid 61 cm. Objektet tolkas som ett block (pers. kom. Manuel Gabler 2016), mest grundat på den tydliga reflektionen.

- **Lager 1**

Lagret erhåller hög resistivitet,  $\sim 300 - \sim 1500 \Omega m$ , sett till underliggande lager,  $\sim 10 - \sim 140 \Omega m$ . Lagret når ett djup utav ca 3 – 5 m, och uppvisar en homogenitet resistivitetsmässigt sett. Lagret tolkas som ledningsgraven och FV-ledningarna, vilka samtaget borde uppvisa hög resistivitet. FV-ledningars ytterhölje utgörs av PE-plast, vilket är ett högresistivt material. Kringfyllnaden, sediment som omger ledningar vid anläggning i mark, utgörs oftast utav sorterad sand. Välsorterade sediment, som sand, kan uppvisa höga resistiviteter (pers. kom. Dhalin 2016).

- **Lager 2**

Lagret uppträder relativt homogent, och erhåller resistivitet inom spannet  $\sim 50 - \sim 140 \Omega m$ . Lagret tolkas som att dess innehåll består utav finkorni-

gare sediment och/eller mer vattenmättat sett till lagret ovan.

Zoner av lägre resistivitet,  $\sim 10 - 50 \Omega m$ , påträffas inom lagret. En generell trend av lägre resistivitet i djupled, mot NÖ ses i linje 3 – 5, Figur 24, 3D-modellerna uppvisar trenden något tydligare (bilaga 4).

Trenden med avtagande resistivitetsvärden i djupled, i profilerna 3 – 5 NÖ-delar, ses som intressant. Två tolkningshypoteser kan här föreslås: Förhöjd vattenmättnadsgrad ger lägre resistivitet. Sedimentens vattenmättnadsgrad, inom området, borde stiga mot Rönne å, då det kan tänkas att grundvattnets strömriktning är mot dess tryckyta, varvid sedimentet närmast ån borde vara mer vattenmättat.

Geologiskt sett kan marken vara något mer lerrik mot NÖ, och erhåller därmed lägre resistivitet.

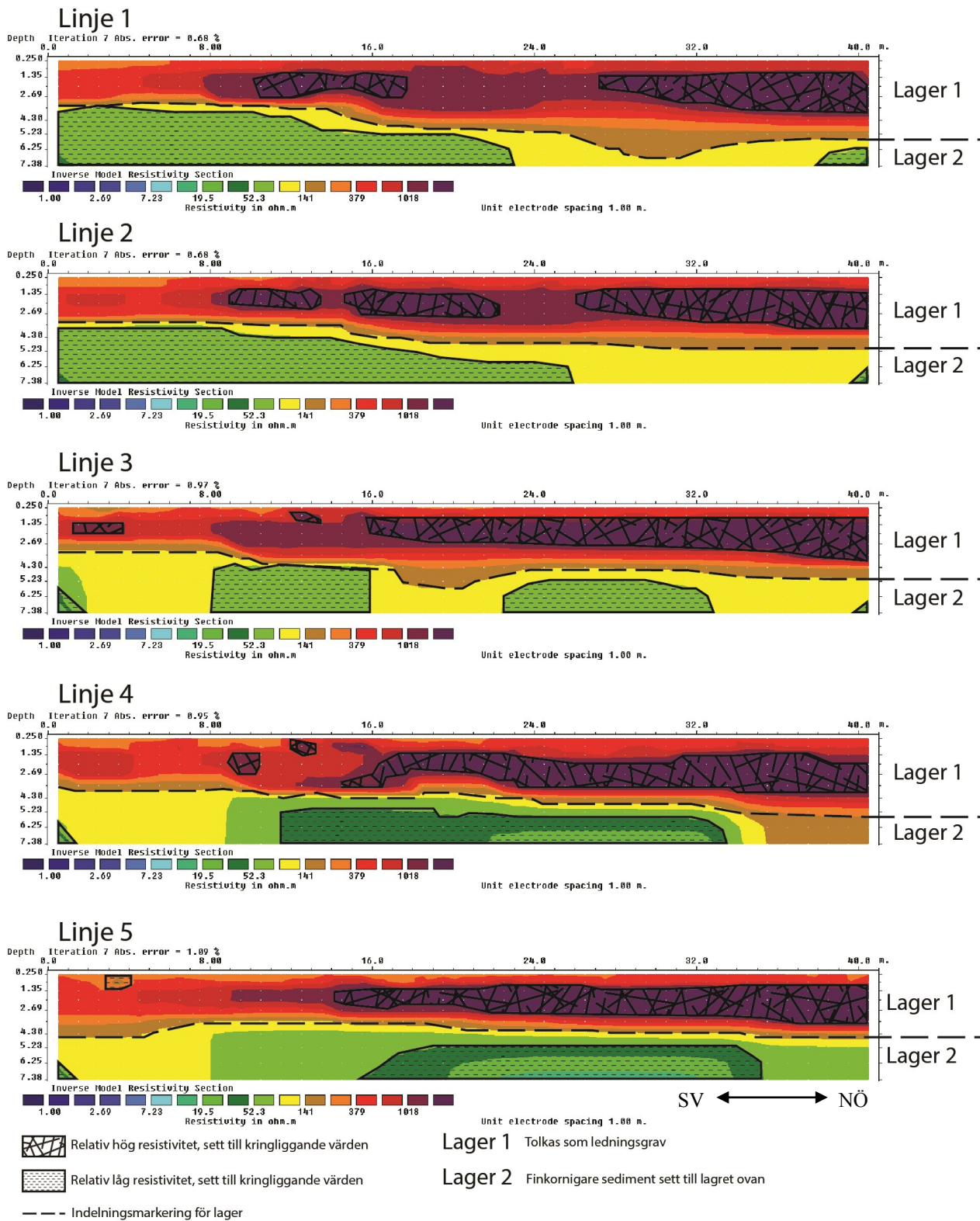


Fig. 25. Resistivetsmodeller inom undersökningsområdet. Linje 1 befinner sig i lokalens västra delar. Profilerna förflyttar sig sedan 1 meter i östligled per "linje". Färgskalan är logaritmisk upp uppvisar resistivetsvärden i  $\Omega m$ . x-axeln anger profilens längd i meter, y-axeln anger markdjupet. Två lagerenheter har delats in utifrån markerade resistivetskontraster. Lager 1 tolkas som ledningsgraven, lager 2 tolkas som mer lerrika jordar, eventuellt att vattenmättnadsgraden ökar mot NÖ. I enheterna har relativa höga- och låga resistivetszoner markerats.

## 8 Slutsatser

Generellt visar denna studie att markradar och resistivitetmätningar presterar bra för att lokalisera jordartsövergångar, i alla fall vid relativt storskaliga övergångar. Tolkningen i mindre skala upplevs som något komplex. Data från resistivitetsundersökningar ger ett mer sammanslaget resistensvärde i och med 3D-effekten, varvid upplösningen av mindre lågresistiva områden, t.ex. lerlinsor, blir svårskådliga. Markradar-data ger en information om att pulsen dämpas vilket borde antyda lera, men kan även utgöras av annat material med samma egenskaper.

- Inom lokal 1 har en jordarts övergång tolkas. Vid utgrävning rekommenderas undersökningar av detta område. Zonen vid 14 – 22 m inom undersökningsområdet ses också som intressant. Här framträder linjära markradaranomalier. Resistivitetsundersökningarna visar här intressanta stråklika zoner vilka är svåra att förklara utifrån data, men upplevs som intressanta.
- Inom lokal 2 tolkades även en jordartsövergång, om än inte lika tydlig som i lokal 1. Undersökningar vid utgrävning bör inrikta sig mot detta område. Dock kan även lokalens mitt, samt de NÖ-delar vara av intresse. Områdena tolkas som rika på växtrotter. Dessa kan påverka ledningarna negativt genom t.ex. rotsprängning.

### Slutsatser återkoppling till frågeställningarna

*Kan man inom lokalerna påvisa potentiellt skadliga markförhållanden för fjärrvärmeledningarna genom att kombinera GPR- och ERT-mätningar?*

Svar: En antyda ses av markskadliga förhållanden inom båda lokalerna. Främst zoner som tolkats som jordartsövergångar, men även de två zonerna inom lokal 2 vilka har tolkats som växtrotter.

*Är det möjligt att identifiera jordartsövergångar inom lokalerna, utifrån insamlad data?*

Svar: Ja, jordartsövergångar har tolkats inom de bägge lokalerna.

*Kan den valda profilkonfigurationen för resistivitetmätningar erhålla kvalitativ data?*

Svar: Ja, i viss mån. Dock vore det intressant att minska elektrodavståndet för att erhålla högre dataupplösning.

## 9 Tackord

Stort tack till Jonas Schönström för våra fältdagar tillsammans, samt de diskussioner vi har fört sinsemellan genom projektets gång. Vill tacka Matteo Rossi, en av mina handledare på LTH, för de trevliga dagarna ute i fält, hjälp vid databearbetning och förda resonemang, det har varit en lärorik period. Vill även tacka Manuel Gabler, på Guideline Geo som har varit extremt hjälpsam och svarat snabbt på frågor rörande markradar-data. Tack för de möten vi har haft, vilket har hjälpt

mig i mina tolkningar. Riktat tack mot min handledare Torleif Dahlin på LTH, för att kunna fått chansen att delta i detta projekt, som har varit väldigt lärorikt. Tack till min handledare på geologiska institutionen, Ulf Söderlund för bra rättning och *input*. Tack till Tony Bohman på Öresundskraft AB, för fältguidningen samt snabba mailsvar vid frågor rörande ledningar inom lokalerna. Vill även tacka Charlotte Sparrenbom på Lunds universitet för tipset om detta projekt. Tacka min examiner Mikael Calner för bra *input*. Sist men inte minst vill jag rikta ett stort tack till ”geolog gänget”, Josefin Martell, Wiktor Skoglund, Jonas Schönström, Kim Teilmann och Markus Rosvall, vilket utgjort vår skrivgrupp under projektets gång. Där vi ägnat många trevliga timmar geologiska institutionens datasal. Tack för alla välbehövliga distraktioner, fikapauser, skratt, och bra diskussioner längs projektets gång, ”GG WP”.

## 10 Referenser

- Aastrup, B., Evensen, E., Gunnlaugsson E., Strandell, T., Westas, H., 1990: *Nordvärme – Rapport. Korrosion och vattenbehandling i Nordiska fjärrvärmesystem 1990, erfarenhet och praxis*. Fjernvarme gruppen. 51 sid.
- Andreasson, P.-G., 2006: *Geobiosfären: en introduktion*. Studentlitteratur. 604 sid.
- Bernstad, A., 2009: *Fjärrvärme idag och i framtiden från ett lokalt till ett regionalt perspektiv för att gynna miljön och plånboken*. Handelskammaren. 32 sid.
- Bjurström, H., 2000: *Nedbrytning av syrereducerande medel i fjärrvärmenätet*. ÅF-Energikonsult AB. 42 sid.
- Dahlin, T., Johansson, S., 1995: *Övervakning av tät kärnans funktion genom analys av resistivitetsvariationer*. Vaso. 52 sid.
- Dahlin, T.-L., Jeppsson, H., 2016: *Geoelektriska metoder inom tillämpad geofysik*. Geologiska institutet, Lunds universitet. 74 sid.
- Jeppsson, H., 2016: *Elektromagnetiska metoder. Kompendium i Geofysisk undersökningsmetodik, GEO C04*. Geologiska institutionen, Lunds universitet. 127 sid.
- Ellis, L., 2003: *Archaeological Method And Theory: An Encyclopedia*. Garland Publishing, Inc. 744 sid.
- Esko, D., 1978: *Beskrivning till jordartskartan, Höganäs NO/Helsingborg NV*. SGU. 94 sid.
- Johansson, P.-O., 2007: *Fjärrvärmeanslutna byggnaders värme- och varmvattensystem – Samverkan, komfort, och sårbarhet*. Lunds Universitet. 227 sid.
- Kearey P., Brooks M., Hill I., 2002: *An introduction to geophysical exploration*. Blackwell Publishing. 281 sid.
- Lundquvist, J., Lundquvist, T., Lindström, M., Calner, M., Sivhed, U., 2011: *Sveriges geologi – Från urt id till nutid*. Studentlitteratur. 628 sid.
- Muller, C.-F., 2010: *Beskrivning till kartan, Grundvattneförekomster i Ängelholms kommun*. SGU. 68 sid.
- Norling, E., Wikman, H., 1990: *Beskrivning till berggrundskartan, Höganäs NO/Helsingborg NV*. SGU. 125 sid.

- Mattsson, E., Kučera, V., 2009: *Elektrokemi och korrosionslära*. Swerea KIMAB. 194 sid.
- Nilsson, S., Bergström, G., 2002: *Groundwater leak age in Pipe Joints due to Temperature Variations*. Euroheat and Power - Fernvärme International. 31 sid.
- Reiter, O., 2007: *Det skånska landsbyggsprogrammet – Ett utvecklingsprogram med landskapsperspektiv*. Länsstyrelsen, Skåne län. 248 sid.
- Rindelöv, M., 2015: *Våras värdefulla ledningsnät – Fjärrvärme och VA-ledningar*. Sydsvatten. 44 sid
- Reynolds, J.-M., 2011: *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley- Blackwell. 696 sid.
- Svensk fjärrvärme., 2012: *Läggningsanvisningar för fjärrvärme- och fjärrkyleledningar, tekniska bestämmelser, D:211*. Svensk fjärrvärme. 62 sid.
- Skolnik, M.-I., 2008: *Radar Handbook*. The McGraw- Hills Companies. 1352 sid.
- Sjökvist, S., Wren, J., Ahlberg, J., 2012: *Kvantifiering av värmeläckage genom flygburen IR- teknik – en förstudie*. Svenska fjärrvärme AB. 78 sid.
- Tarkpeea, P., 1997: *Korrosionsrisker vid användning av stål- och plaströr i fjärrvärmesystem – en litteraturstudie*. Studsvik material AB. 34 sid.

#### **Internet referenser**

Brunnsarkivets, SGU

(apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar-sv.html)

Kartgeneratorm, SGU

(apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar-sv.html)

Permittivitet, Nationalencyklopedin

<http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/permittivitet> (hämtad 2016-04-13)

Permeabilitet, Nationalencyklopedin

[http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/permeabilitet-\(magnetism\)](http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/permeabilitet-(magnetism)) (hämtad 2016-04-13)

Utmattning, Nationalencyklopedin

<http://www.ne.se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/utmattning> (hämtad 2016-05-16)

Radar, Nationalencyklopedin

<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/radar> (hämtad 2016-04-12)

<https://www.luleaenergi.se/sv/privatkund/fjarrvarme/fjarrvarme/varfor-gront-vatten/> (hämtad 2016-05-16)

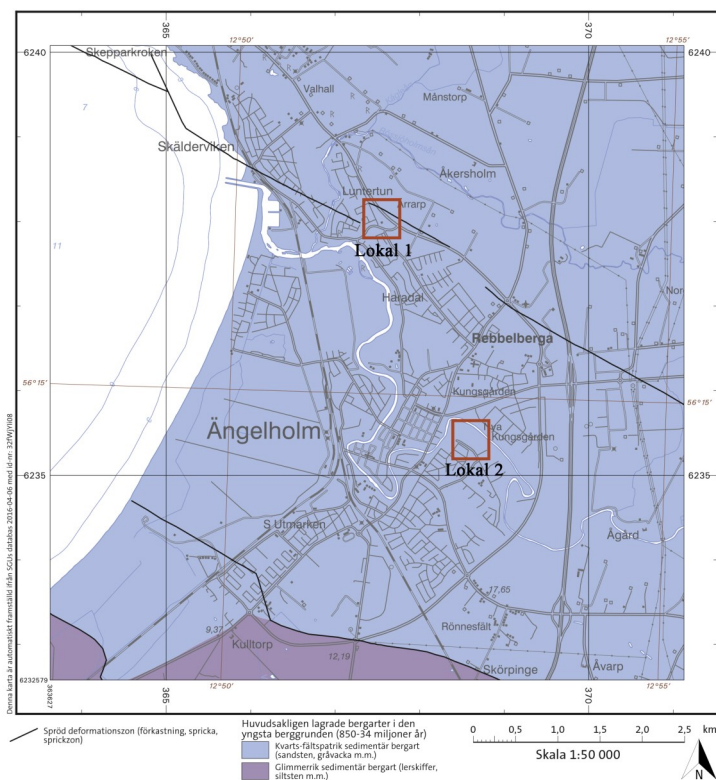
<http://www.svenskfjarrvarme.se> (hämtad 2016-04-16)

<http://www.karlstadsenergi.se/> (hämtad 2016-04-16)

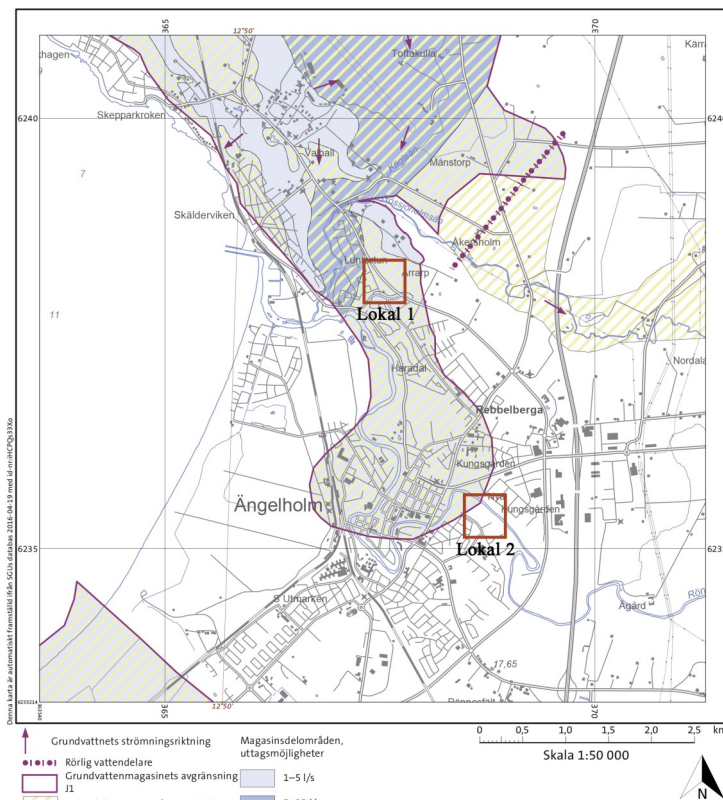
#### **Bildreferenser**

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%C3%84ngelholm\\_Municipality\\_in\\_Scania\\_County.png?uselang=sv](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%C3%84ngelholm_Municipality_in_Scania_County.png?uselang=sv) (hämtad 2016-04-23)

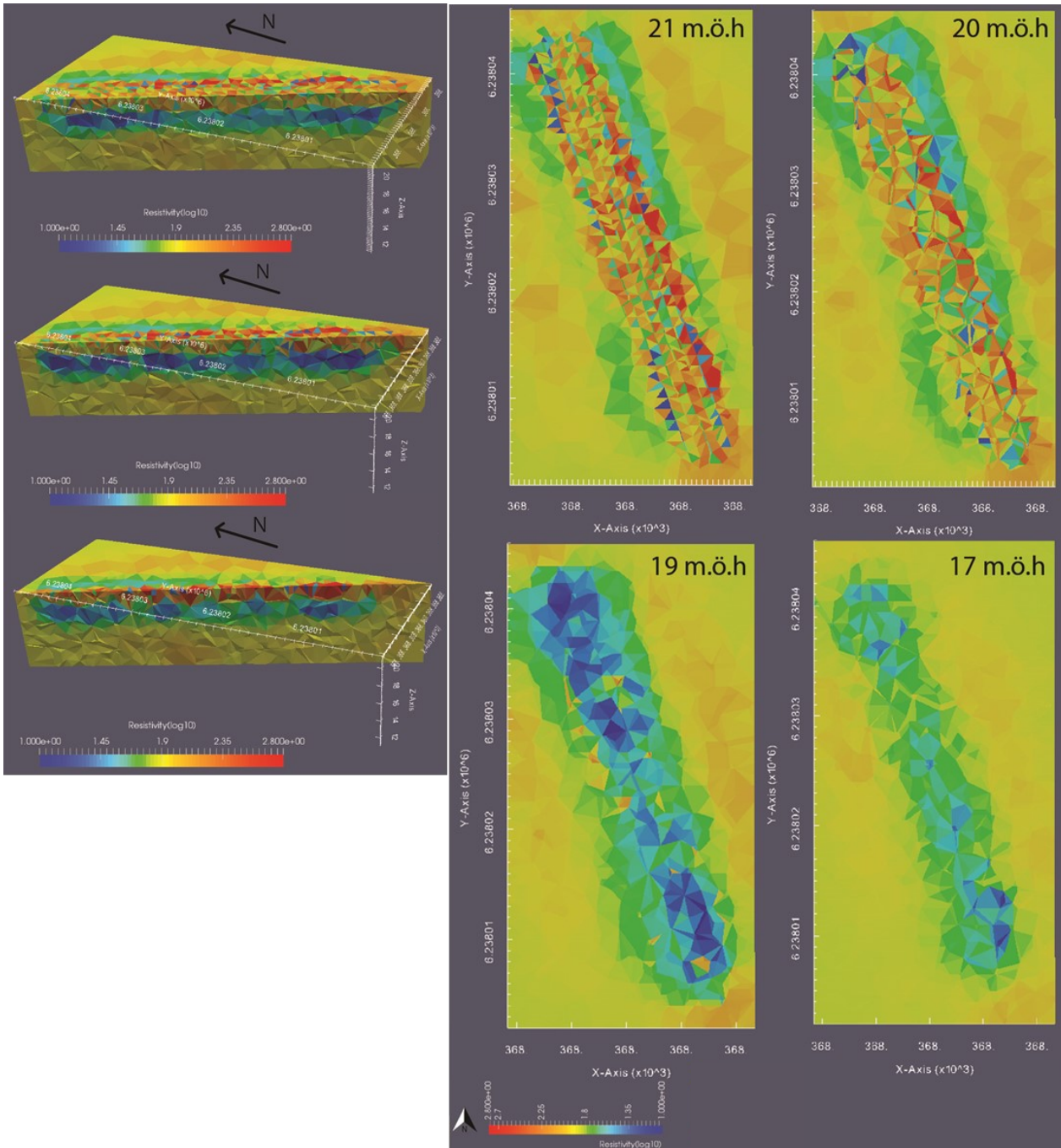
## Bilaga 1 — Bergrundskarta, Ängelholms stad © SGU 2016



## Bilaga 2 — Hydrogeologisk karta, Ängelholms stad © SGU 2016

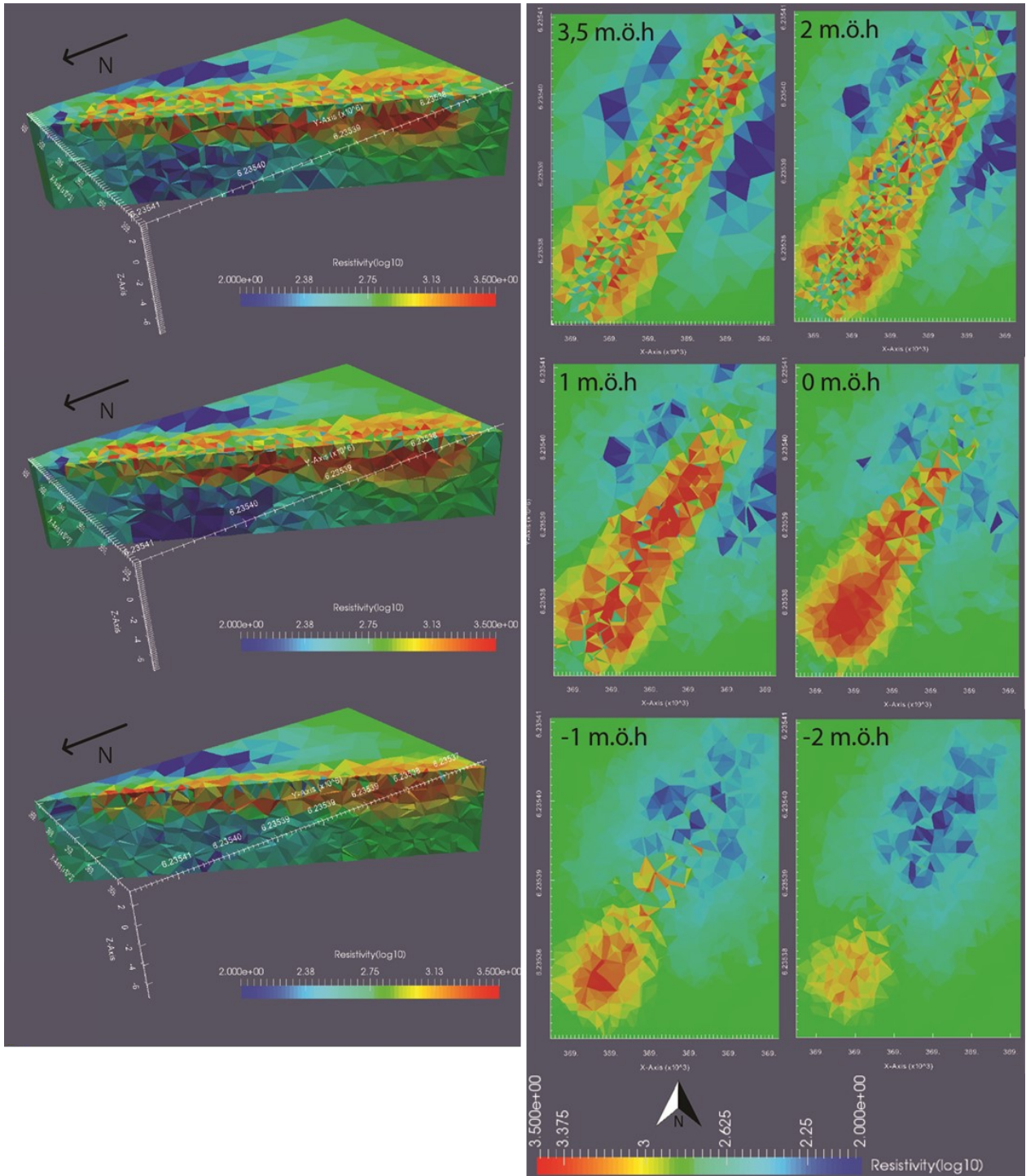


### Bilaga 3 — 3D-modeller, Lokal 1—Pomonavägen

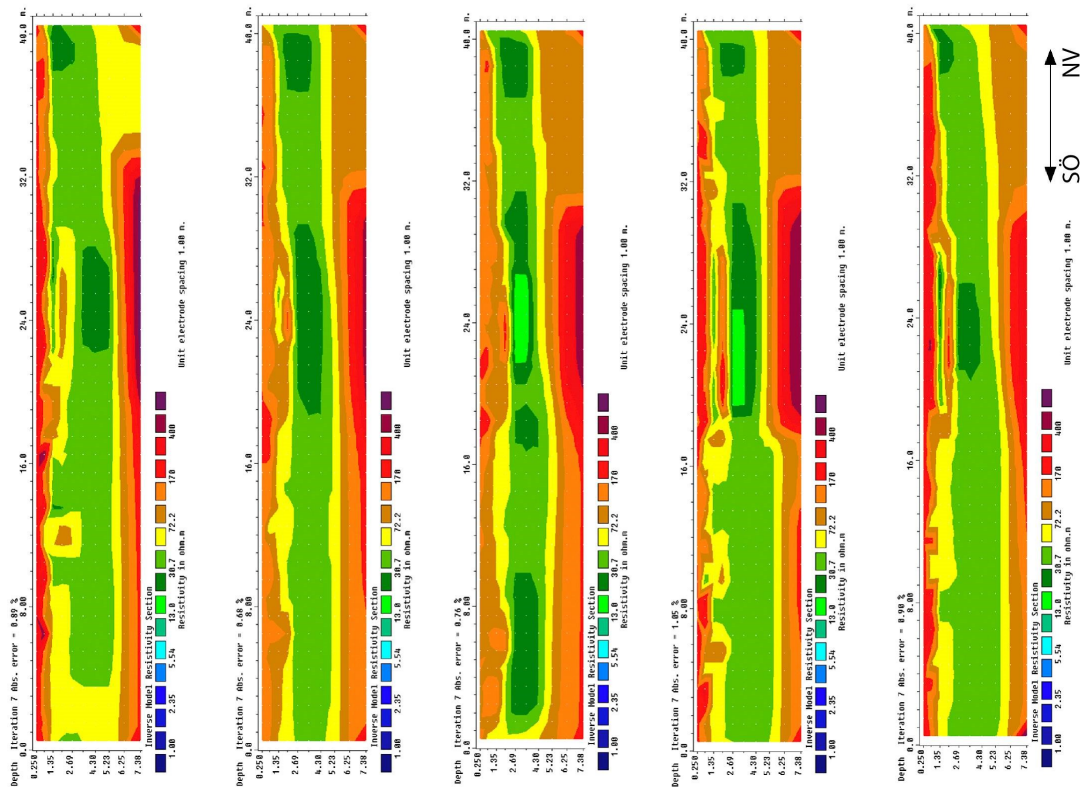




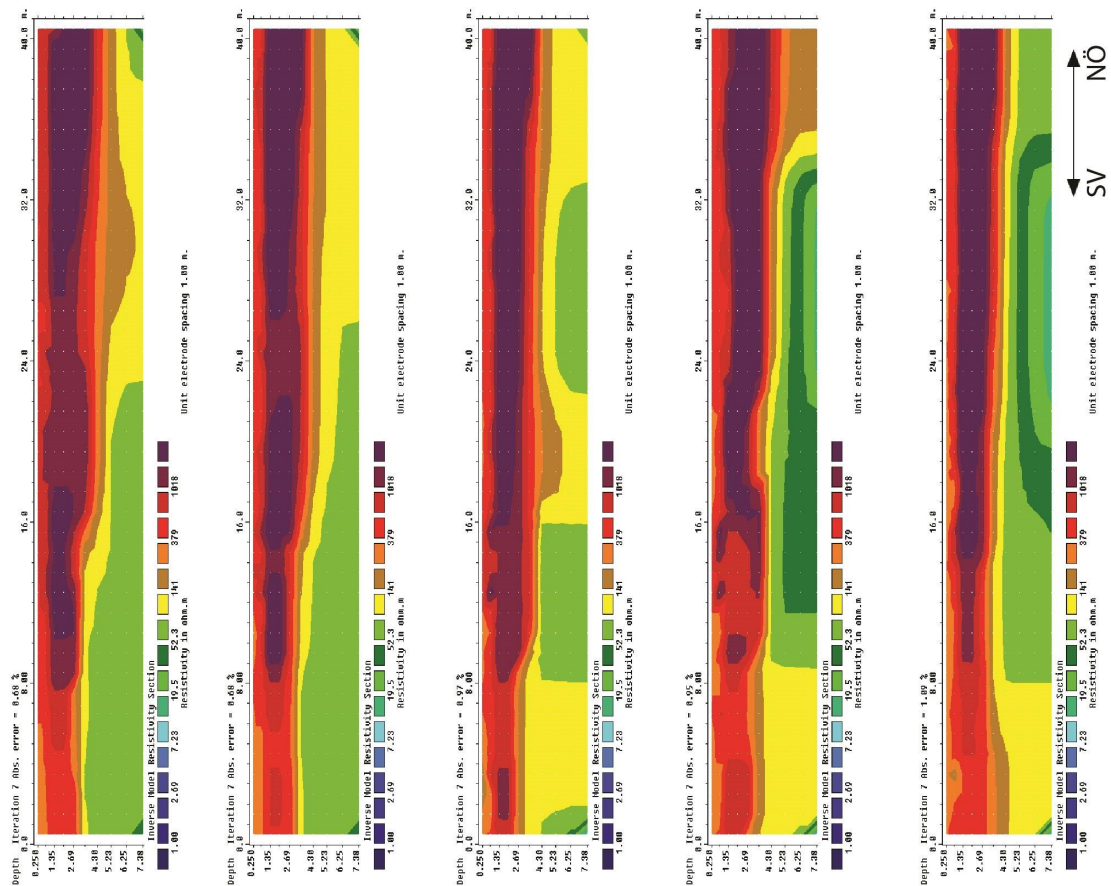
Bilaga 4 — 3D-modeller, Lokal 2—Nyhemsleden



## Bilaga 5 — Resistivitetsmodeller, Lokal 1 — Pomonavägen



## Bilaga 5 — Resistivitetsmodeller, Lokal 2 — Nyhemsleden



## Bilaga 6 — Inversionsinställningar, RES2DINV

### Inversion settings

Initial damping factor (0.01 to 1.00)  
0.1500  
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)  
0.0200  
Local optimization option (0=No, 1=Yes)  
1  
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)  
5.0000  
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)  
0.5000  
Number of iterations (1 to 30)  
7  
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)  
1.0000  
Model for increase in thickness of layers(0=default 10%, 1=default 25%, 2=user defined)  
2  
Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4)  
4  
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only,1=directly on model)  
1  
Reduce number of topographical data points? (0=No,1=Yes. Recommend leave at 0)  
0  
Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)  
1  
Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)  
2  
Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)  
1  
Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)  
1.1000  
Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with inverse Swartz-Christoffel)  
0  
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)  
1  
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))  
0.0500  
Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)  
1  
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)  
0.0050  
Allow number of model parameters to exceed data points? (0=No, 1=Yes)  
1  
Use extended model? (0=No, 1=Yes)  
1  
Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)  
0  
Type of mesh (0=Normal,1=Fine,2=Finest)  
0

Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)  
1  
Time-lapse inversion constrain (0=None,1&2=Smooth,3=Robust)  
3  
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)  
0  
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)  
0.5000  
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)  
1.1000  
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)  
0  
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE, 5=QUINTIPLE)  
1  
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)  
1  
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)  
0.100  
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)  
0  
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)  
0  
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)  
0  
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)  
1.000  
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)  
0  
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)  
0.00010  
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)  
0  
LIMIT RESISTIVITY VALUES(0=No,1=Yes)  
1  
Upper limit factor (10-50)  
50.000  
Lower limit factor (0.02 to 0.1)  
0.020  
Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)  
0  
Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)  
1.00  
Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)  
0  
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)  
2  
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)

0.005  
 Use data compression with Incomplete Gauss-Newton  
 (0=No,1=Yes)  
 0  
 Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)  
 1  
 Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)  
 0.01000  
 Use fast method to calculate Jacobian matrix.  
 (0=No,1=Yes)  
 0  
 Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)  
 0  
 Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)  
 5.00000  
 Type of finite-element method  
 (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)  
 1  
 Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)  
 1.050  
 Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)  
 0  
 Factor to control the degree variations near the bore-  
 holes are reduced (2 to 100)  
 5.0  
 Factor to control variation of borehole damping factor  
 with distance (0.5 to 5.0)  
 1.0  
 Floating electrodes survey inversion method (0=use  
 fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the  
 model)  
 1  
 Resistivity variation within water layer (0=allow resis-  
 tivity to vary freely,1=minimise variation)  
 1  
 Use sparse inversion method for very long survey lines  
 (0=No, 1=Yes)  
 0  
 Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)  
 1  
 Automatically switch electrodes for negative geometric  
 factor (0=No, 1=Yes)  
 1  
 Force resistance value to be consistant with the geomet-  
 ric factor (0=No, 1=Yes)  
 0  
 Shift the electrodes to round up positions of electrodes  
 (0=No, 1=Yes)  
 0  
 Use difference of measurements in time-lapse inversion  
 (0=No,1=Yes)  
 0  
 Use active constraint balancing (0=No,1=Yes)  
 0  
 Type of active constraints (0=Normal,1=Reverse)  
 0  
 Lower damping factor limit for active constraints  
 0.4000  
 Upper damping factor limit for active constraints  
 2.5000  
 Water resistivity variation damping factor  
 8.0000  
 Use automatic calculation for change of damping factor  
 with depth (0=No,1=Yes)  
 0



## Tidigare skrifter i serien

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

434. Vasilica, Alexander, 2015: Geofysisk karaktärisering av de ordoviciska kalkstensenheter på södra Gotland. (15 hp)
435. Olsson, Sofia, 2015: Naturlig nedbrytning av klorerade lösningsmedel: en modellering i Biochlor baserat på en fallstudie. (15 hp)
436. Huitema, Moa, 2015: Inventering av föroreningar vid en brandövningsplats i Linköpings kommun. (15 hp)
437. Nordlander, Lina, 2015: Borrningsteknikens påverkan vid provtagning inför dimensionering av formationsfilter. (15 hp)
438. Fennvik, Erik, 2015: Resistivitet och IP-mätningar vid Äspö Hard Rock Laboratory. (15 hp)
439. Pettersson, Johan, 2015: Paleoekologisk undersökning av Triberga mosse, sydöstra Öland. (15 hp)
440. Larsson, Alfred, 2015: Mantelplymer - realitet eller *ad hoc*? (15 hp)
441. Holm, Julia, 2015: Markskador inom skogsbruket - jordartens betydelse (15 hp)
442. Åkesson, Sofia, 2015: The application of resistivity and IP-measurements as investigation tools at contaminated sites - A case study from Kv Renen 13, Varberg, SW Sweden. (45 hp)
443. Lönsjö, Emma, 2015: Utbredningen av PFOS i Sverige och världen med fokus på grundvattnet – en litteraturstudie. (15 hp)
444. Asani, Besnik, 2015: A geophysical study of a drumlin in the Åsnen area, Småland, south Sweden. (15 hp)
445. Ohlin, Jeanette, 2015: Riskanalys över pesticidförekomst i enskilda brunnar i Sjöbo kommun. (15 hp)
446. Stevic, Marijana, 2015: Identification and environmental interpretation of microtextures on quartz grains from aeolian sediments - Brattforsheden and Vittskövle, Sweden. (15 hp)
447. Johansson, Ida, 2015: Is there an influence of solar activity on the North Atlantic Oscillation? A literature study of the forcing factors behind the North Atlantic Oscillation. (15 hp)
448. Halling, Jenny, 2015: Inventering av sprickmineraliseringar i en del av Sorgenfrei-Tornquistzonen, Dalby stenbrott, Skåne. (15 hp)
449. Nordas, Johan, 2015: A palynological study across the Ordovician Kinnekulle. (15 hp)
450. Åhlén, Alexandra, 2015: Carbonatites at the Alnö complex, Sweden and along the East African Rift: a literature review. (15 hp)
451. Andersson, Klara, 2015: Undersökning av sluttestsmetodik. (15 hp)
452. Ivarsson, Filip, 2015: Hur bildades Bushveldkomplexet? (15 hp)
453. Glommé, Alexandra, 2015:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in plagioclase, evidence for a crustal origin of the Hakefjorden Complex, SW Sweden. (45 hp)
454. Kullberg, Sara, 2015: Using Fe-Ti oxides and trace element analysis to determine crystallization sequence of an anorthositenorite intrusion, Älgön SW Sweden. (45 hp)
455. Gustafsson, Jon, 2015: När började platttektoniken? Bevis för platttektoniska processer i geologisk tid. (15 hp)
456. Bergqvist, Martina, 2015: Kan Ölands grundvatten öka vid en uppdämning av de utgrävda diken genom strandvallarna på Ölands östkust? (15 hp)
457. Larsson, Emilie, 2015: U-Pb baddeleyite dating of intrusions in the south-easternmost Kaapvaal Craton (South Africa): revealing multiple events of dyke emplacement. (45 hp)
458. Zaman, Patrik, 2015: LiDAR mapping of presumed rock-cored drumlins in the Lake Åsnen area, Småland, South Sweden. (15 hp)
459. Aguilera Pradenas, Ariam, 2015: The formation mechanisms of Polycrystalline diamonds: diamondites and carbonados. (15 hp)
460. Viehweger, Bernhard, 2015: Sources and effects of short-term environmental changes in Gullmar Fjord, Sweden, inferred from the composition of sedimentary organic matter. (45 hp)
461. Bokhari Friberg, Yasmin, 2015: The paleoceanography of Kattegat during the last deglaciation from benthic foraminiferal stable isotopes. (45 hp)
462. Lundberg, Frans, 2016: Cambrian stratigraphy and depositional dynamics based on the Tomten-1 drill core, Falbygden, Västergötland, Sweden. (45 hp)
463. Flindt, Anne-Cécile, 2016: A pre-LGM sandur deposit at Fiskarheden, NW Dalarna - sedimentology and glaciotectionic

- deformation. (45 hp)
464. Karlatou-Charalampopoulou, Artemis, 2016: Vegetation responses to Late Glacial climate shifts as reflected in a high resolution pollen record from Blekinge, south-eastern Sweden, compared with responses of other climate proxies. (45 hp)
465. Hajny, Casandra, 2016: Sedimentological study of the Jurassic and Cretaceous sequence in the Revinge-1 core, Scania. (45 hp)
466. Linders, Wictor, 2016: U-Pb geochronology and geochemistry of host rocks to the Bastnäs-type REE mineralization in the Riddarhyttan area, west central Bergslagen, Sweden. (45 hp)
467. Olsson, Andreas, 2016: Metamorphic record of monazite in aluminous migmatitic gneisses at Stensjöstrand, Sveconorwegian orogen. (45 hp)
468. Liesirova, Tina, 2016: Oxygen and its impact on nitrification rates in aquatic sediments. (15 hp)
469. Perneby Molin, Susanna, 2016: Embryologi och tidig ontogeni hos mesozoiska fisködlor (Ichthyopterygia). (15 hp)
470. Benavides Höglund, Nikolas, 2016: Digitization and interpretation of vintage 2D seismic reflection data from Hanö Bay, Sweden. (15 hp)
471. Malmgren, Johan, 2016: De mellankambriska oelandicusslagren på Öland - stratigrafi och facietyper. (15 hp)
472. Fouskopoulos Larsson, Anna, 2016: XRF-studie av sedimentära borrhärnor - en metodikstudie av programvarorna Q-spec och Tray-sum. (15 hp)
473. Jansson, Robin, 2016: Är ERT och Tidsdomän IP potentiella karteringsverktyg inom miljögeologi? (15 hp)
474. Heger, Katja, 2016: Makrofossilanalys av sediment från det tidig-holocena undervattenslandskapet vid Haväng, östra Skåne. (15 hp)
475. Swierz, Pia, 2016: Utvärdering av vattenkemisk data från Borgholm kommun och dess relation till geologiska förhållanden och markanvändning. (15 hp)
476. Mårdh, Joakim, 2016: WalkTEM-undersökning vid Revingehed provpumpningsanläggning. (15 hp)
477. Rydberg, Elaine, 2016: Gummigranulat - En litteraturstudie över miljö- och hälsopåverkan vid användandet av gummigranulat. (15 hp)
478. Björnfors, Mark, 2016: Kusterosion och äldre kustdyners morfologi i Skälderviken. (15 hp)
479. Ringholm, Martin, 2016: Klimatutlöst matbrist i tidiga medeltida Europa, en jämförande studie mellan historiska dokument och paleoklimatarkiv. (15 hp)
480. Teilmann, Kim, 2016: Paleomagnetic dating of a mysterious lake record from the Kerguelen archipelago by matching to paleomagnetic field models. (15 hp)
481. Schönström, Jonas, 2016: Resistivitets- och markradarmätning i Ängelholmsområdet - undersökning av korrosiva markstrukturer kring vattenledningar. (15 hp)
482. Martell, Josefin, 2016: A study of shock-metamorphic features in zircon from the Siljan impact structure, Sweden. (15 hp)
483. Rosvall, Markus, 2016: Spår av himlakroppskollisioner - bergarter i nedslagskratrar med fokus på Mien, Småland. (15 hp)
484. Olausson, My, 2016: Resistivitets- och IP-mätningar på den nedlagda deponin Gustavsfält i Halmstad. (30 hp)
485. Plan, Anders, 2016: Markradar- och resistivitetsmätningar - undersökningar utav korrosionsförhöjande markegenskaper kring fjärrvärmeledningar i Ängelholm. (15 hp)



# LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
Sölvegatan 12, 223 62 Lund