Rapporter och meddelanden 136

# SkyTEM-undersökningar på Gotland

Peter Dahlqvist, Carl-Axel Triumf,
Lena Persson, Mehrdad Bastani, Mikael Erlström,
Flemming Jørgensen, Henrik Thulin Olander,
Mattias Gustafsson, Magdalena Thorsbrink,
Kristian Schoning & Phil Curtis

SGU
Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Rapporter och meddelanden 136

# SkyTEM-undersökningar på Gotland

Peter Dahlqvist, Carl-Axel Triumf, Lena Persson,
Mehrdad Bastani, Mikael Erlström, Flemming Jørgensen,
Henrik Thulin Olander, Mattias Gustafsson,
Magdalena Thorsbrink, Kristian Schoning & Phil Curtis

Sveriges geologiska undersökning
2015

ISSN 0349-2176
ISBN 978-91-7403-270-3

Omslagsbild: SkyTEM-undersökningar på Gotland.
Foto: SkyTEM Aps.

Layout: Jeanette Bergman Weihed, SGU
Tryck: Elanders Sverige AB

# Sammanfattning

SGU utförde under hösten 2013 mätningar med SkyTEM-metoden inom fyra områden på Gotland för att kartlägga geologin i tre dimensioner. Primärt syftade undersökningen till att studera de hydrogeologiska förutsättningarna för grundvattenuttag inom områdena. Övriga användningsområden för data nämns endast undantagsvis i denna rapport.

Data från undersökningen är av god kvalitet och har många användningsområden. Mängden data är stor, den motsvarar cirka 80 000 geofysiska sonderingar ned till ca 200 m djup. Den analys av data som redovisas i denna rapport är översiktlig, förutom i några avseenden och områden där data analyserats mer ingående. Denna rapport ska således inte ses som en slutprodukt av undersökningen utan som en övergripande redovisning av metoden, vilka data som finns tillgängliga och ett antal exempel på vad man kan få fram, och hur man kan arbeta och presentera den.

Utvärderingen av SkyTEM-mätningarna har gjorts med stöd av data från markbundna geofysiska mätningar, ett antal för ändamålet borrade brunnar och geofysisk borrhålsloggning i dessa.

Resultaten visar att mätmetoden, SkyTEM, lämpar sig mycket väl för undersökning av den gotländska geologin. Metoden kan utgöra en viktig del för kommande geologiska och hydrogeologiska undersökningar inom andra områden på Gotland och i områden med liknande geologi.

Tolkningen av mätresultaten har resulterat i att ett antal områden pekats ut som intressanta för framtida undersökningar när det gäller större grundvattenuttag. För vart och ett av undersökningsområdena har en karta tagits fram, som visar djupet till den nivå där man riskerar salt grundvatten vid borrningar.

Resultaten från undersökningarna kan användas av regionen, länsstyrelsen, konsulter m.fl. som underlag för t.ex. planering av vattentäkter, vattenskyddsområden, arbete med vattenförvaltning, tillståndsgivning och tillsyn av energibrunnar.

**INNEHÅLL**


**Sammanfattning** ..... **3**

**Inledning** ..... **7**

**Bakgrund** ..... **7**

**Mål och syfte** ..... **7**

**Genomförda undersökningar och metoder** ..... **8**
SkyTEM ..... 8
Borrning ..... 8
Borrhålsloggning ..... 9
Geofysiska markmätningar ..... 10
Övriga data ..... 10

**Metodik** ..... **11**
Mätning med SkyTEM ..... 11
Kvalitetskontroll och bearbetning ..... 11
Övergång från geofysisk information om resistivitet till geologi och hydrogeologi ..... 12
Översättning av resistivitet till saltvattennivå i Gotlands bergartsvolym ..... 13
Effekten av färskvatten på resistiviteten i en geologisk enhet ..... 15

**Geologisk uppbyggnad** ..... **16**
Gotlands berggrund ..... 16
Topografi ..... 17
Lagring och bildningsmiljö ..... 18
Tektonik (sprickor, förkastningar, lineament) ..... 18
Karstvittring ..... 18
Berggrunden inom undersökta områden ..... 19

**Gotlands jordartsgeologiska förhållanden** ..... **20**
Morän ..... 20
Isälvsmaterial och friktionsjord ..... 20
Övriga jordarter ..... 21

**Gotlands hydrogeologiska förhållanden** ..... **22**
Grundvatten i berg ..... 22
Grundvatten i jord ..... 22
SGUs hydrogeologiska kartläggning ..... 23
Grundvattnets kvalitet ..... 23
Grundvattentransport ..... 23
Nyttjande av grundvatten ..... 25

**Undersökta områden** ..... **26**
Område 1. Mellersta Gotland ..... 26
Område 2. Visby Ö ..... 27
Område 3. Lummelunda ..... 29
Område 4. Fårö ..... 31

**Resultat och områdesspecifika tolkningar** ..... **32**
Område 1. Mellersta Gotland ..... 32
Område 2. Visby Ö ..... 35
Område 3. Lummelunda ..... 39
Område 4. Fårö ..... 45

**Diskussion och slutsatser** ..... **54**

**Referenser** ..... **56**

**Bilaga 1. Medelresistivitet för valda intervall** ..... **58**

**Bilaga 2. Geofysiska markmätningar** ..... **72**

**Bilaga 3. Brunnsprotokoll** ..... **82**

**Bilaga 4. Data från borrhålsloggning** ..... **92**

**Bilaga 5. 3D-modeller** ..... **106**

# Inledning

Merparten av undersökningsresultaten i rapporten baseras på geofysiska mätningar inom fyra områden på Gotland. Mätningarna är utförda med en helikopterburen transient elektromagnetisk utrustning (SkyTEM). Förutom dessa mätningar har undersökningen omfattat tio undersökningsborrhål samt geofysiska mark- och borrhålsmätningar.

Huvudsyftet med mätningarna har varit att visa hur TEM-metodiken kan ge användbar geologisk information om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad med bäring på identifiering och avgränsning av grundvattenmagasin och salt grundvatten. Det finns ett stort antal andra användningsområden för dessa data men i denna rapport fokuserar vi på grundvattenfrågan.

# Bakgrund

Region Gotland har årligen återkommande problem med tillgången på dricksvatten i samband med sommarmånadernas tillfälliga ökning av människor och tillhörande stora vattenförbrukning. Bristen är främst orsakad av att grundvattenmagasinen i jordlagren och berggrunden på Gotland är små eller dåligt kända. Tunna jordlager och relativt tät berggrund gör att merparten av nederbörden som faller under höst–vår inte bildar grundvatten utan rinner av från markytan, ofta som tillfälliga ytvattendrag, till Östersjön, eller tas upp av växter. Grundvattenbildningen under sommarperioden är dessutom mycket liten på grund av liten nederbördsmängd, avdunstning och vegetationens vattenupptag. Förutom bristen på grundvattenmagasin påträffas ofta salt grundvatten i grundvattentäkterna på Gotland. Sammantaget finns det därför behov av förbättrad geologisk information som kan vara till hjälp för lokalisering av större grundvattenförekomster (magasin) och kartläggning av var salt grundvatten förekommer.

TEM-mätningarna utfördes av ett danskt företag (SkyTEM Aps) med ca 15 års erfarenheter från omfattande grundvattenkartläggning i Danmark. Med stöd av kompletterande geologisk information från bl.a. borrningar och markgeofysik har en metodik utvecklats med framtagning av tredimensionella modeller av jordlagrens och berggrundens resistivitet för t.ex. bedömning av förekomst och utbredning av större grundvattenmagasin i Danmark.

Mätningarna på Gotland har utförts med ett system som registrerar den elektriska resistiviteten i marken. Mätningarna har gjorts längs parallella mätlinjer med ett linjeavstånd på ca 200 m. Jordlagrens och berggrundens resistivitet har varit möjlig att mäta ner till 200–300 m djup. De variationer i resistivitet som visas i mätdata beror främst på skillnader i porositet, andel lermineral, vattenmättnadsgrad och förekomst av salt grundvatten. Mätresultaten från de enskilda mätlinjerna har efter bearbetning och tolkning sammanfogats till en tredimensionell resistivitetsmodell för respektive område.

För att noggrannare bedöma modellernas bäring på grundvattenförhållandena kompletterades TEM-data med geologisk och geofysisk information från ett antal geofysiska markmätningar och undersökningsborrningar i anslutning till några av de identifierade resistivitetsanomalierna från modellerna.

# Mål och syfte

Målet med undersökningen har varit att den ska resultera i:

- kunskap om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad i tre dimensioner ner till ca 200 m djup.
- underlag till en förbättrad grundvattenmodell för Gotland, avseende avgränsningar och karaktärisering av större grundvattenmagasin.
- information om djupnivåer för salt grundvatten.
- information som möjliggör identifiering och kartläggning av karstområden och begravda dalar.
- information om berggrundens strukturella uppbyggnad på djupet.

Syftet är att den erhållna kunskapen och den insamlade informationen ska kunna användas som geologiskt bedömningsunderlag för Region Gotland, Länsstyrelsen Gotland, Vattenmyndigheten Södra Östersjön, konsulter och mark- och miljödomstolen i samband med frågor som berör grundvatten, geoenergi, ballast och industrimineral.

En långsiktig målsättning är att SGU ska arbeta vidare med att utveckla denna typ av undersökningar för att öka kunskapen om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad och grundvattnets förekomst.

# Genomförda undersökningar och metoder

## SKYTEM

SkyTEM är ett helikopterburet elektromagnetiskt mätsystem som mäter den elektriska resistiviteten ner till 200–300 m djup. Den elektriska resistiviteten är inversen av den elektriska konduktiviteten (ledningsförmågan). Variationerna i den elektriska resistiviteten i jordlagren och berggrunden på Gotland beror framför allt på skillnader i porositet mellan olika geologiska enheter liksom deras innehåll av lermineral och vatten. Vattnets salthalt är också avgörande då salt grundvatten markant sänker den elektriska resistiviteten.

SkyTEM är benämningen för själva mätsystemet som Århus universitet använder sig av. Till detta har de utvecklat en programvara (Aarhus Workbench) för kvalitetskontroll, bearbetning och olika slag av inversioner (inversmodellering) av SkyTEM-data. Genom att koppla resistiviteten till andra geologiska data, som t.ex. information från brunnar, blir tolkning av inversionsresultaten till geologi (fig. 1).

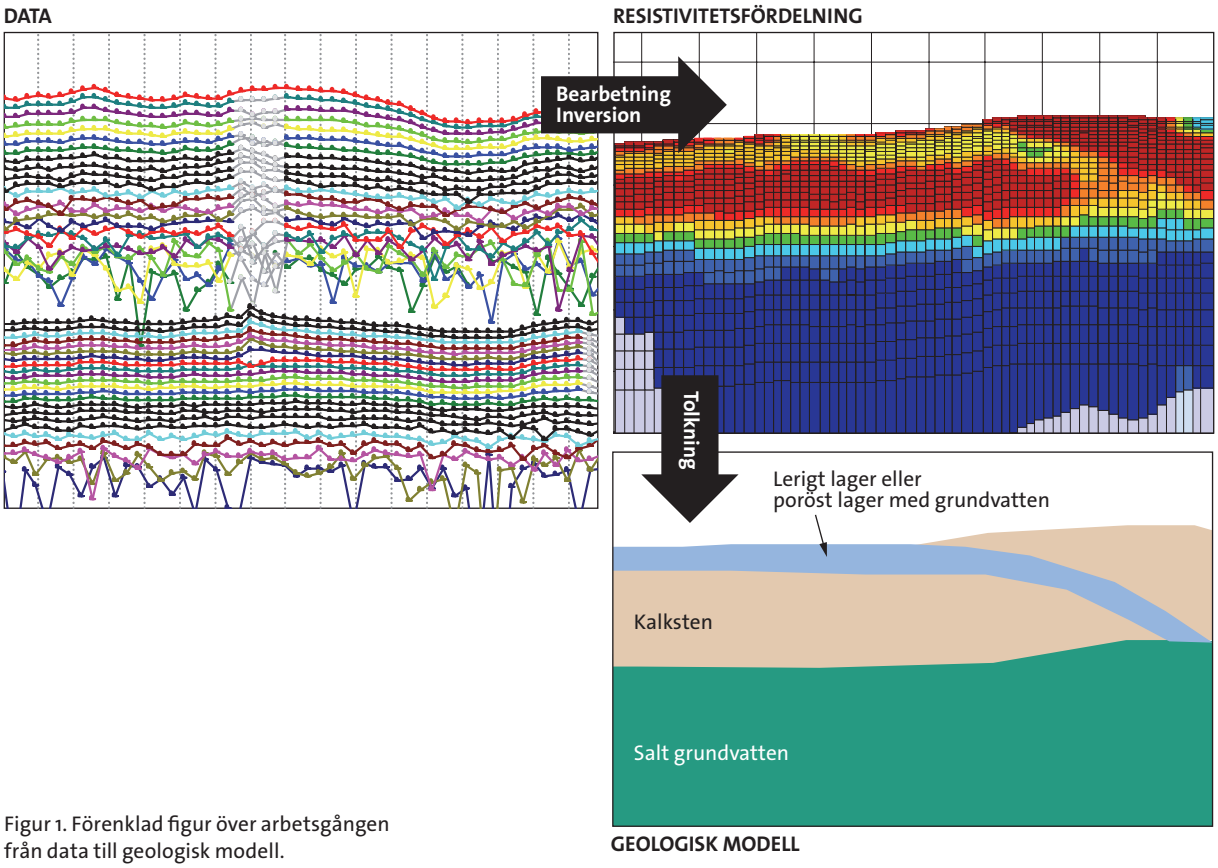
En beskrivning av SkyTEM-metoden och bearbetningen samt tolkningen av data beskrivs ytterligare i avsnittet Metodik.

Mätningar med SkyTEM genomfördes inom fyra områden på Gotland (fig. 2):

- Område 1. Mellersta Gotland.
- Område 2. Visby Ö.
- Område 3. Lummelunda.
- Område 4. Fårö.

## BORRNING

Undersökningsborrningar (borrhålsdiameter 115 mm) utfördes på tio platser till mellan 81 och 130 m djup inom undersökningsområdena (fig. 2, tabell 1). Syftet med borrningarna var att samla in information om berggrundens huvudsakliga uppbyggnad, främst djupnivåer för kalkstens- och märgelstenslager och vattenflöde. Dessutom användes borrhålen för att med hjälp av borrhålsloggning mäta resistiviteten i berggrunden. Brunnsprotokoll från samtliga borrningar redovisas i bilaga 3. Efter slutförd borrning till överenskommet djup blåstes borrhålet rent. Därefter utfördes borrhålsloggning av Avdelningen för teknisk geologi vid Lunds tekniska högskola.



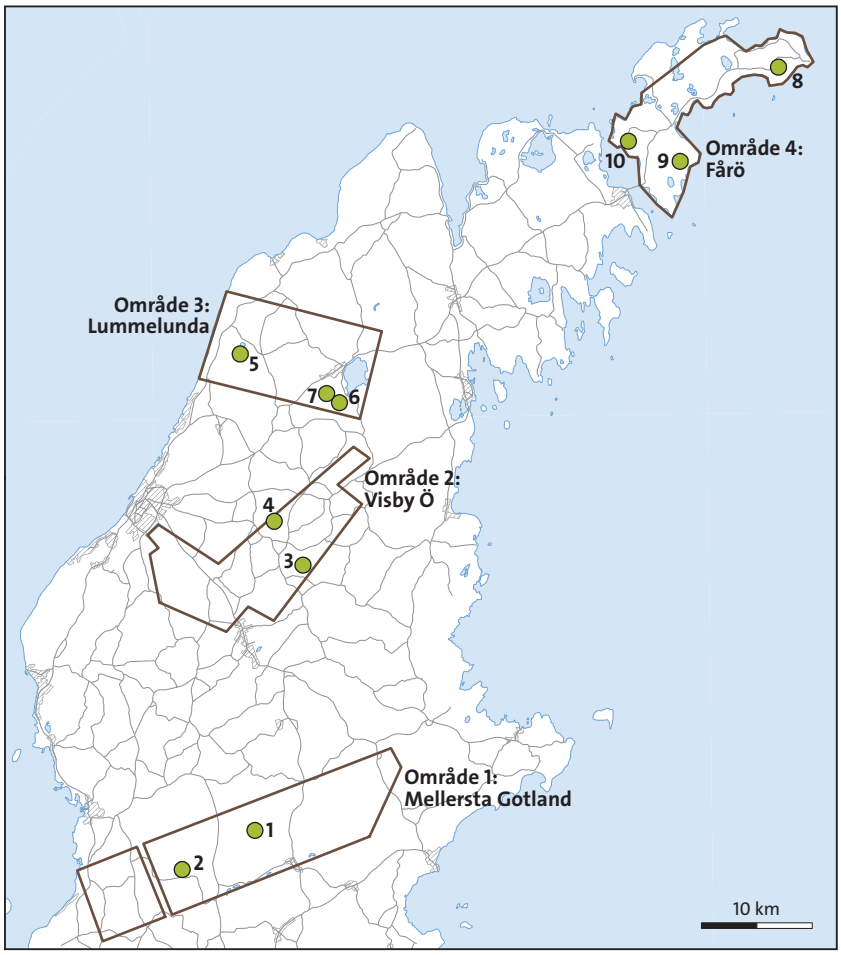

Figur 1. Förenklad figur över arbetsgången från data till geologisk modell.

## BORRHÅLSLOGGNING

Borrhålsloggning utfördes i sju av borrhålen, borrhål 1–6 och borrhål 9 (fig. 2) i november 2014. Övriga borrhål kunde inte mätas på grund av tidsbrist eller tekniska problem. Mätningarna inkluderade loggning med mätsonder som mäter temperatur, vattnets konduktivitet, resistivitet, självpotential och gammastrålning. I borrhålen 2, 5 och 9 utfördes även en mätning med ”*Acoustic Televiewer Sond*” (ATS) som resulterar i en högupplöst, orienterad ultraljudsbild av borrhålsväggen. Borrhålsloggarna, förutom resultaten från mätningarna med ATS, redovisas i bilaga 4. Mer ingående information om metoderna samt tolkade resultat från borrhålsloggningen redovisas i Alm (2014).

Tabell 1. Information om borrhålen och de geofysiska markmätningarna. Nivån för markytan vid borrhålen (m ö.h. = m över havet) är tagen från GSD-höjddata, grid 2+, noggranhet ±0,25m (Lantmäteriet). Grundvattenytan (m u.m.y. = m under markytan) uppmätt 8–14 november 2014.

| Borrhåls-nummer | Djup (m) | Nivå markyta (m ö.h.) | Jorddjup (m) | Uppskattad vatten-mängd (l/tim) | Loggnings-djup (m) | Grundvattenyta (m u.m.y.) | Markmätning Metod/längd |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 130 | 53 | 0,1 | 15 000 | 122 | 2,5 | RMT/1 200 m |
| 2 | 90 | 74 | 1,6 | 1 500 | 74 | 8,5 | RMT/1 000 m |
| 3 | 110 | 26 | 3,4 | 9 000 | 104 | 1,7 | ERT/700 m |
| 4 | 110 | 57 | 1,2 | 1 500 | 104 | 17,6 | – |
| 5 | 82 | 42 | 1,8 | 6 000 | 31 | 0,7 | – |
| 6 | 130 | 51 | 0,1 | 9 000 | 120 | 4,0 | – |
| 7 | 115 | 45 | 1,1 | 1 200 | – | – | RMT/500 m |
| 8 | 81 | 13 | 2,8 | 12 000 | – | – | – |
| 9 | 90 | 14 | 0,1 | 15 000 | 86 | 5,4 | RMT/600 m |
| 10 | 105 | 8 | 0,1 | 6 000 | – | – | RMT/1 200 m |
| – | – | – | – | – | – | – | RMT/1 350 m |




Figur 2. Lokalisering av de fyra områden (svarta ramar) på Gotland där mätningar med SkyTEM genomförts. Lägen för borrningar och borrhålsmätningar som utförts visas också. Vid borrhål 1, 2, 3, 7, 9 och 10 samt strax nordost om borrhål 10 utfördes även geofysiska markmätningar längs profiler. Profilernas läge visas i bilaga 2 och i respektive områdesbeskrivning. Mer information om borrhålen och profilerna finns i tabell 1.

## GEOFYSISKA MARKMÄTNINGAR

Elektriska och elektromagnetiska markmätningar utfördes i oktober 2014 längs sju profiler (500–1 350 m långa) på ett urval av platser för att undersöka intressanta anomalier som indikerats i SkyTEM-data. Syftet med markmätningarna var att erhålla mer detaljerad information om resistivitetsfördelningen i marken. Resultaten användes för att jämföra och verifiera resultaten från de resistivitetsmodeller som skapats med SkyTEM-data. Resultaten utgjorde också underlag vid val av lokaliseringen av borrhål. Två metoder har använts: radiomagnetotellurik (RMT) och elektrisk resistivitetstomografi (ERT). Sex profiler mättes med RMT och en profil med ERT. Profilernas lokalisering visas i figurer i avsnitten för respektive område. Resultaten från undersökningarna har använts i de områdesvisa beskrivningarna och redovisas i sin helhet i bilaga 2 tillsammans med metodiken för RMT- och ERT-mätningarna.

## ÖVRIGA DATA

I tolkningsarbetet har även ingått befintlig information från SGUs databaser och arkiv i form av brunnsdata, tidigare utförda georadarmätningar och OPAB-data i form av seismogram och borrhålsinformation. Till stöd för arbetet har även berggrundsdata från berggrundskartläggningen av Gotland åren 2006–2009 ingått (Erlström m.fl. 2009).

# Metodik

## MÄTNING MED SKYTEM

Mätningarna med det helikopterburna SkyTEM-systemet utförs på 30–50 m höjd över marken med en sändarram och mottagarspolar. Sändardelen utgörs av en drygt 300 $m^2$ stor ram som innehåller en kabelslinga som hänger under helikoptern (fig. 3).

I sändarramens kabelslinga skickas det regelbundet ut en kraftig ström. När strömmen momentant stängs av induceras en ström i marken som försöker efterlikna den i kabelslingan. Strömmen i marken sprider sig därefter ringformigt nedåt och utåt i marken (fig. 4).

I mottagarspolarna, som sitter på ett stativ kopplat till ramen (fig. 4), mäts hur det magnetiska fältet från strömmen i marken klingar av som funktion av tid efter strömavslag. Vid mätningar över en högresistiv jord- eller bergvolym är den uppmätta signalen i mottagarspolarna svag i jämförelse med de över en lågresistiv volym. Signalen kan t.ex. vara tusen gånger starkare från en jord- eller bergvolym med en resistivitet som bara är en hundradel av resistiviteten i en annan jord- eller bergvolym.

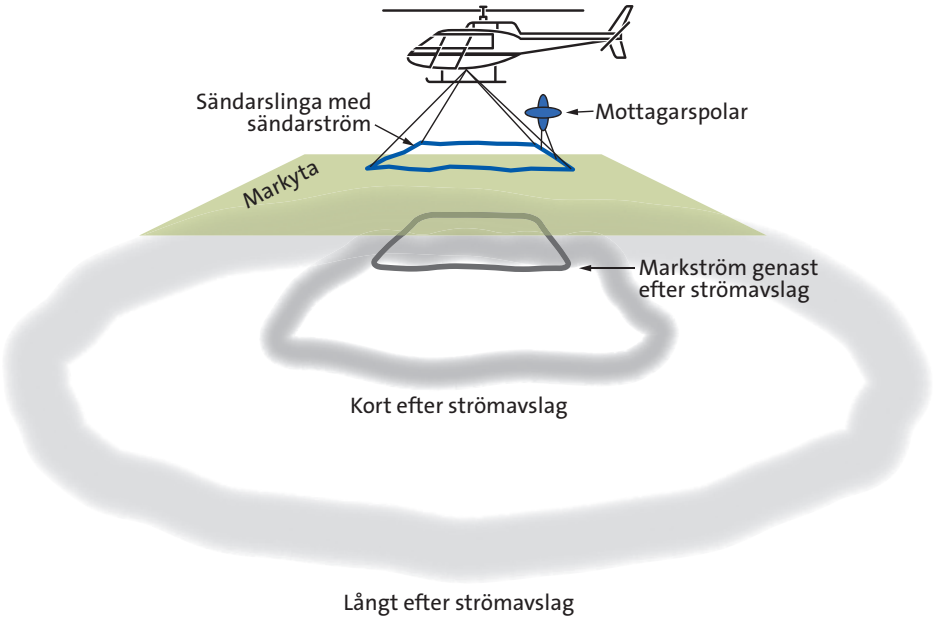
Signalen i mottagarspolen registreras tillsammans med helikopterns geografiska position, sändarramens läge och lutning, strömstyrkan i kabelslingan och flyghöjden över markytan. I samband med varje flygpass genomförs tester och kalibrering av mätsystemet. Kontrollerna utförs på hög flyghöjd utan påverkan av markförhållandena.

Flygpassen på Gotland varade i regel ett par timmar. Mätningarna utfördes med ca 200 m linjeavstånd. Totalt flög helikoptern 2 749 km fördelat på 11 dagar för mätningarna på Gotland. Det ska tilläggas att förhållandena inte var optimala med tanke på korta arbetsdagar och några dagar med utebliven eller mycket liten produktion på grund av låg molnbas. Det är viktigt för en smidig och säker mätning att information om eventuella ledningar, master och höga byggnader i mätområdet har samlats in. Även information till allmänhet är viktig, bl.a. med hänsyn till betande tamdjur som kan skrämmas av helikoptern och mätramen. Med hänsyn till dessa förutsättningar blir flygstråken ofta inte lika raka som i ursprungsplanen. Flygstråkens slutgiltiga läge framgår av de tekniska rapporter som mätoperatören SkyTEM levererat till SGU (SkyTEM 2013a, b, c, d).

## KVALITETSKONTROLL OCH BEARBETNING

Efter varje flygpass kontrollerar mätgruppen datakvaliteten (för ingående information se SkyTEM 2013a). Godkänns inte kvaliteten görs en ny mätning. I vissa fall kan dock den dåliga kvaliteten bero på störningar från

Figur 3. SkyTEM-systemet vid mätning på Gotland. Foto: Mattias Gustafsson, SGU.




Figur 4. Grundprincipen för SkyTEMs mätsystem och strömutbredning i markvolymen, en så kallad rökring (smoke ring).

kraftledningar, elstängsel och järnvägar och då finns inga andra möjligheter än att acceptera dessa störningar.

Efter att alla mätdata blivit kvalitetsgranskade och godkända, börjar bearbetningen med filtrering för att få fram de data som kan användas i den slutliga inversionen (inversmodellering). Filtreringen innebär bl.a. manuell kontroll och rensning av störda data.

Vid inversionen delas jord- och bergvolymen upp i flera lager där varje lager ges en mäktighet och en startresistivitet. Resistiviteten för modellens olika lager anpassas successivt i en automatisk, iterativ process till dess att modellen ger ett avklingningsförlopp som efterliknar det som uppmätts. När anpassningen mellan modellerad och uppmätt avklingningskurva är tillräckligt god har inversionen resulterat i en möjlig fördelning av den elektriska resistiviteten i jord- och bergvolymen. Inversionen av samtliga SkyTEM-data på Gotland har genomförts med s.k. utjämnande inversion (*smooth inversion*, 19–30 lager) genom att resistiviteten kontinuerligt ändras från lager till lager.

Vid inversionen är det också möjligt att använda färre lager (ofta tre till fem) vilket, till skillnad från den utjämnande inversionen, resulterar i skarpa gränsytor mellan lagren. För att denna modell med få lager ska ge ett bra resultat krävs oftast en god kännedom om antalet lager och lagergränser. Antalet lager bör inte heller ändras nämnvärt utmed mätprofilen. Fålagersmodellen kan skapas med de data som insamlats i projektet och kan ge ett bra resultat över mindre undersökningsområden.

Inversionsmetodiken som huvudsakligen har använts för SkyTEM-data från Gotland baseras på s.k. SCI (*spatially constrained inversion*). Metodiken bygger på att ta hänsyn till data i mätpunkten som ska inverteras men också till data från närliggande mätpunkter, såväl längs den aktuella mätprofilen som från de närmsta profilerna.

De inställningar som använts i programvaran Aarhus Workbench vid bearbetningen av SkyTEM-data från Gotland beskrivs inte närmare här då de saknar allmänintresse.

## ÖVERGÅNG FRÅN GEOFYSISK INFORMATION OM RESISTIVITET TILL GEOLOGI OCH HYDROGEOLOGI

Inversionen av SkyTEM-data resulterar i en tredimensionell beskrivning av hur resistiviteten varierar i marken. För att denna resistivitetsbeskrivning ska vara användbar i exempelvis hydrogeologisk modellering behöver resistivitetsfördelningen översättas till geologiska och hydrogeologiska enheter. För detta behövs en översättningstabell där ett visst resistivitetsintervall motsvarar en viss typ av geologisk enhet. Det finns ingen entydighet i sådana översättningstabeller eftersom resistivitetsintervallen för olika geologiska enheter ofta överlappar varandra. Geologisk kunskap är nödvändig för att förutsäga den troliga lagerföljden utifrån stödjande information såsom geologiska kartor och borrhål.

På Gotland har geofysiska och geologiska undersökningar genomförts av bland annat SGU (Erlström m.fl. 2009, Erlström & Persson 2014). Inversionsresultaten från SkyTEM har tillsammans med i projektet ingående mark- och borrhålsmätningar och tidigare undersökningsresultat gett en preliminär översättningstabell där det går att utläsa vilket resistivitetsintervall som kan vara typiskt för ett visst geologiskt material på Got-

Tabell 2. Ungefärliga resistivitetsintervall för olika geologiska material på Gotland (gvy = grundvattenytan). Tabellen är huvudsakligen baserad på resultat från Erlström m.fl. (2009), Erlström & Persson (2014) samt från de nu genomförda undersökningarna med SkyTEM, ERT, RMT och borrhålsloggning.

| Geologisk, hydrogeologisk enhet eller markanvändning | Grundvatten-miljö | Resistivitets-intervall (Ωm) | Kommentar |
|---|---|---|---|
| Torv, lera, gyttja | Sött | 10–50 | Osäkert resistivitetsintervall då lera kan finnas av olika typer |
| Sand, grus | Över gvy | >300 | Förekommer på Fårö, bl.a. som dyner |
| Sand, grus | Sött | 80–200 | Inblandning av lera eller silt i sand- eller grusavlagringar sänker resistiviteten |
| Jordbruksmark | Sött | 10–50 | Lerrikare jord med sötvatten |
| Morän (lerig) | Sött | 30–80 | Lerrikare jord med sötvatten |
| Kalksten | Över gvy | >1000 | Sprick- och porfattig kalksten har de högsta resistiviteterna |
| Kalksten | Sött | 150–1000 | Sprick- och porfattig kalksten har de högsta resistiviteterna |
| Kalksten | Salt | 10–200 | Sprick- och porfattig kalksten har de högsta resistiviteterna |
| Märgelsten | Sött | 50–200 | |
| Märgelsten | Salt | 10–80 | |
| Bergartsled mättade med salt grundvatten | Salt | <40 | Se diskussion i avsnittet Översättning av resistivitet till saltvattennivå i Gotlands bergartsvolym |

land (tabell 2). I tabellen finns renodlade geologiska enheter som kalksten och märgelsten. För stora volymer av renodlade enheter fungerar sannolikt tabellen väl, men i många fall finns blandningar där t.ex. kalkstenslager som är ganska tunna varvas med märgelrika skikt. I sådana områden blir bergmassans resistivitet någonstans mellan de två ytterligheterna vilket försvårar tolkningarna.

## ÖVERSÄTTNING AV RESISTIVITET TILL SALTVATTENNIVÅ I GOTLANDS BERGARTSVOLYM

Nedan används begreppen konduktivitet och resistivitet. De är varandras inverser, dvs. konduktiviteten = 1/resistiviteten. Konduktiviteten anges i S/m och resistiviteten i Ωm.

Tidigare geofysiska undersökningar på Gotland har visat att de högsta resistivitetsnivåerna erhålls där kalkstenar dominerar medan betydligt lägre nivåer uppträder i märgeldominerade områden (Erlström m.fl. 2009, Erlström & Persson 2014). Tidigare utförda markmätningar med RMT-metoden på mellersta Gotland (inom område 1) har även visat att revartad kalksten som ligger ovanför det salta grundvattnet har mycket hög resistivitet (ofta över 1 000 Ωm) medan märgelstenen har en resistivitet omkring 50–200 Ωm (Erlström & Persson 2014).

Effekten av det salta grundvattnet på bergmassans resistivitet är viktig att belysa då den har betydelse för tolkningen av SkyTEM-data med avseende på djupet till det salta grundvattnet. Det önskvärda vore att kunna anta att ett specifikt resistivitetsvärde motsvarar saltvattengränsen i en resistivitetskolumn, men det finns anledning att ifrågasätta om situationen är så enkel.

För att beräkna resistiviteten för en berggrundsvolym har traditionellt Archies lag (Archie 1942) använts. Archies lag förutsätter dock att matrix (själva grundmassan i bergarten) i vilken porerna finns är en isolator. Matrix har alltså extremt låg elektrisk ledningsförmåga, dvs. dess resistivitet är närmast oändligt hög. Det är därför de vattenfyllda porerna står för hela bidraget till den elektriska ledningsförmågan. I en del bergarter är Archies antagande om en icke-ledande matrix giltig. Exempelvis har kristallina bergarter som granit och gnejs en försumbar ledningsförmåga i matrix där kvarts och fältspater dominerar. Möjligen tillhör också kalkstenen på Gotland denna grupp. I lerrika bergarter, som märgelsten, är däremot lerinnehållet påtagligt och lerornas ytledningsförmåga ställer därför till problem som gör att Archies lag inte kan tillämpas på enkelt sätt. Problemet har avhandlats av flera där ofta Waxman & Smits (1968) är refererade. Glover m.fl. (2000) har tagit fram en modifierad version av Archies lag som gäller för två konduktiva faser, deras version inbegriper en elektriskt ledande matrix samt en ledande porvätska.

*Ekvation 1*

$$\sigma_{eff} = \sigma_1 \varphi_1^p + \sigma_2 \varphi_2^m$$

$\sigma_{eff}$ = bergmassans konduktivitet [S/m]
$\sigma_1$ = solida fasens (matrix) konduktivitet [S/m]

$\sigma_2$ = vätskefasens (porfyllnadens) elektriska konduktivitet [S/m]
$\varphi_1$ = volymandel av solid fas
$\varphi_2$ = volymandel av vätskefas
$(\varphi_1 + \varphi_2) = 1$
*p*, *m* representerar konnektiviteten (även kallad cementationsfaktorn) för medium 1 och medium 2

Glover m.fl. (2000) använde ett specifikt randvillkor som anses gälla för ”granular porous media”, dvs. ett kornigt poröst medium där porerna är fyllda med elektriskt ledande vätska. Det leder till att ekvation 1 kan uttryckas som

*Ekvation 2*

$$\sigma_{eff} = \sigma_1(1-\varphi_2)^{\left(\frac{\log(1-\varphi_2^m)}{\log(1-\varphi_2)}\right)} + \sigma_1\varphi_2^m$$

Waxman & Smits (1968) publicerade en tabell med parametrar för 27 lerrika sandstenar. Även om märgelstenen inte är en sandsten så har sambanden använts i nedanstående resonemang. Glover m.fl. (2000) använde resultaten från Waxman & Smits (1968) för att fastställa värden på parametrarna *p* och *m* i ekvation 1.

I arbetet med SkyTEM-data från Gotland har resultaten från Glover m.fl. (2000) använts för att beräkna ett möjligt konduktivitetsvärde hos matrix i märgelstenen. Beräkningen har genomförts med antagandena att märgelstenen har en porositet av 20 % och att porerna är fyllda med sötvatten vars konduktivitet är 0,06 S/m. Sötvattnets konduktivitetsvärde baseras på de mätningar som har genomförts av Thulin Olander (2014). Märgelstenens resistivitet för hela volymen inkluderande matrix och porer antas vara 100 Ωm utifrån en resistivitetsprofil som redovisats av Erlström & Persson (2014). Vid beräkningen har cementeringsfaktorn *m* getts värdet 1,96 vilket baserar sig på ett medelvärde av de värden på *m* som framräknats av Glover m.fl. (2000) utifrån Waxman & Smits (1968) 27 prover. Matrix konduktivitet i märgelstenen blir då 0,0078 S/m, vilket motsvarar ca 130 Ωm.

Om sedan konduktiviteten för matrix läggs in i den modifierade versionen av Archies lag enligt Glover m.fl. (2000) så kan effekten av salt grundvatten på bergvolymens resistivitet beräknas. Vid beräkningen används *p* enligt Glover m.fl. (2000). Det utgörs av medelvärdet 0,19459 baserat på Waxman & Smits (1968) prover. Beträffande det salta grundvattnets elektriska konduktivitet finns en notering om salt grundvatten i en brunn på Gotland med en kloridkoncentration av 7 000 mg/l (Lindewald 1981). Enligt figur 2–10 i Löfgren (2004) skulle detta värde kunna motsvara omkring 2 S/m (0,5 Ωm). Detta värde är högre än det högsta som registrerats av Thulin Olander (2014).

Porositeten i märgelstenen varierar sannolikt. Här har den antagits ha ett variationsintervall på 5–25 %. Om porerna är fyllda med salt grundvatten (ledningsförmåga 2 S/m, vilket motsvarar resistiviteten 0,5 Ωm) så kommer den elektriska resistiviteten i den saltvattenindränkta märgelstenen att variera från ca 75 Ωm vid porositet 5 % till under 10 Ωm vid porositet 25 % (fig. 5).

I en kalksten är matrix högresistiv, varför Archies lag i ursprunglig form sannolikt kan användas för att beräkna inverkan på bergvolymens resistivitet av salt grundvatten. Ett problem som dock uppträder i kalkstenar är att heterogeniteten i porsystemen är stor, vilket får till följd att ett representativt värde för den s.k. cementationsfaktorn *m* i Archies lag är svår att fastställa. Utredningar om cementationsfaktorn är mycket komplicerade, vilket redogörs av Ballay (2012). Den kan variera mellan ca 1 i okonsoliderade lager och ca 4 i kemiskt cementerade lager. Ett rimligt värde att ansätta här kan vara $m = 2$. Porositeten i kalkstenen antas variera inom samma intervall som för märgelstenen (5–25 %). Det salta grundvattnet antas ha en konduktivitet av 2 S/m (motsvarar 0,5 Ωm).

Archies lag eller ekvation i sin enklaste form:

*Ekvation 3*

$$\sigma_{bergmassan} = \sigma_{porvattnet}\varphi^m$$

$\sigma_{bergmassan}$ = bergmassans konduktivitet [S/m]
$\sigma_{porvattnet}$ = porvattnets konduktivitet [S/m]
$\varphi$ = bergmassans porositet
*m* = cementationsfaktorn (ansatt till 2)

Beräkningarna visar att porositeten 5 % ger en resistivitet av ca 200 Ωm för en saltvattenindränkt bergmassa bestående av en kalksten med de förutsättningar som antagits ovan. När porositeten ökar till 25 % är den saltvattenindränkta bergvolymens resistivitet under 10 Ωm. Figur 5 visar också att kalksten och märgelsten uppvisar ungefär samma resistivitet i bergvolymen när porositeten överstiger 10 %.

I beräkningarna ovan har porositeter, men också de mikrosprickor som kan sägas ingå implicit i Archies modell, använts för att beräkna volymsresistiviteter hos kalksten och märgelsten. I bergarter uppträder emellertid också makrosprickor. Om makrosprickorna fylls med salt grundvatten kommer också dessa att påverka volymsresistiviteten. Thunehed (2000) har beskrivit makrosprickors påverkan på volymsresistiviteten. Thunehed använder en modell av Stesky (1986) och beräknar makrosprickornas inverkan med hjälp av ekvation 4. Ekvationen hanterar ett endimensionellt sprickset och används här för att belysa möjlig påverkan på volymsresistiviteten

hos bergarterna märgelsten och kalksten på Gotland när sprickorna fylls med salt grundvatten.

*Ekvation 4*

$$\sigma = (\sigma_w - \sigma_0) \times F \times e + \sigma_0$$

där enligt Thunehed (2000)
$\sigma$ = bulk conductivity [S/m], bulkkonduktivitet hos bergmassan med porer och sprickor
$\sigma_w$ = pore water conductivity [S/m], por- och sprickvätskans konduktivitet
$\sigma_0$ = rock conductivity between fissures [S/m], bergmassans konduktivitet mellan sprickorna
F = fissure frequency [1/m], sprickfrekvens
e = fissure aperture, geometric mean [m], sprickvidd, geometriskt medelvärde

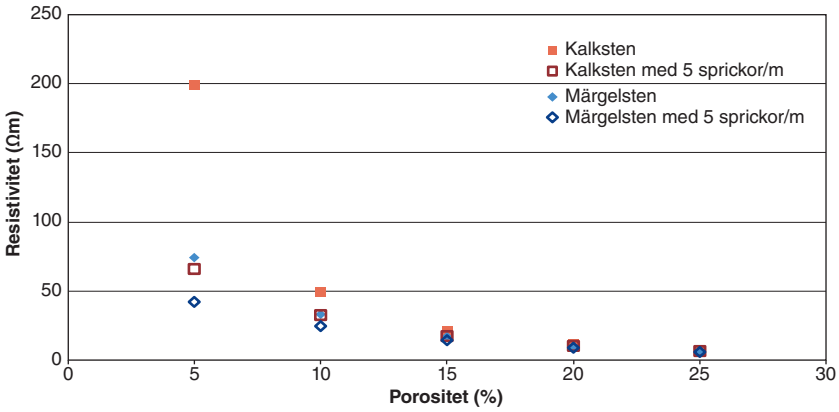
Ekvation 4 ger den elektriska konduktiviteten (inversen av den elektriska resistiviteten) parallellt med sprickriktningen. Med en sprickfrekvens av fem sprickor per meter och en sprickvidd av 1 mm blir bergmassans resistivitet ytterligare sänkt jämfört med inverkan från enbart porositet. Det salta grundvattnet i sprickorna har samma elektriska ledningsförmåga som det som använts för beräkningarna för inverkan av porositeten, dvs. 2 S/m.

Det är i dagsläget oklart inom vilka gränser porositeten varierar i kalksten och märgelsten. Dessutom kan salthalten variera liksom vilken koncentration som man tycker är viktig. Är det smakgränsen på ca 300 mg/l eller är det gränsen till det riktigt salta grundvattnet som t.ex. kan förstöra ledningar och skapa stora problem om det sprider sig till andra akviferer? Tillsammans innebär detta att det är osäkert vilka resistivitetsvärden som kan indikera att berggrunden är mättad med salt grundvatten. Men om porositeten skulle kunna antas vara minst 10 % i de bägge bergartstyperna, och den antagna elektriska ledningsförmågan hos det salta grundvattnet verkligen ligger omkring 2 S/m, då är ett tröskelvärde på cirka 40–50 Ωm rimligt att använda. Det innebär att vid resistivitetsvärden som ligger under 40–50 Ωm torde det finnas ett väsentligt inslag av salt grundvatten i berggrunden när bergarterna domineras av kalksten eller märgelsten. Det är rimligt att anta att inte endast porositet inverkar på bergmassornas resistivitet. En viss sprickighet förekommer också, och där torde sprickor lättare utbildas i den hårda och spröda kalkstenen än i märgelstenen. Med en relativt låg sprickfrekvens av fem sprickor per meter och en sprickvidd av endast 1 mm sjunker volymsresistiviteten markant hos kalkstenen. Det skulle kunna innebära att gränsen omkring 40–50 Ωm för kalksten mättad med salt grundvatten torde kunna gälla också ned till en porositet av endast omkring 5 %.

## EFFEKTEN AV FÄRSKVATTEN PÅ RESISTIVITETEN I EN GEOLOGISK ENHET

Sandkornen, som bl.a. förekommer i sanddynerna på Fårö, kan i sig betraktas närmast som elektriska isolatorer. Om sanden finns ovanför grundvattenytan blir då resistiviteten mycket hög, men resistiviteten sänks när sanden mättas med grundvatten. Genom att använda Archies lag (1942) i sin enklaste form går det att beräkna bulkresistiviteten i en markvolym som består av en blandning av exempelvis sand och färskt grundvatten. Om man antar att de enskilda sandkornen är elektriska isolatorer och att sanden består av 30 % porer mättade med färskt grundvatten med en resistivitet på ca 17 Ωm (motsvarar en konduktivitet av ca 0,0588 S/m), innebär det att bulkresistiviteten för sandlagret blir ca 185 Ωm (m = 2).

Erlström & Persson (2014) visar att den elektriska resistiviteten i kalksten, med låg porositet och få sprickor, även under grundvattenytan kan vara mycket hög, flera tusen Ωm. Om porositeten är hög och sprickor förekommer i kalkstenen så sjunker resistiviteten markant under grundvattenytan (jämför tabell 2). Förekommer det färskvattenfyllda karststrukturer (större hålrum) i kalkstenen så har dessa områden ofta en lägre resistivitet än omkringliggande berg.



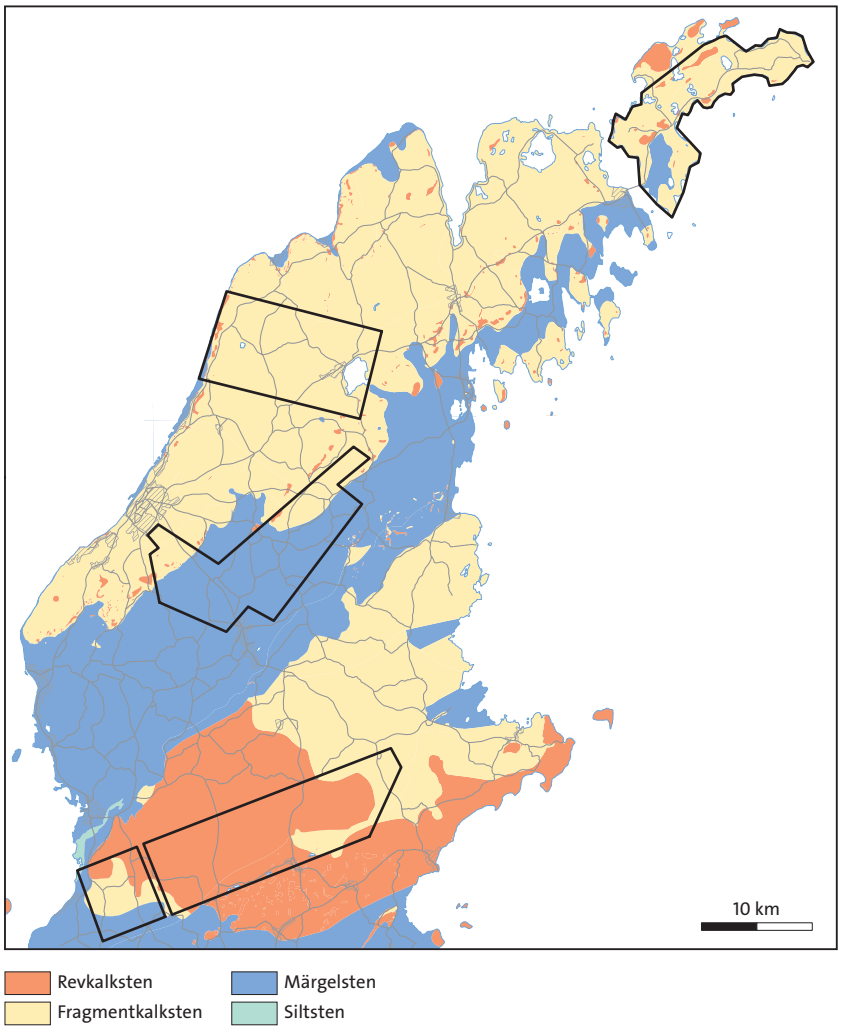

Figur 5. Berggrundsvolymens resistivitet med och utan ett endimensionellt sprickset som funktion av porositet där porerna och sprickorna i märgelstenen respektive kalkstenen är fyllda med salt grundvatten med ledningsförmågan 2 S/m. Sprickvidden är antagen till 1 mm.

# Geologisk uppbyggnad

## GOTLANDS BERGGRUND

Den siluriska berggrunden på Gotland omfattar ett tidsavsnitt på ca 10 miljoner år (428–418 miljoner år sedan). Lagerföljden har en sammanlagd mäktighet på 500–750 m och stupar svagt åt sydsydost (mindre än en grads lutning). Ursprungssedimenten avsattes på en grund shelf (grundhav) som täckte stora delar av centrala Östersjöbäckenet under denna tid. Uppemot tio cykler med avsättning av sediment har dokumenterats (Calner m.fl. 2004). Mellan cyklerna har det varit perioder med erosion då Gotland låg ovanför erosionsbasen (Eriksson 2004). Inom varje cykel är bergarterna generellt grövre och mer karbonatrika i nordost jämfört med i sydväst, där inslaget av märgel och märgelsten (sedimentär bergart med högre lerinnehåll än kalksten) i lagerföljderna är mer påtagligt, till följd av successivt djupare, marina avsättningsförhållanden i sydvästlig riktning.

Den siluriska ytberggrunden (fig. 6) utgör den övre delen av en 250–800 m mäktig sekvens med äldre paleozoiska sedimentära bergarter som överlagrar det kristallina urberget (Erlström m.fl. 2009). Underst finns en kambrisk lagerföljd med sandsten, siltsten och skiffer som överlagras av ordoviciska karbonatdominerade bergarter, inkluderande rev (s.k. *mounds*) ur vilka Oljeprospektering AB (OPAB) utvunnit olja under slutet av 1900-talet (Sivhed m.fl. 2004). Endast ett fåtal borrhål når ner till urberget, som tolkats vara av svekokareliskt ursprung och ha en granitisk sammansättning (Flodén 1980). Urbergsytan utgörs av det s.k. subkambriska peneplanet, som ställvis bryts av lokala höjdområden. Dessa höjder tycks till viss del även styra sedimentationsmönstret i den överliggande sedimentära berggrunden, speciellt förekomsten av ordoviciska rev (Sivhed m.fl. 2004).




Figur 6. Förenklad berggrundskarta över Gotland (efter Erlström m.fl. 2009). De svarta ramarna visar undersökningsområdena.

Den siluriska ytberggrunden på Gotland kan grovt delas in i områden med huvudsakligen kalksten respektive områden med märgel och märgelsten, där även växellagring mellan kalksten och märgel är vanligt förekommande. Inom kalkstensområdena förekommer frekvent revkalksten som framträder tydligt som lokala höjder i höjdreliefkartan och som högresistiva områden på resistivitetskartan (jämför de röda områdena i fig. 7).

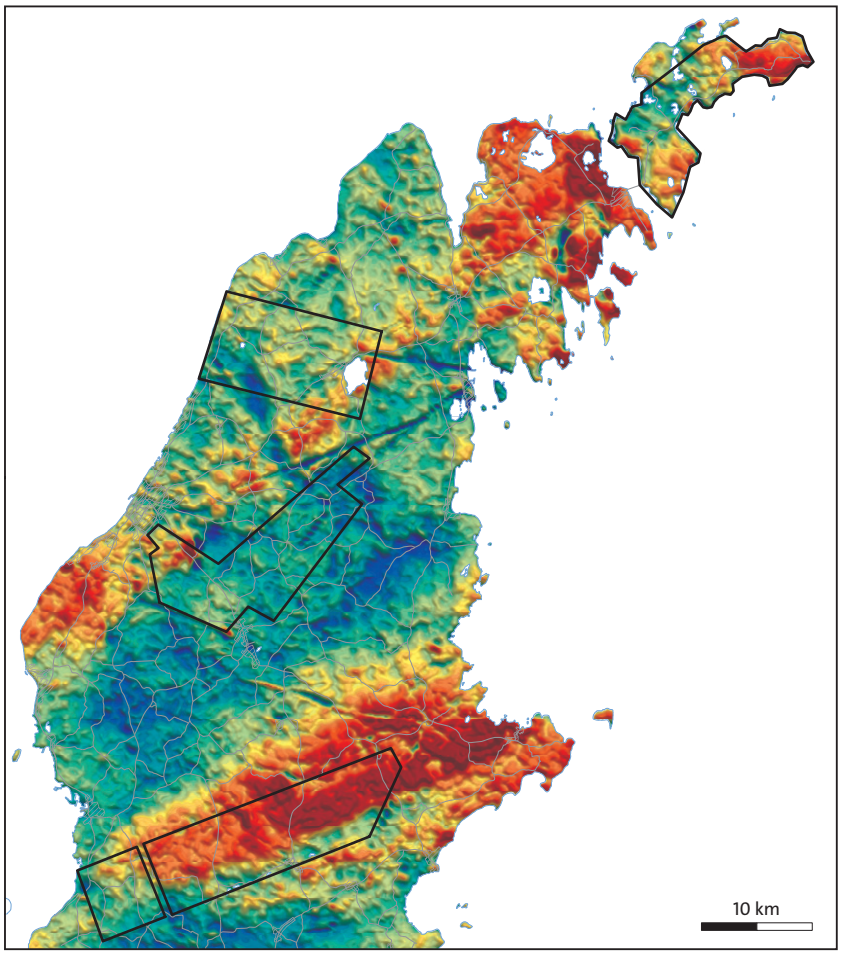
Hällar finns företrädesvis inom områden dominerade av relativt hårdare och homogenare kalkstensberggrund. De lösare och mer lättvittrade bergarterna som märgel påträffas mestadels i kustskärningar och i diken. Uppskattningsvis består 90 % av blottlagd berggrund av kalksten som endast representerar knappt hälften av den berggrund som utgör Gotlands berggrundsyta (Erlström m.fl. 2009).

De dominerande bergarterna inom kalkstensområdena är tunnlagrade (5–20 cm mäktiga lager) kalkareniter och kalcilutiter med flacka överytor. Stora sammanhängande hällområden på norra Gotland domineras av dessa bergartslager. Inslag av grova kalciruditer förekommer, speciellt i de allra nordöstligaste delarna av Gotland, s.k. Ryssnäskalksten på Fårö. Inslag av oregelbundet lagrad stromatoporoidéförande kalksten och stromatoporoidédominerad, massformig, revartad kalksten förekommer insprängda i kalkstensenheterna tillhörande enheterna Högklint, Tofta, Slite, Klinteberg, Hemse och Sundre. Inslag av dessa oregelbundet lagrade och massiva bergarter ger ofta en mer heterogen och sönderbruten topografi. Mäktigheterna på kalkstenskropparna inom t.ex. Slitegruppen och Klintebergsformationen är endast i storleksordningen 10–50 m.

Områden som domineras av märgel och märgelsten förekommer oftast i lågt liggande terräng där jorddjupen är större och blottningsgraden låg. Observationer i dessa områden kommer framför allt från tillfälliga grävningar och kanaler samt från borrningar. De största sammanhängande märgelområdena finns inom Slite- och Hemseenheterna. Dessa områden har generellt en låg resistivitet och framträder tydligt i figur 7 som blåa och gröna områden.

## TOPOGRAFI

Berggrundens uppbyggnad återspeglas till stora delar i landskapets topografi. Områden med hårdare och mindre erosionsbenägna bergarter framträder tydligt som




Figur 7. Skenbar resistivitet beräknad från flygmätta elektromagnetiska data (VLF) över Gotland (efter Erlström m.fl. 2009). Rött = hög resistivitet, grönt = intermediär resistivitet, blått = låg resistivitet. De svarta ramarna visar undersökningsområdena.

höjdryggar. Här är jorddjupen oftast små, vilket bl.a. framkommer av det stora antalet berghällar. Inom två större sammanhängande höjdområden påträffas berggrunden på ca 60 m ö.h. Det ena området sammanfaller i stort med Sliteformationens revartade kalkstenar och sträcker sig från Tofta och Stenkumla ca 10 km sydsydost om Visby i nordostlig riktning upp mot Othem (delvis inom undersökningsområde 2). Det andra höjdområdet finns tvärs över mellersta Gotland mellan Fröjel och Torsburgen (inom undersökningsområde 1). Även inom detta höjdområde påträffas berggrunden som högst på ca 60 m ö.h. och domineras här av hårda revartade kalkstenar. I områden som ligger över 25 m ö.h. är det vanligt med klintbildningar och förekomst av grottor som kan ha ett preglacialt ursprung, även om de till stora delar omformats av kvartära nedisningar och postglacial erosion. Denna är kopplad till havsnivåförändringar i Östersjöområdet, bl.a. under Ancylus- och Littorinatid.

Typiska märgelområden finns kring Hablingbo, Hemse och Havdhem på södra Gotland, där berggrunden domineras av märgel och märgelsten tillhörande den s.k. Hemsemärgeln (fig. 6). Ett annat område finns mellan Västergarn och Slite, där berggrunden domineras av märgel och märgelsten som ofta är växellagrad med hårdare, tunna kalkstenslager. Detta område sammanfaller med den s.k. Slitemärgeln.

## LAGRING OCH BILDNINGSMILJÖ

Generellt stupar Gotlands berggrund 0,2–0,4° åt sydost. Den siluriska berggrundsytan uppvisar lokalt mycket varierande stupningsriktningar och lagring som härrör från den avsättningsmiljö som bergarterna har sitt ursprung i. Under silurisk tid täckte ett grunt hav Gotland. Kusten låg inte långt bort och merparten av sedimenten avsattes i ett kustnära grundhavsområde. Inslaget av terrigent material (lermineral, kvarts m.m.) var mestadels litet, vilket gjorde att sedimenten som bildades och avsattes i denna miljö kom att domineras av karbonatpartiklar från de skalbärande organismer som levde i havet. Periodvis rådde gynnsamma villkor för revbildning. Dessa siluriska rev var inte lika komplexa och väl utvecklade som de rev som bildas idag i varmare områden utan dominerades av svampdjur (stromatoporoidéer) som tillsammans med tabulata koraller byggde upp den rigida, oregelbundet lagrade struktur som vi idag kan se. Hällarna inom områden med revkalksten har ofta en knölig och småbruten morfologi. Reven varierar från enstaka meter till tiotals meter höga strukturer som har en utbredning från några få kvadratmeter till flera kvadratkilometer. Runt reven förekommer talusformade lager som består av grovkorniga fragmentkalkstenar med lösrivet material som rasat ner utmed revsidorna, ofta i samband med stormar. Dessa lager har en linsformad utbredning och stupar bort från revkärnan. Runt större rev kan därför lagrens stupning vara mycket varierande.

Utanför reven, i något djupare vatten, har avsättningsförhållandena varit mer enhetliga vilket resulterat i mer homogent lagrade kalkstensenheter. Ofta är växellagringen mellan lerigare lager (märgel och märgelsten) och kalksten mycket påtaglig. Enskilda lager är oftast mellan 5 och 20 cm tjocka och lateralt uthålliga. Hällområden med dessa typer av berggrund uppvisar tydligt plana lagringsytor.

Typiskt är också att större kroppar med revkalksten trycker ner underliggande berggrund med märgelsten, vilket gör att kontakten mellan kalksten och märgelsten undulerar beroende på tjockleken på reven (jämför Erlström & Persson 2014). Detta påverkar också den lokala stupningen på lagren.

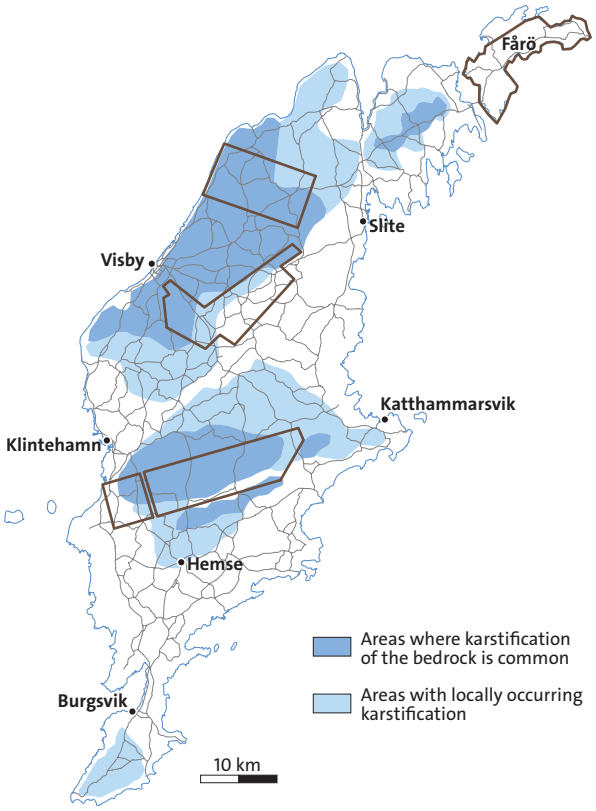
## TEKTONIK (SPRICKOR, FÖRKASTNINGAR, LINEAMENT)

Den siluriska berggrundsytan på Gotland är förhållandevis opåverkad av större tektoniska störningar. Mindre förkastningar, sprickzoner och lineament förekommer dock frekvent. Huvudriktningen för dessa är 270–310° (västnordväst).

De lineament som markerats på bergrundskartan (Erlström m.fl. 2009) har tolkats från höjddata, resistivitetsdata (flygmätt VLF) och magnetiska data (flygmätt magnet). De lineament som tolkats från höjddata och resistivitetsdata indikerar relativt ytnära sprickzoner och förkastningar medan de lineament som tolkats från magnetiska data visar djupare strukturer och deformationszoner i det kristallina urberget. Några huvudriktningar kan urskiljas på kartan: en i nord–nordväst som tydligast framträder i höjddata, en annan i nordost–sydväst som framträder i både höjd- och resistivitetsdata och en tredje i nordväst–sydost som framträder tydligast i magnetiska data.

## KARSTVITTRING

Karst är vanligtvis något som man förknippar med karbonatberggrund på sydligare breddgrader. I Sverige har dock småskalig karst påvisats inom områden som domineras av kalkstensberggrund, som Öland, Gotland, delar av Skåne och i fjällkedjan (Engh 1980). I dessa områden förekommer karst mestadels som urlakning och vidgning av sprickor. Med karst avses bildningar som uppkommit genom kemisk upplösning (korrosion) av karbonatberggrunden. Denna process är ett kemiskt vittringsfenomen, som innebär att den svaga kolsyran i yt- och grundvatten angriper mineralet kalcit ($CaCO_3$) som utgör huvudbeståndsdel i kalksten. Denna kemiska process kan vidga sprickor till gångar




Figur 8. Förekomst av karst på Gotland (efter Erlström m.fl. 2009).

och kanaler i kalkstensberggrunden. Under förhållanden som är gynnsamma för karstbildning kan större hålrum (t.ex. slukhål) och grottor bildas, som Lummelundagrottorna (Engh 1980).

På Gotland förekommer frekvent karstifierade sprickor i områden med kalkstenar som uppvisar hög karbonathalt och som är relativt homogena i sin uppbyggnad, dvs. utan inlagring av märgel och märgelsten. Hällobservationer visar att karst i huvudsak förekommer inom homogena kalkstensplatåer som ligger högre än 25 m ö.h. (fig. 8). Dessa karstsprickor är den vanligaste karsttypen på Gotland. Sprickorna kan vara uppemot 20 cm breda i de ytnära delarna. Omfattningen av karstvittringen på djupet i dessa karstsprickor är relativt okänd eftersom de på djupet är fyllda med barr, löv, grenar, mossa m.m. Som mest är den öppna, ytnära delen ca 60–100 cm djup.

Slukhål är en annan relativt vanligt förekommande karststruktur på Gotland. Med slukhål menas en punkt eller plats där ytvatten försvinner ner i en hålighet i kalkstensberggrunden, t.ex. en bäck som slutar abrupt i anslutning till ett slukhål (t.ex. vid Lummelundagrottan). Stora mängder ytvatten kan dräneras ner i berggrundens karstvittrade spricksystem och grottor via slukhål. Öppna källor i lägre liggande terräng har ofta en koppling till högre liggande slukhål. Dessa källor kan ofta ha ett artesiskt flöde. Förekomsten av karst har mycket stor betydelse för bedömning av grundvattnets sårbarhet. Det har även visat sig att förekomsten av karst har betydelse för risken för markradon.

Förutom de recenta karststrukturerna som bildats efter senaste istiden (Littorinatid) eller möjligtvis under interglacial tid finns det även äldre karst på Gotland, s.k. paleokarst. Dessa stukturer har bildats under silurisk tid i samband med tillfälliga perioder då havsnivån sjönk (regression) då kalkstensberggrunden blivit exponerad och utsatt för kemisk korrosion. Dessa karstnivåer är kända från olika nivåer i Ludlow–Wenlock på Gotland (Cherns 1982, Eriksson 2004, Calner m.fl. 2004). Paleokarstsnivåerna tycks ställvis vara knutna till en förhöjning av magnesium och kloridhalterna i dessa kalkstenslager till följd av indunstning och inflöde av meteoriskt grundvatten.

## BERGGRUNDEN INOM UNDERSÖKTA OMRÅDEN

Tolkningen av berggrundens uppbyggnad inom de undersökta områdena är till merparten baserad på hällobservationer. Denna information är relativt detaljerad avseende bergartsfördelning och stratigrafi. Kunskapen om den siluriska berggrundens uppbyggnad och indelning på djupet är däremot begränsad till ett fåtal detaljerade undersökningar av kärnborrhål. Detta gör att en stratigrafisk klassificering av olika enheters uppträdande på djupet blir mycket svår och osäker. I den översiktliga beskrivningen av respektive område ges därför endast en generell bild av förmodade stratigrafiska enheter på djupet.

# Gotlands jordartsgeologiska förhållanden

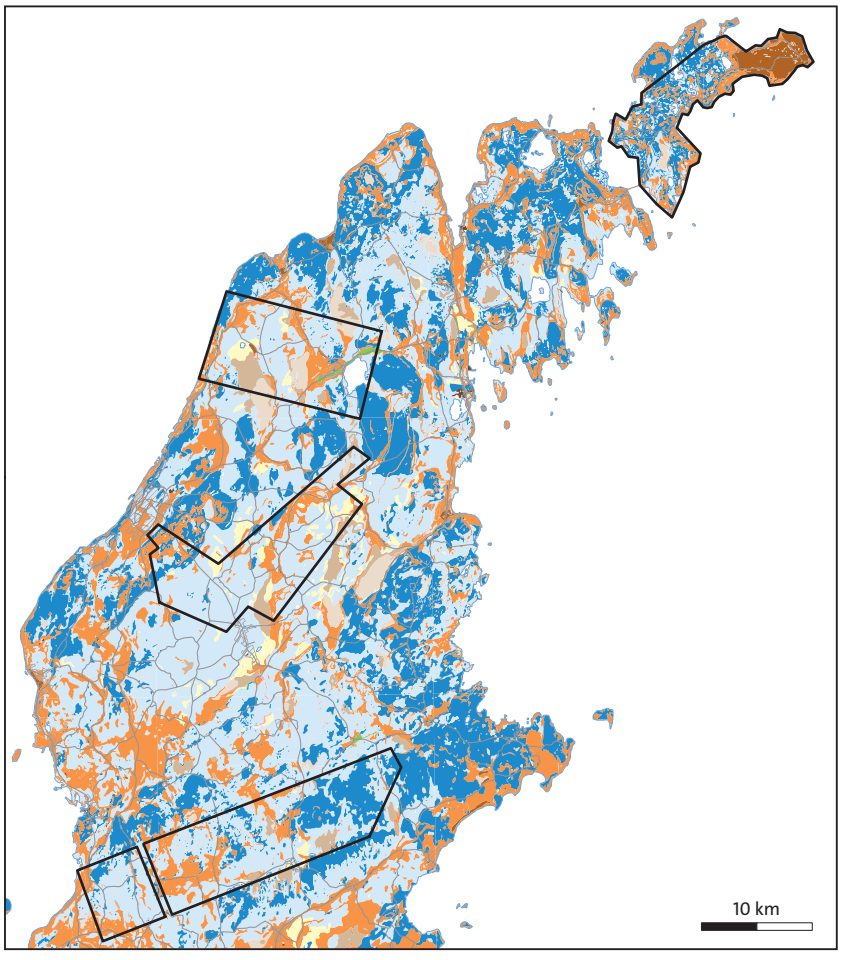
Gotlands jordartsgeologiska förhållanden är starkt knutna till Östersjön och Östersjöns utveckling efter den senaste istiden. När Gotland i slutet av senaste istiden blev isfritt kom hela ön att ligga under baltiska issjöns yta och har sedan dess successivt höjt sig ur Östersjön. Landskapet är därför format av kustprocesser och vågornas verkan som omlagrat, sorterat och omformat äldre jordavlagringar. Jordarter bildade genom strandprocesser har därför stor utbredning på ön och strandvallar och andra landformer kopplade till strandprocesser, har en framträdande roll i landskapet (fig. 9).

## MORÄN

Trots att landskapet är kraftigt påverkat av vågornas bearbetning är morän den vanligast förekommande jordarten på Gotland. Moränen är finkornig och har hög lerhalt, vilket är en konsekvens av att berggrunden till stor del utgörs av relativt mjuka sedimentära bergarter (märgel och märgelsten). De största områdena med morän påträffas i de centrala, norra delarna av ön. I den högre liggande terrängen i de kalkstensdominerade områdena saknas morän och ofta även andra jordarter. Ungefär en fjärdel av Gotlands yta saknar jordtäcke eller har ett mycket tunt och osammanhängande jordtäcke (fig. 10).

## ISÄLVSMATERIAL OCH FRIKTIONSJORD

Den enda större isälvsavlagringen på Gotland är Tingstädeåsen vid Tingstäde träsk. Avsaknaden av isälvsavlagringar är en konsekvens av att det skett en omfat-



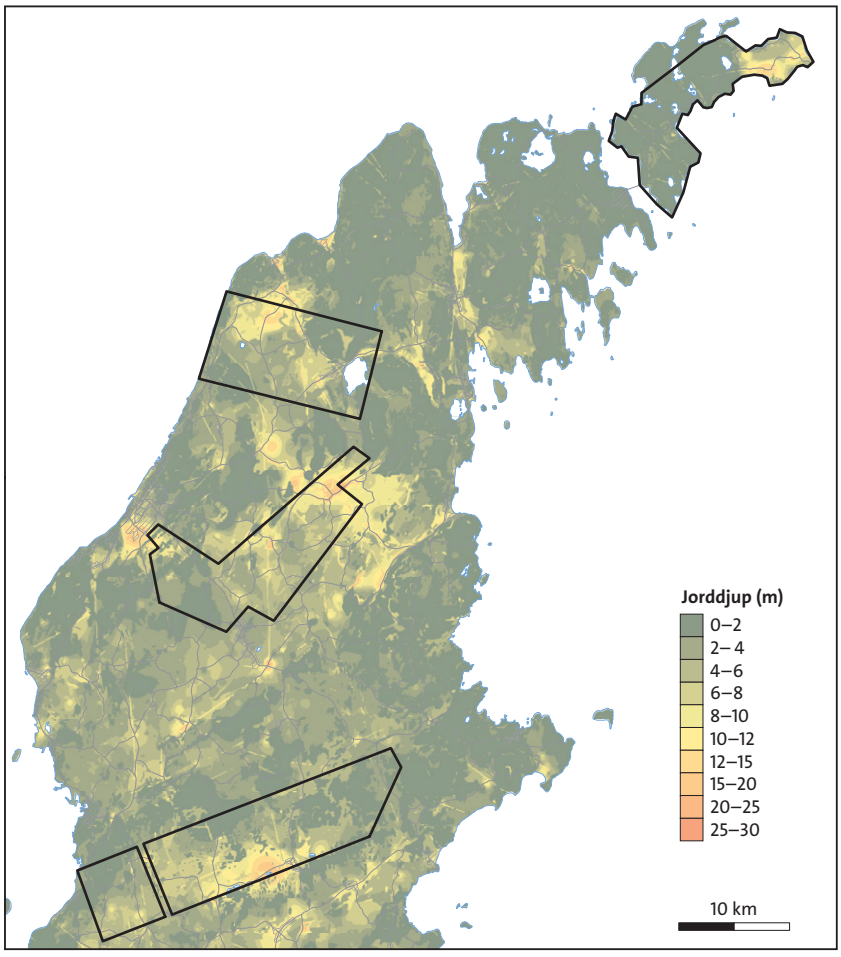

Figur 9. Jordartsgeologisk karta över Gotland.

tande omlagring av jordarterna. De isälvsavlagringar som tidigare fanns har successivt bearbetats av vågor och omlagrats och påträffas nu som svallgrus och svallsand. Ett exempel på omlagring av en trolig isälvsavlagring är Sveriges största sanddynsområde Avanäs på östra delen av Fårö. Ytterligare en konsekvens av det utsatta läget i Östersjön är att finkorniga sediment är sparsamt förekommande. Sedimentationsförhållandena har helt enkelt varit för oroliga för att några större avsättningar av lera och silt ska ha kunnat äga rum på Gotland.

## ÖVRIGA JORDARTER

De torvmarker som finns på Gotland är ofta grunda och utdikade för att kunna användas som jordbruksmark. På grund av de kalkrika förhållandena utgörs torven i torvmarkerna i huvudsak av agtorv, dvs. kärrtorv bildad av främst ag, vilket är ett vassliknande halvgräs. I anslutning till dikade, större torvmarker förekommer ofta områden med kalkrika sjösediment i form av bleke och kalkgyttja som även de torrlagts i samband med avvattning för jordbruksändamål.

Se Svantesson (2008) för mer information om Gotlands jordartsgeologi och postglaciala utveckling.




Figur 10. Jorddjupskarta över Gotland.

# Gotlands hydrogeologiska förhållanden

På Gotland finns grundvatten i jordlagren men framför allt i berggrunden (fig. 11). SGU gav 1982 ut beskrivning, med tillhörande bilagor, av den hydrogeologiska kartan över Gotlands län (Karlqvist m.fl. 1982).

## GRUNDVATTEN I BERG

I berggrunden på Gotland finns grundvattnet i både sprickor och porer. Dessa uppträder olika beroende på uppbygganden och lagringen i de olika sedimentära bergarterna. Det skapar i sin tur varierande hydrauliska egenskaper, vilka även kan variera i olika riktningar (anisotropa). Grundvattnets förekomst och möjlighet att transporteras är därför olika i både vertikal och horisontell led.

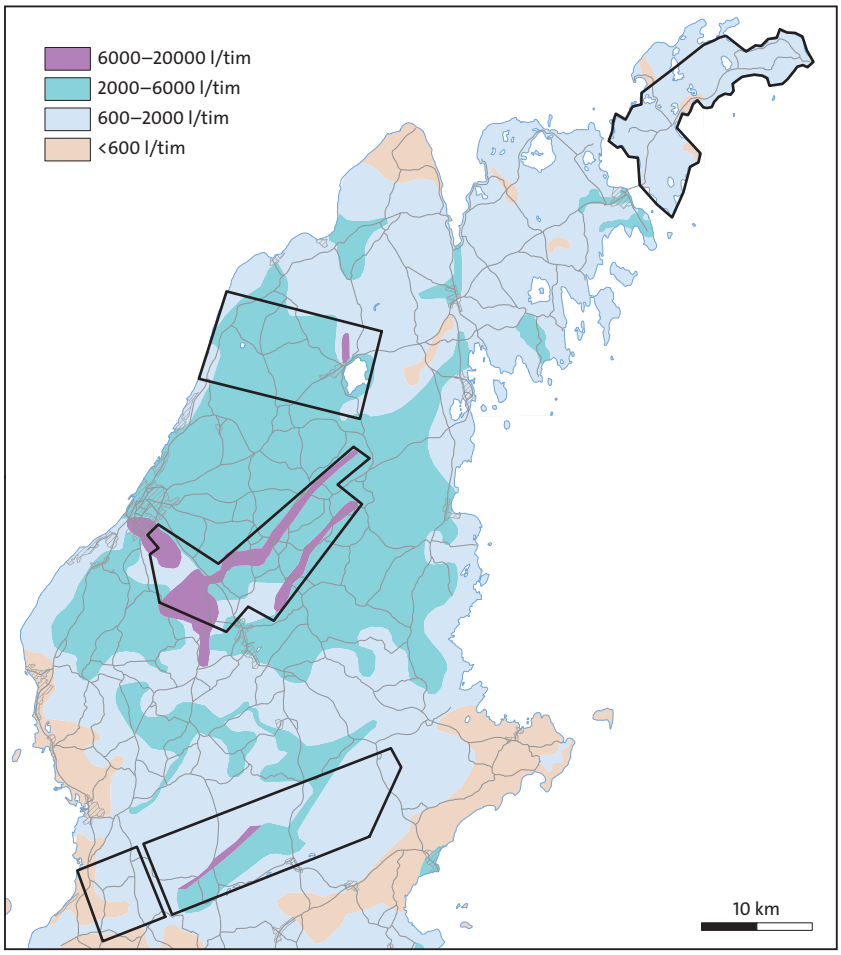
Förutom variation i bergart finns det även laterala (i sidled) barriärer och sprickor som ytterligare komplicerar bilden genom att antingen agera som ett hinder eller genom att bidra med en transportväg. Förekomst av karst är ett sådant exempel. Karstsystem har stor betydelse för grundvattenflödet och magasineringsförmågan i de områden där de förekommer.

Som en följd av de varierande geologiska förhållandena kan de hydrauliska gränserna mellan förekommande grundvattenmagasin vara avskärmande i såväl horisontell som vertikal led (ett tredimensionellt system). Förutom att gränserna mellan grundvattenmagasin är rent geologiska, dvs. gränsen utgörs av en mer eller mindre tät geologisk bildning som sprickfattig märgelsten eller liknande, så kan gränsen även vara rent hydrauliskt betingad, dvs. grundvattennivåstyrd.

Generellt är magasineringsförmågan i det gotländska berget relativt låg, vilket begränsar uttagsmöjligheten.

## GRUNDVATTEN I JORD

Mäktiga jordlager förekommer generellt mycket sparsamt på Gotland och de flesta områden har ett jorddjup på mindre än 5 m (jämför med fig. 10). Detta gör att uttagsmöjligheterna i jordlagren oftast är av marginell betydelse. De få sand- och grusavlagringar som finns är begränsade, men av lokal betydelse för både allmän och enskild vattenförsörjning.




Figur 11. Hydrogeologisk karta över uttagsmöjligheterna i berggrunden på Gotland. Kartan är ett arbetsutkast av vad som ska bli den nya regionala grundvattenkartan för Gotlands län.

Störst betydelse har grundvattenförekomsterna i jordlagren genom att tjäna som utjämningsmagasin för grundvattenbildningen till berggrunden. Jordtäcket kan genom sin relativt höga porositet lagra stora mängder nederbörd som över tiden tillförs grundvattenmagasinen i berggrunden. Ur ett magasineringsperspektiv är det därför av vikt att skapa förutsättningar för att hålla kvar vattnet och låta det infiltrera i jordlagren då detta senare bildar grundvatten i berggrunden.

## SGUs HYDROGEOLOGISKA KARTLÄGGNING

För att beskriva grundvattnets förekomst i jordlagren och berggrunden avgränsar SGU grundvattenmagasin. Ett grundvattenmagasin är en geologisk formation, eller en del av en geologisk formation, som innehåller en grundvattenförekomst och som fungerar som en hydraulisk enhet. Magasinet avgränsas av hydrauliska gränser som är mer eller mindre täta. Magasinens porositet utgörs av sprickor eller porer som är sammanbundna så att vatten kan tillföras, lagras, röra sig i och lämna magasinet, vilket sker via en lågpunkt, t.ex. en källa, genom grundvattenuttag i brunnar och genom läckage till angränsande magasin.

För att veta hur stora uttagbara mängder vatten som finns lagrat i jordlagren respektive i berggrunden behövs ytterligare kunskap om bl.a. geologin. För berggrunden gäller det att få kännedom om förekommande sprickors storlek, frekvens och hur de hänger samman, om bergarternas uppbyggnad och porositet samt om eventuell förekomst och utbredning av karst. Denna kunskap, tillsammans med kunskap om befintliga vattenuttag och provpumpningar samt bedömningar av grundvattenbildningen, hjälper oss att skapa en bild av grundvattentillgången.

Huruvida det är möjligt att dela in berggrunden i Gotland i olika magasin är dock osäkert med tanke på den heterogena berggrunden. SGUs förhoppning är att SkyTEM-mätningarna kan utgöra ett stöd vid bedömningen av grundvattenmagasinens utbredning och grundvattnets förekomst. SGU har utifrån tidigare erfarenheter gjort ett antal hydrogeologiska kartor över Gotland (t.ex. fig. 11) och kommer att uppdatera detta material med SkyTEM-data.

## GRUNDVATTNETS KVALITET

Grundvattnets kvalitet styrs både av de geologiska förutsättningarna och av antropogen påverkan. Den enskilt största orsaken till brunnsvatten med dålig kvalitet på Gotland är ett salt grundvatten. De förhöjda salthalterna är främst naturligt betingade och orsakade av äldre, s.k. relikt saltvatten, saltvatteninträngning och den sedimentära berggrunden, vars bildningsmiljö var en marin miljö med salthalter betydligt högre än de som råder i dagens Östersjön. Figur 12 visar ett regionalt bedömningsunderlag som är under utveckling på SGU och som visar sannolikheten för salt grundvatten i brunnar. Kartan visar att det på princip hela Gotland finns en hög sannolikhet för att man får salt vatten i sin brunn om man borrar djupare än 75 m. Även människan påverkar dock kloridhalten, dels genom vägsaltning, dels genom utsläpp från avlopp och deponier. För vattenanvändning gäller ett nationellt riktvärde på 100 mg/l, av tekniska orsaker. Kloridhalter över 300 mg/l ger risk för smakförändringar.

För stora delar av Gotland är risken för antropogen påverkan stor eftersom de naturliga, geologiska grundförutsättningarna skapar en miljö som är mycket sårbar för föroreningar på stora delar av ön. Dessa sårbara förhållanden beror bl.a. på det tunna jordtäcket, de genomsläppliga jordarterna, de ofta förekommande områdena med berg i dagen och en sprickrik och i vissa fall också porös berggrund. Det ska dock tilläggas att stora delar av de områden som har ett lite mäktigare jordtäcke består av moränlera som har låg genomsläpplighet.

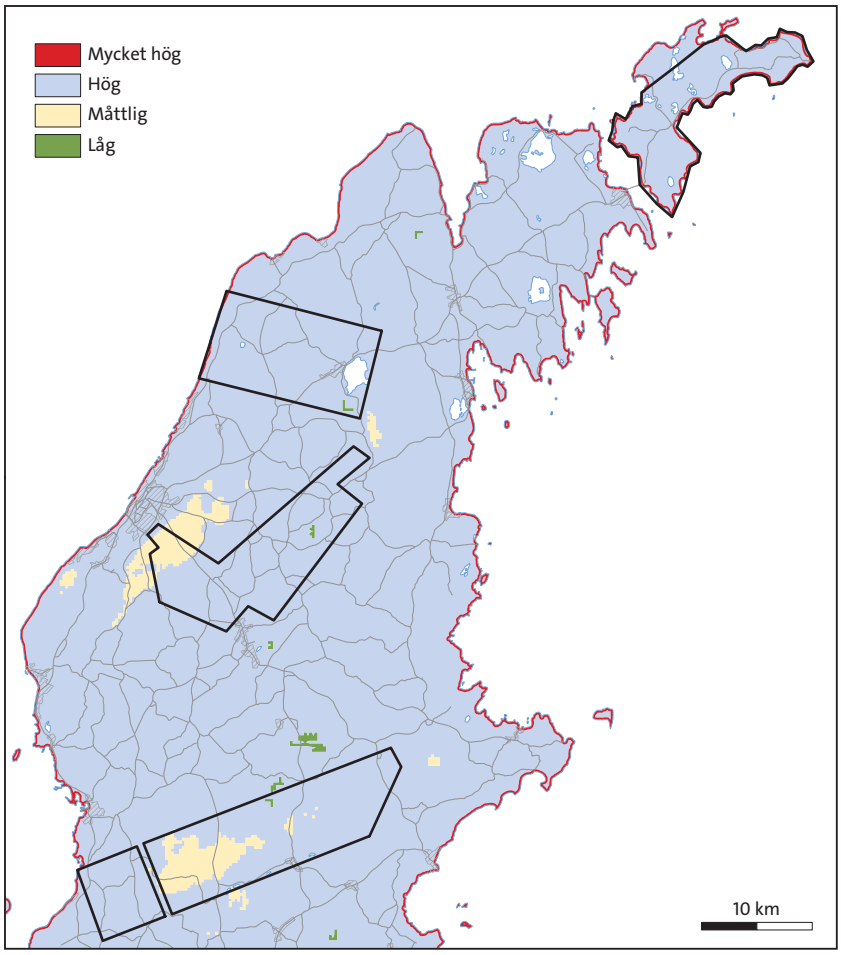
Den sårbara miljön är en bidragande orsak till ett annat stort vattenkvalitetsproblem, nämligen bakterier. Otjänligt vatten med avseende på mikrobiologi förkommer enligt utförda undersökningar i så mycket som var tredje till var fjärde brunn (Gotlands kommun 2010). Orsaken är påverkan från avlopp, gödselhantering eller andra föroreningskällor med fekalier.

Ett annat frekvent problem är förhöjda nitrathalter, vilka påträffats över större delar av ön. Enligt undersökningar är mer än var femte brunn påverkad, men halter över gränsen för hälsomässig anmärkning (50 mg/l) finns i endast 3 % av brunnarna. Andra, i mindre utsträckning förekommande problem är fynd av bekämpningsmedel och förhöjda borhalter.

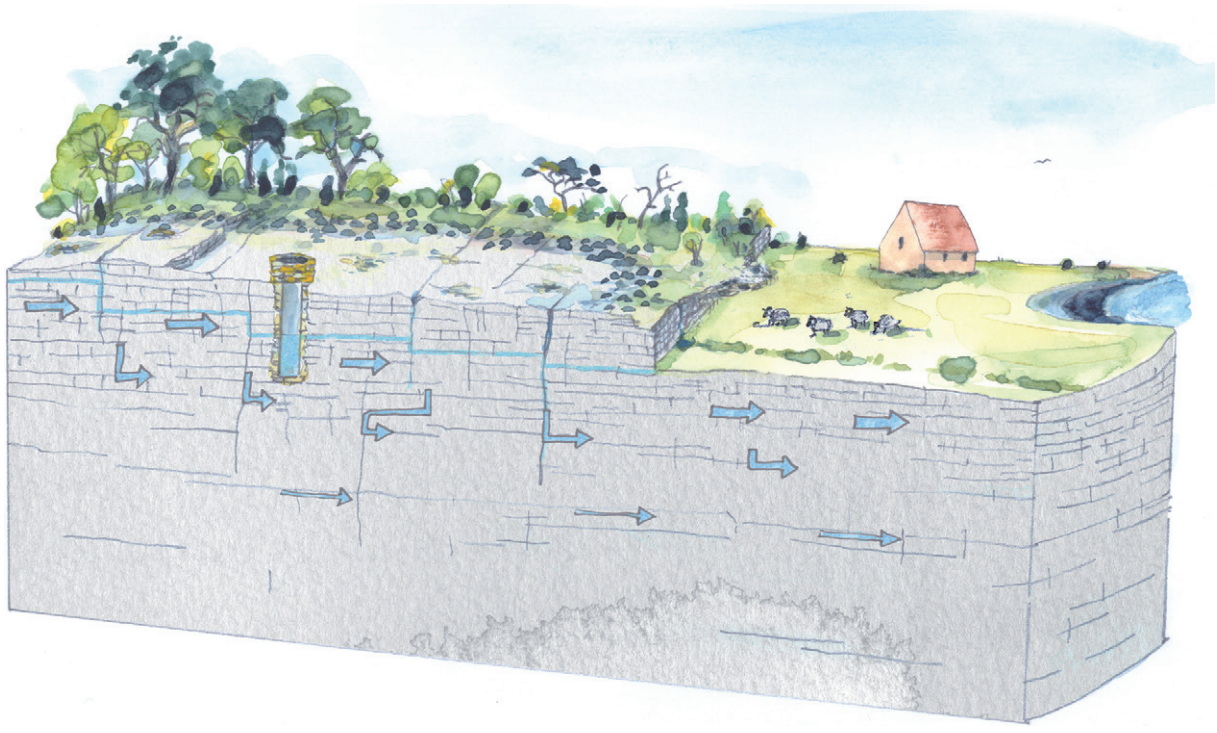
Grundvattnets kvalitet undersöks löpande i olika sammanhang och det finns ett flertal rapporter och sammanställningar med analysdata. En viktig och återkommande studie (vart femte år) är kommunens undersökningar av vattenkvaliteten i ett antal enskilda brunnar (de så kallade 100-undersökningarna). Denna ger en värdefull inblick i den rådande situationen (se resultat från 2010 års undersökning på http://www.gotland.se/57240.

## GRUNDVATTENTRANSPORT

Grundvattnets transport på Gotland är till stor del styrd av den mycket heterogena geologin, men beror givetvis också på topografin. Såväl strömning som förekomsten av grundvatten kan variera mycket inom korta avstånd, såväl vertikalt som horisontellt (fig. 13). För att bedöma den faktiska strömningen i ett område behövs därför i




Figur 12. Regionalt bedömningsunderlag (arbetsmaterial) för sannolikheten för salt grundvatten i brunnar. Figuren baseras på brunnsdata från SGUs kemiarkiv och den brunnsnivå som modellen använder vid beräkning är 75 m. Notera att de två större områdena med måttlig sannolikhet sammanfaller med områden med hög relief (se avsnittet Topografi).



Figur 13. Grundvattentransport på Gotland. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

många fall en mängd platsspecifika undersökningar, något som av resursskäl ofta är svårt att genomföra. Istället görs ofta generella bedömningar baserade på erfarenheter från andra områden.

En värdefull källa till kunskap är de undersökningar som utförts i anslutning till de större kalkbrotten på norra delen av ön. Denna kunskap kan appliceras på andra områden med jämförbar geologi. Undersökningarna på norra Gotland visar att huvuddelen av grundvattenströmningen är lokaliserad till spricksystemen i de ytliga delarna av berggrunden. Grundvattnets strömning sker från högre belägna terrängavsnitt mot lägre, till sjöar, våtmarker och vattendrag. Bedömningar visar att mer än 95 % av den infiltrerade nettonederbörden omsätts i skiktet 0–5 m under markytan.

Ett på Gotland vanligt förekommande fenomen är temporär ytavrinning kopplad till häftiga regn. Marken i områden med tät berggrund hinner inte ta emot regnvattnet vilket skapar tillfälliga ytvatten som rinner av direkt på bergets överyta.

Grundvattenströmning sker också i djupare delar av lagerföljden (mer än fem meters djup), men den är där avsevärt långsammare och mycket mindre eftersom förekomsten av och storleken på sprickor och spricksystem är mycket mindre där. I vissa områden förekommer karst (fig. 8) som påverkar hydrogeologin märkbart då karstsprickor och hålrum skapar snabba transportvägar för grundvattnet.

Samlad, befintlig kunskap visar vidare att inom kalkstensdominerade områden sker merparten av grundvattenflödet utmed enskilda lagringsplan och sprickor. Det får till följd att nivåförändringar kan vara stora och ske extremt snabbt, men även att de kan vara väldigt stabila. De största grundvattenflödena förekommer i anslutning till uppsprucken berggrund, framför allt i de övre berglagren och i övergångar mellan kalksten och märgel och märgelsten.

## NYTTJANDE AV GRUNDVATTEN

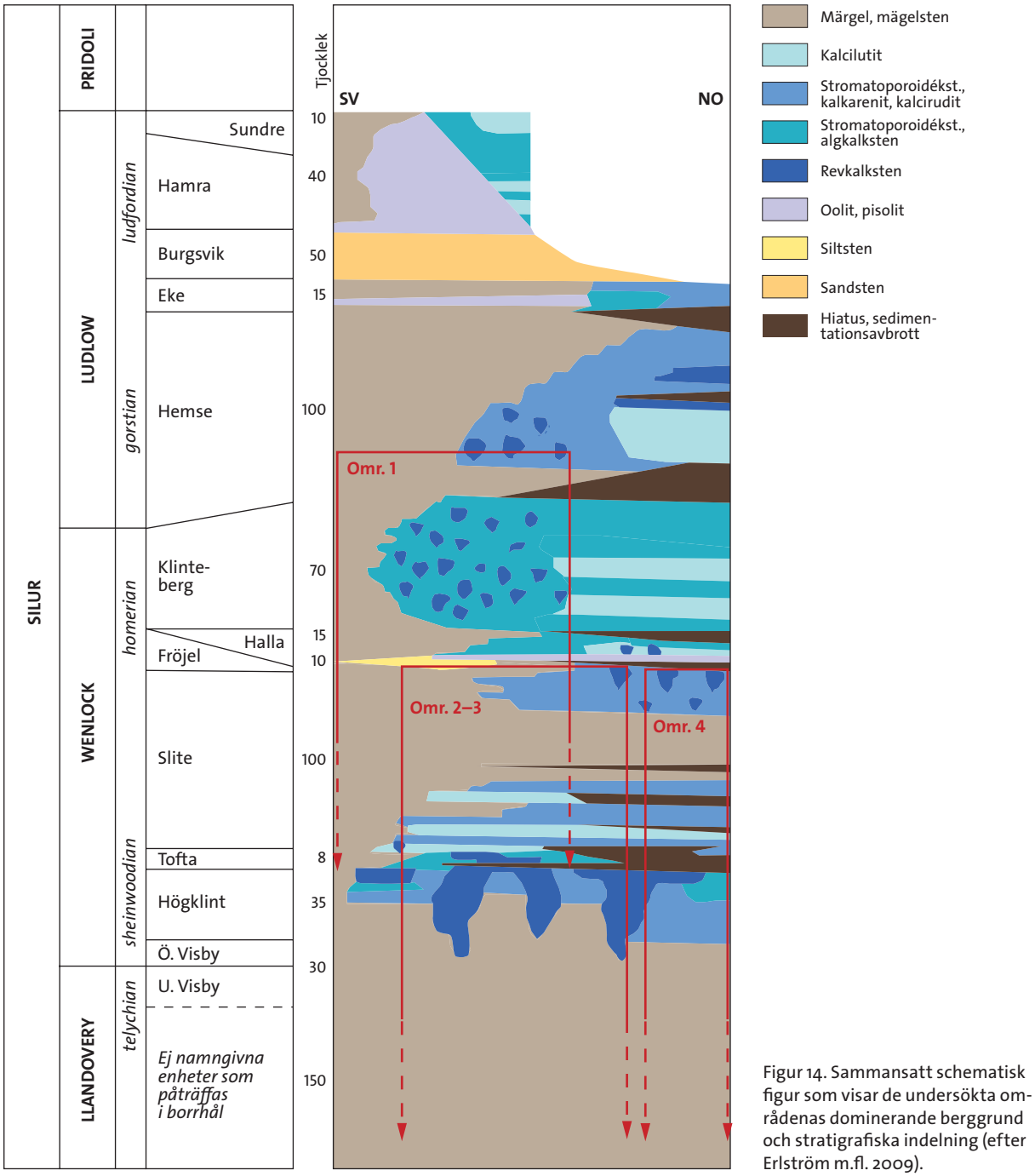
Vattenfrågan har alltid varit viktig på Gotland. Förutom dricksvattenförsörjningen använder jordbruket yt- och grundvatten för bevattning. Expansionen av jordbruksmark har även medfört utdikning av myrmark, vilket skapat förändrade hydrologiska förutsättningar på ön. Dessutom har Gotlands speciella hydrologi och hydrogeologi skapat förutsättningar för unika naturtyper, anpassade till dessa förhållanden. Även kalkstensindustrin, som i dag bedrivs i ett antal stora och djupa stenbrott, påverkar i olika omfattning de hydrogeologiska förhållandena i sina närområden.

# Undersökta områden

För att ge en översiktlig bild av områdenas karaktär har vi sammanfattat de karaktäristika som har att göra med den geologiska och hydrogeologiska bilden för respektive område. I figur 14 visas också berggrundens uppbyggnad på djupet, med de huvudsakliga ingående bergartsleden för respektive område markerade.

## OMRÅDE 1. MELLERSTA GOTLAND

Ytberggrunden på mellersta Gotland domineras av Klintebergsformationens bergarter. Dessa består i väster av lagrad och revartad, oregelbundet lagrad stromatoporoidékalksten med inslag av tunnlagrad kalkarenit. I en kärnborrning vid Ala (i nordöstra hörnet av området) är kalkstensenheten drygt 60 m mäktig vilket även verifieras av genomförda RMT-mätningar (Erlström & Persson 2014). I den västra delen av Klintebergsformationens kalkstensområde är motsvarande mäktighet avsevärt mindre. I ett stenbrott vid Hunninge, sydost om Klintehamn, är kalkstenen endast ca 5 m tjock.




Figur 14. Sammansatt schematisk figur som visar de undersökta områdenas dominerande berggrund och stratigrafiska indelning (efter Erlström m.fl. 2009).

Fältobservationer visar att berggrunden i de västra delarna i huvudsak består av fragmentartade kalkstenar, till skillnad från de mer revartade varianterna i öster. Sannolikt representerar detta en lateral skillnad i avsättningsmiljö, med revartade miljöer i öster och djupare marina miljöer (inre shelf) i väster. Enligt Eriksson & Calner (2004) växte karbonatplattformarna under silurisk tid från nordöst mot sydväst.

Under kalkstenen på ca 60 m djup påträffas i Alaborrningen bergrund med gradvis ökande inslag av märgelsten (Erlström & Persson 2014). Närmast under den ca 60 m mäktiga kalkstenen finns ett avsnitt med en tydlig växellagring mellan kalcilutit (finkornig kalksten) och märgelsten. Växellagringen avtar med djupet och mörkgrå märgelsten dominerar från ca 70 m djup. Sannolikt är djupnivån för gränsen mellan kalkstensenheten och märgelstenen kraftigt undulerande i lateralled på grund av nertryckning av märgelstenslagren under lokala revbildningar. Stratigrafiskt är det osäkert vilken tillhörighet den underliggande märgeln har. Den bör rimligtvis vara ekvivalent med Hallaformationen och Slitegruppen.

Utmed den sydöstra kanten av område 1 påträffas även Hemseformationens bergarter som består av horisontellt lagrad märgelsten och orgelbundet lagrad och revartad stromatoporoidékalksten. Ett övre märgelstenslager överlagrar diskordant Klintebergformationens revkalkstenar i en östnordöstligt riktad zon i den sydöstra delen av område 1. Gränsen mellan dessa framträder tydligt i området Ala–Ardre–Torsburgen som en erosionsyta där även paleokarst påvisats (Eriksson 2004). I den allra sydligaste delen av område 1 finns lokala enheter med oregelbundet formade kalkstenskroppar med revartad stromatoporoidékalksten tillhörande yngre delar av Hemseformationen. Dessa är avsevärt mindre mäktiga jämfört med Klintbergsformationens revkalkstenar. Uppskattningsvis är de i storleksordningen 5–10 m mäktiga. Här påträffas även relativt frekvent karststrukturer i berggrundsytan, både i form av slukhål och som karstsprickor.

I område 1 finns en tydlig gräns i jordartsfördelningen ungefär längs en linje mellan Etelhem och Buttle. Öster om denna linje dominerar kalt berg och tunt jordtäcke medan det väster om linjen är en dominans av moränlera och lerig morän. Områden med kalt berg och tunt jordtäcke förekommer visserligen även västerut ner mot kusten, men inte alls i lika stor omfattning. Moränen är i vissa områden svagt drumliniserad, vilket indikerar isrörelseriktningar från nordväst och nord. Större områden med svallsediment finns nordväst om Lojsta samt vid Fröjel och Eksta. Runt Etelhem finns några större områden med finsediment.

Område 1 domineras av obrukad mark med stora sammanhängande skogar med bland- och tallskog. De södra delarna domineras av lägre liggande uppodlad morän och utdikad myrmark. I de västa delarna av området finns en del småskaligt jordbruk. Höjdskillnaderna och förekommande jordarter inom området avspeglas i denna markanvändning.

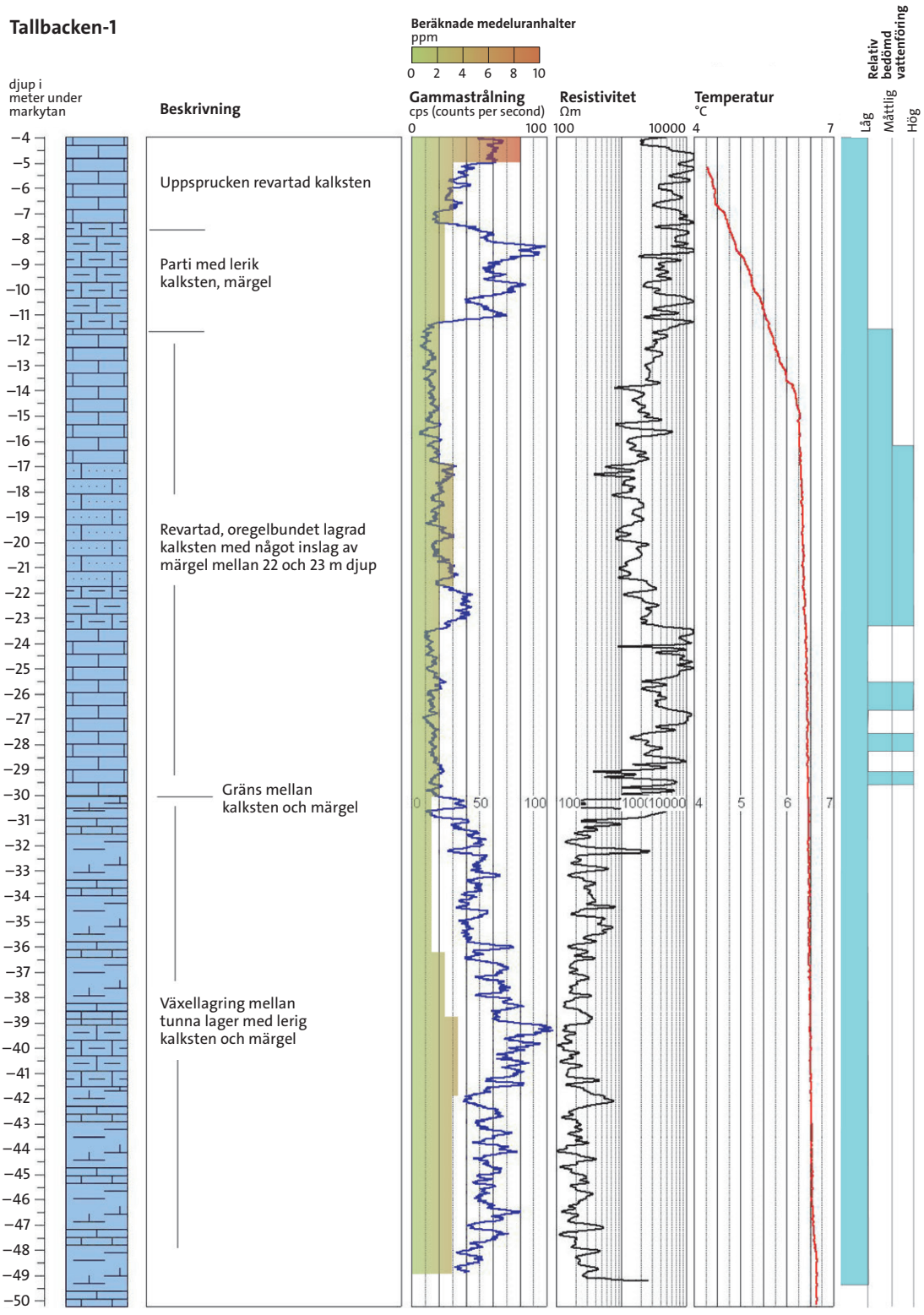
Vid Lojsta slott finns fem mindre sjöar som är betydligt djupare än gängse sjöar på Gotland. Lojstasjöarna var före utdikning en sammanhängande sjö. Maxdjupet är 15,4 m och den totala vattenvolymen är ca 1 700 000 $m^3$ (SMHI 2009). Lojstasjöarna ligger precis vid norra och västra kanten av ett hällområde med 10 m höga klintar av revkalksten på den södra och östra sidan av sjöarna. I den södra delen av området finns stora myrområden som är utdikade för att göra marken lämplig för odling. Dikena är i flera fall mer än 3 m djupa och påverkan på hydrologin och hydrogeologin är troligen stor.

Natura 2000-området Mallgård källmyr består av en blandning av öppna, torra områden och skogspartier med skugga och viss fuktighet. De öppna områdena visar tecken på förekomst av temporära (efemära) vattensamlingar, och på vissa ställen kan man se mindre grundvattenutflöden och vattenansamlingar. Grundvattnet kommer sannolikt både från jordlagren och från den övre delen av berggrunden. Jorddjupet är tunt och genomsläppligt och rikkärret ligger nedströms ett högre liggande område med skog och en del hällar.

Idag saknas brunnsinformation om grundvattenförhållandena för stora delar av området. Bäst uttagskapacitet enligt tillgänglig information bedöms finnas i ett stråk som sträcker sig mot nordost från Båtels i söder, via Lojsta Hed och upp mot Buttle (jämför fig. 11). Dessutom finns ett område i de västra delarna i närheten av Siggdarve där brunnsuppgifter indikerar relativt stora uttagsmöjligheter (se resultat från område 1).

### OMRÅDE 2. VISBY Ö

Område 2 sträcker sig över ett område med Slitegruppens revartade kalksten i väster och märgelsten i öster. Topografiskt är övergången mycket tydlig i landskapet. De kalkstensdominerade områdena framträder som ryggar i landskapet, där den tydligaste höjdryggen finns direkt öster om Visby. Berggrunden består av ett antal stratigrafiska enheter där de övre, kalkstensdominerade lagren stratigrafiskt tillhör Högklint-, Kopparsvik- och Hangvaformationerna samt de undre delarna av Slitegruppen. I en borrning vid St. Vede, strax utanför undersökningsområdet är kalkstenslagren totalt ca 30 m mäktiga (fig. 15) och domineras här av revartad stromatoporoidékalksten. Maximalt bedöms mäktigheten på kalkstensenheten vara 60–80 m. Under kalkstensenheten påträffas vid borrningen en växellagrad enhet med märgelsten och lerig kalksten, sannolikt tillhörande




Figur 15. Borrhålsdata från kärnborrning Tallbacken 1 vid St. Vede. Borrhålet ligger strax öster om Visby men utanför undersökningsområde 2 (se fig. 24 för lokalisering).

Visbyformationen. I sydostlig riktning inom område 2 förekommer överst tunnlagrad kalksten som pålagrar flanken till Slitegruppens revkomplex i väster. I t.ex. Follingboområdet, kan dessa vara mycket grovkristallina och fragmentartade. Österut domineras motsvarande lager av medelkornig kalkarenit som vilar ovanpå märgelsten. Mäktigheten varierar från några till tiotalet meter. Lokalt finns mindre revbildningar inlagrade i

detta område, t.ex. vid Endre. Ytterligare längre österut domineras berggrunden av märgelsten tillhörande övre delen av Slitegruppen, s.k. Slite märgelsten.

Område 2 domineras nästan helt av moränlera och lerig morän. Västerut minskar moränens dominans och här förekommer jordarterna fläckvis eller som tunna lager mellan områden med kalt berg. Här påträffas även områden som domineras av svallsand och svallgrus. Övergången mellan det morändominerade området i öster och området med svallsand, svallgrus och kalt berg sker mellan 45 och 70 m ö.h. Den topografiska förändringen beror på att berggrunden i väster utgörs av hårdare kalkstenar och i öster, där moränen tar vid, av mjukare märgelsten. Några mindre områden med finkorniga sediment förekommer också. I sydostligaste delen av området finns den utdikade torvmarken Älnemyr med bleke och kalkgyttja. En markant strandvall (Ancylussjöns gränsvall på ca 35 m ö.h.) finns i nordöstra delen av området och vägen mellan Ekeby och Fole följer denna strandvall. Gränsvallen visar Ancylussjöns maximala utbredning och bildades under en period med relativt stationär sjöyta under Ancylustid, för ca 9 500 år sedan.

Den västra delen av området består av ett skogbevuxet höjdområde. Där höjdområdet tar slut österut vidtar ett vidsträckt plan som domineras av större odlade fält med inslag av områden med skog.

I området, bland annat i närheten av Roma, finns ett antal stora diken som sammanfaller med områden med organogena jordarter. Dessa områden utgör nu odlingsmark. Dikena kan lokalt vara mer än 5 m djupa och 7–8 m breda. Utdikning av denna storlek har haft en klar påverkan på hydrogeologin och hydrologin i området.

Områdets sydvästra del överlappar delvis med vattenskyddsområdet för Visby vattentäkt. SGU tog år 2004 fram en konceptuell geologisk modell för detta område (fig. 16) Ett beslut om utökat vattenskyddsområde väntas under 2015.

SGU bedömer att följande delområden inom område 2 är speciellt intressanta ur grundvattensynpunkt: den västra delen i närheten av Visby, ett stråk som sträcker sig från Anglarve i nordostlig riktning upp mot Graute, och ett stråk i nordostlig riktning från Hallfose i söder till Bjärs i norr. Inom dessa områden bedöms det finnas goda möjligheter att enskilda grundvattenbrunnar kan ge mer än 6 000 l/h (jämför fig. 11).

### OMRÅDE 3. LUMMELUNDA

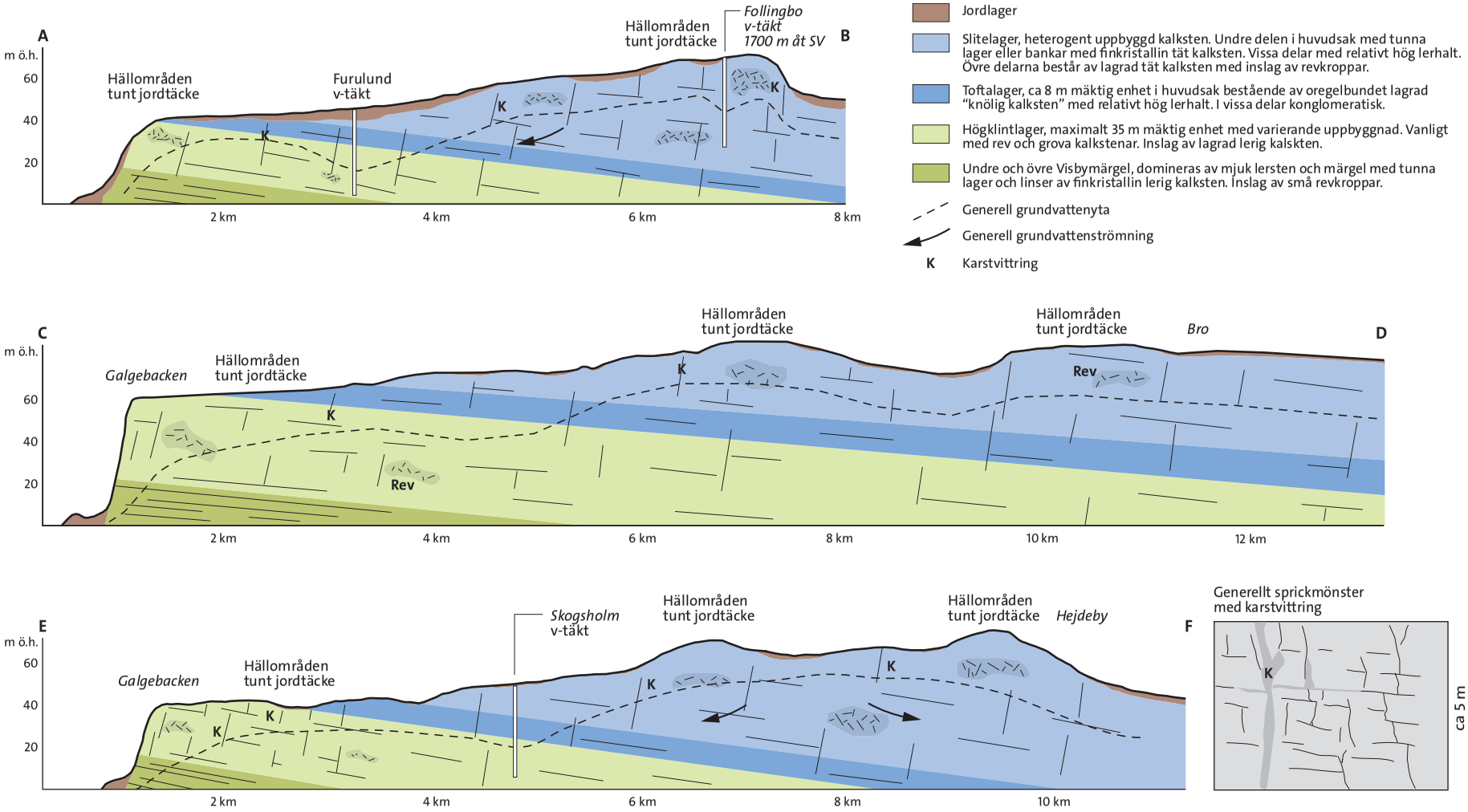
Lummelundaområdets berggrund har jämförbar stratigrafisk uppbyggnad som område 2. Däremot är förekomsten av revartad kalksten inte lika påtaglig. Det påverkar den totala mäktigheten på kalkstensenheten som överlagrar Visbyformationens märgelstenar. Undersökningar vid Bro stentäkt indikerar en 20–30 m mäktig kalkstensenhet som överlagrar märgelsten. Karstvittring är vanligt förekommande i området och Lummelundagrottornas karstsystem mot Martebomyr är en del av sannolikt flera underjordiska vittringssystem. Underjordiska karstsystem har även indikerats i samband med grundvattenstudier vid Bro (Gustafsson & Erlström 2007).

Moränlera och lerig morän är den dominerande jordarten, och endast en mindre del av området saknar eller har enbart tunt jordtäcke. I anslutning till Tingstäde träsk finns Tingstädeåsen som är Gotlands största isälvsavlagring. Åsen, som sträcker sig utmed Tingstäde träsks norra och västra kant, är enligt data i SGUs brunnsarkiv uppemot 15 m mäktig i de centrala delarna. Den är avsevärt tunnare i de perifera delarna. I anslutning till åsen finns stora områden med svallsand och svallgrus i tydligt framträdande strandvallar. Större områden med svallsediment finns även nordost om Lummelunda. I anslutning till detta område finns i Lundbjärs en mindre isälvsavlagring. De utdikade torvmarkerna Martebomyr och Elingshemsmyr utgör en stor del av område 3. Martebomyr var före extensiv utdikning på 1800–1900-talet Gotlands största myr- och sjökomplex (34 km$^2$ år 1880). I dag finns i princip inga vattenspeglar kvar i detta område utan det är nu uppodlad mark eller fuktig myrmark. En bevattningsdamm (Landträskdammen) som samlar vatten från diken höst, vinter och vår anlades på 1970-talet på botten av vad som tidigare varit sjö. Samtliga myrområden (torvmarker) har en utsträckning i nordväst–sydostlig riktning. Orienteringen beror på den underliggande berggrundens uppbyggnad (lagring och bergarter). En stor del av torvmarkerna domineras idag av sjösedimenten bleke och kalkgyttja som finns under tidigare förekommande torv som nu är bortoxiderad.

Lummelunda karstsystem och grotta har bildats genom att strömmande yt- och grundvatten löst upp och vidgat befintliga spricksystem i kalkstenen till stora öppna sprickgångar och stora hålrum. Det vatten som idag rinner genom grottsystemet kan spåras till Martebomyr. Vattenföringen har dock radikalt minskat efter utdikning av myren.

Den del av område 3 som sträcker sig mellan kusten i väster och Tingstäde träsk karaktäriseras av ett relativt flackt område med öppna och delvis odlade marktyper. Dessa områden är i princip knutna till utdikade myrområden och moränmark. Närmast kusten och vid Tingstäde träsk finns områden med tunna jordmäktigheter och här dominerar skog.

I området ligger Gotlands näst största sjö, Tingstäde träsk, som har en area på 4,7 km$^2$ och ett maxdjup på endast 1,7 m. Sjöns totala vattenvolym beräknas till




Figur 16. Schematiskt tvärsnitt av berggrunden kring Visby och österut (från Carlstedt & Erlström 2004).

3 200 000 $m^3$. Tingstäde träsk är även ytvattentäkt för Visby.

I den nordvästligaste delen av området ligger ett Natura 2000-område som heter Björkume. Området har en hel del fuktiga områden i form av blekevätar och källkärr. Grundvattnet som bidrar till ekosystemen sipprar ur jordlagren och från de översta metrarna av berggrunden. Till skillnad från flera andra Natura 2000-områden som avslutas med en klint mot havet är det vid Björkume endast ett litet grundvattenflöde till ekosystemen vid dessa klintklippor.

Överlag finns det relativt goda förutsättningar för enskilda grundvattenuttag i området. SGUs bedömning är att det bör gå att ta ut mellan 2 000 och 6 000 l/h i stora delar av området. I en sammanställning av brunnsuppgifter noteras att ett mindre område strax nordväst om Tingstäde träsk uppvisar goda uttagsmöjligheter (mer än 6 000 l/h, jämför fig. 11).

## OMRÅDE 4. FÅRÖ

Fårö separeras från den gotländska huvudön av Fårösund, vars orientering sannolikt har en geologisk koppling till berggrundens uppbyggnad på djupet. OPABs seismiska data och borrningar från Bunge och Fårö visar på en underliggande urbergshöjd och förkastningar som sannolikt påverkat även ytberggrundens uppbyggnad och skapat förutsättningar för att sundet bildats.

I området är det vanligt med kalcitläkta vertikala sprickor i berggrundshällar utmed Fårösunds stränder. De dominerande sprickriktningarna i området är nordväst–sydost (290–320°) och nordost–sydväst (20–40°).

Berggrunden domineras av horisontellt lagrad kalkarenit och kalcilutit med inslag av mer oregelbundet lagrad stromatoporoidékalksten tillhörande Slitegruppen. Mellan enskilda lager förekommer tunna skikt med mörkgrå till svagt grönaktig märgel. Berggrunden uppvisar vanligtvis en mycket homogen och uthållig lagring vilket ger plana ytformer i lanskapet. Mer oregelbundet lagrade, revdominerade lagerserier återfinns företrädesvis i de nordvästra delarna av Fårö med raukbildningar tillhörande formationerna Hangvar och Kopparsvik. Kalkstenen övergår gradvis på djupet i märgel och märgelsten. I Stucks stentäkt, norr om Bunge, är kalkstensenheten ca 30–40 m mäktig och övergår successivt till mer märgelstensdominerade enheter för att på 45–50 m djup helt domineras av märgel och märgelsten. I sydostlig riktning avtar kalkstensenheten generellt i mäktighet.

På Avanäs, den östligaste delen av Fårö, finns Sveriges största sanddynsområde. Orsaken till de stora sandförekomsterna är att det antagligen funnits en isälvsavlagring som, när den hamnat ovanför Östersjöns yta, omlagrats av vatten och vind. De högsta sanddynerna höjer sig 15 m över omgivningen och Ullahau är den största. Svallsedimenten bygger ofta upp till en meter höga strandvallar. Den totala sandmäktigheten kan vara mer än 25 m. I området finns även ett antal mindre områden med torv som bildats bakom sanddynerna i lagunmiljöer när havsnivån varit högre. Utanför Fårö, på Östersjöns botten, finns en isälvsavlagring. Den hör troligen samman med de sandiga områdena på östra delen av Fårö.

Den västra delen av Fårö är helt annorlunda och skiljer sig markant från Avanäs. Den här delen av Fårö har en mosaikartad karaktär vad gäller jordarter och i huvudsak inget eller tunt jordtäcke. Mellan områdena med kalt berg finns omväxlande områden med svallsediment, morän och torv.

Den östra delen av ön karaktäriseras av skog och småskalig, ganska tät bebyggelse. Stora delar är ödemark med sanddyner, tallskog och med en hel del låg vegetation i form av t.ex. ormbunke och blåbärsris. Den norra och västra delen av Fårö består nästan uteslutande av hällmark med buskvegetation. Den södra och västra delen har både skog, öppna alvarmarker och en del bebyggelse.

På Fårö finns några få grunda sjöar, som är relativt nybildade på grund av den relativa landhöjning som sker (3 dm relativ landhöjning sedan början av 1800-talet och 2,4 m sedan 1000-talet). Sjöarna var för några hundra till tusen år sedan havsvikar. De ligger i stort sett i nord–sydlig riktning och i områden där det finns svaghetszoner i berggrunden.

Marpes är ett Natura 2000-område som ligger på nordvästra delen av Fårö. Ekosystemet försörjs troligen med en del vatten från det ytligaste grundvattnet, även om merparten bedöms komma från nederbörd och ytavrinning.

Region Gotland framhäver att salt grundvatten är ett vanligt förekommande problem i borrade brunnar på hela Fårö. Enskilda grävda brunnar i områden med mäktiga sandlager ger många gånger mycket vatten. Det är dock ofta färgat av järn och humus, men vattenkvaliteten är ändå överlag acceptabel. Mer information om vattenförsörjning på Fårö finns att läsa i Vatten- och avloppsbilagan till den fördjupade översiktsplanen (http://www.gotland.se/58897).

# Resultat och områdesspecifika tolkningar

Resultaten visar att TEM-metoden lämpar sig särskilt väl för djupkaraktärisering av de gotländska jordlagren och berggrunden. Sprickfattig kalksten och speciellt revartad kalksten kan med sin generellt höga resistivitet (300–1 000 Ωm) urskiljas från märgel och märgelsten med betydligt lägre resistivitet (50–200 Ωm). En bergrundsvolym innehållande grundvatten som är klart saltpåverkat har i sin tur ännu lägre resistivitet (upp till 40 Ωm) vilket innebär att djupnivån för det salta grundvattnet i de flesta fall kan identifieras i mätdata (se även tabell 2).

Mätdata innehåller framför allt detaljerad information ner till ca 200 m djup men det finns även data som indikerar djupare liggande nivåer i berggrunden, bl.a. den ordoviciska kalkstenssekvensen på 250–400 m djup. Ett antal långsträckta resistivitetsanomalier har tolkats som delvis begravda dalar i berggrunden. Dessa diskuteras i de områdesvisa avsnitten. Det har dock hittills inte varit möjligt att kartlägga förekomsten av karst, sannolikt på grund av otillräcklig upplösning och dess otydliga resistivitetsignatur. Möjligen kan man genom att studera data mer i detalj inom kända karstområden få fram en arbetsmetod för att kartlägga karst med TEM-data.

Resultaten från mätningarna och kompletterande undersökningar presenteras områdesvis. I redovisningen av tolkningen ingår ett antal gemensamma kartor för alla områden samt de mest områdesspecifika tolkningarna för respektive område. För område 4 (Fårö) exemplifieras en mer omfattande tolkning. Det finns med andra ord möjlighet att göra betydligt mer med data, bland annat när det gäller presentationsformer, än vad som visas i denna rapport.

SkyTEM-resultaten redovisas som djupsektioner längs utvalda profiler och som ytkartor med resistiviteten på specifika djup. Resistivitetskartor för djupintervall om 10 m för samtliga områden redovisas i bilaga 1. Färgskalan som används varierar beroende på den variation i resistivitet som uppmätts och för att på bästa sätt åskådliggöra den lagring som finns.

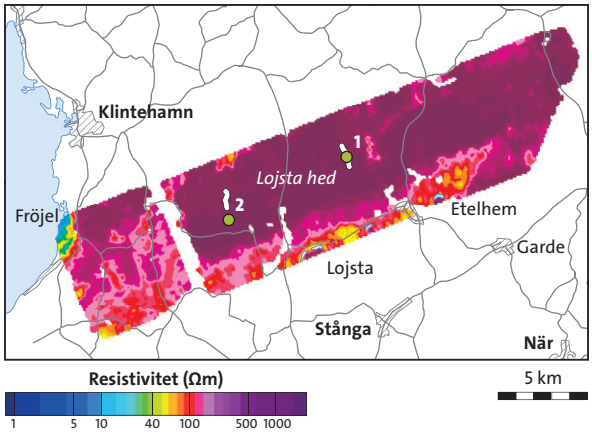
## OMRÅDE 1. MELLERSTA GOTLAND

Kartor över resistiviteten för olika djupsnitt i intervaller om 10 m visas i bilaga 1. Markmätning med RMT-metoden utfördes längs två profiler (fig. 17). Två borrningar (borrhål 1 och 2) och borrhålsloggning utfördes även inom området (fig. 17).

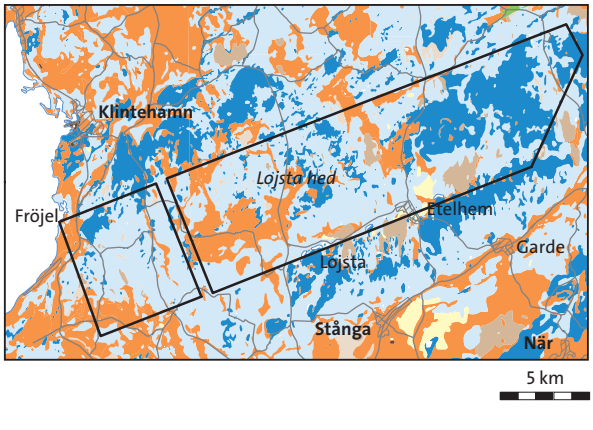
Resistivitetsfördelningen i den övre delen av marken (0–10 m) har klassificerats och primärt delats upp i två intervall som innehåller olika geologiska enheter:

- Områden med höga till mycket höga resistiviteter (>400 Ωm) som representerar berg i dagen (kalksten) och tunna jordtäcken.
- Områden med låg till medelhög resistivitet (40–200 Ωm) som består av områden med torv, kalkgyttja, sjöar, ett större jorddjup (>5 m i medel enligt SGUs brunnsarkiv) och där ytberggrunden utgörs av märgel och siltsten.

Generellt korrelerar även SkyTEM-data med topografin. De högresistiva (>400 Ωm) områdena karaktäriseras av motståndskraftig kalksten (fig. 18) som idag utgör höjdområden, medan områdena med medelhög till låg resistivitet (40–200 Ωm) utgör lägre liggande områden i landskapet. Enskilda högresistiva, välavgränsade

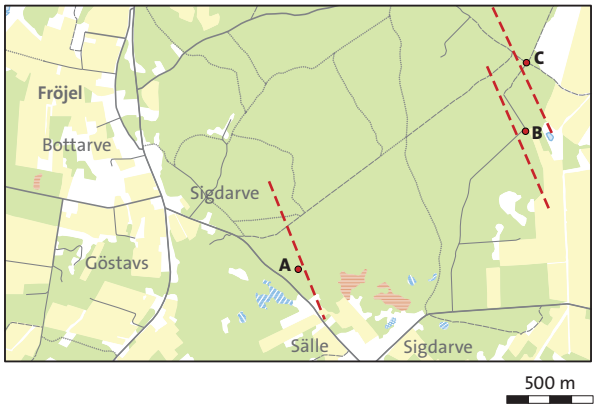



Figur 17. Medelresistiviteten för de översta 10 m inom område 1 samt lokalisering av borrhål 1 och 2 (gröna punkter) och RMT-profiler 1 och 2 (vita linjer).




Figur 18. Jordartskarta över område 1. Undersökningsområdet markeras med den svarta ramen. Se figur 9 för teckenförklaring.

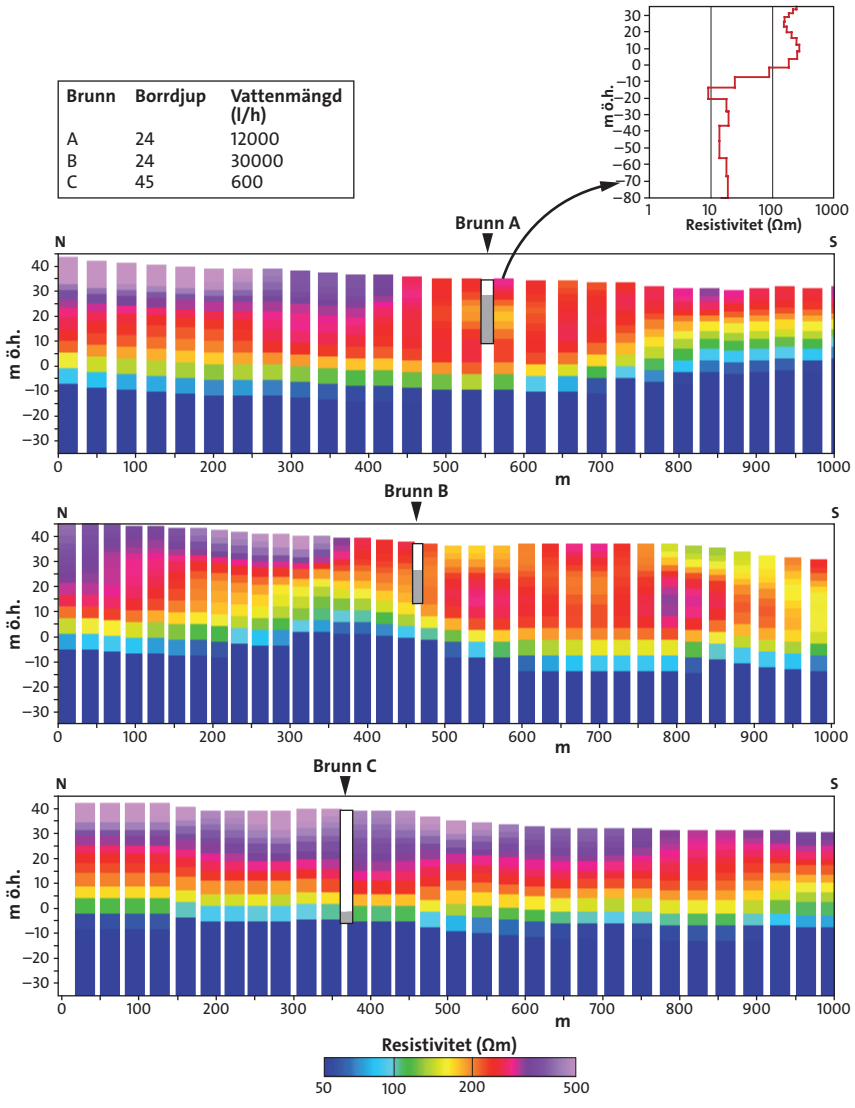
anomalier kan även korreleras till mindre revkroppar som sticker upp i landskapet, t.ex. kalkstensklintarna vid Lojstasjöarna i södra delen av området (fig. 17).




Figur 19. Tre brunnar (A–C) strax öster om Fröjel. Röda linjer markerar läget för resistivitetsprofiler från SkyTEM-data som visas i figur 20.

Tre brunnar som Ahlqvist Brunnsborrning AB borrade åren 2012–2013 i den västra delen av område 1, strax öster om Fröjel, har valts för en jämförelse av uttagskapacitet och hur SkyTEM-data återger områdets geologiska uppbyggnad (fig. 19). Berggrunden i området består här av fragmentartade kalkstenar, och kalkstenslagret har en mindre mäktighet i jämförelse med den östra delen av området. Trots att brunnarna ligger relativt nära varandra visar de stora skillnader i uttagskapacitet. Brunn B, som ger en vattenmängd på upp till 30 000 l/h (totaldjup 24 m, 12 m ö.h.), ligger endast ca 400 m från brunn C, som endast ger en vattenmängd på ca 600 l/h vid 39 m djup (0,5 m ö.h.).

I figur 20 visas resistivitetsprofiler från de flyglinjer som ligger närmast brunnarna tillsammans med brunnsdata. Brunnarnas läge anges i resistivitetsprofilerna. Färgskalan har anpassats för att visa variationer i intervallet 50–500 Ωm. Profilerna visar tydliga skillnader i resistivitet och lagring. Längs profilen vid brunn C finns överst ett högresistivt homogent lager (kalksten)



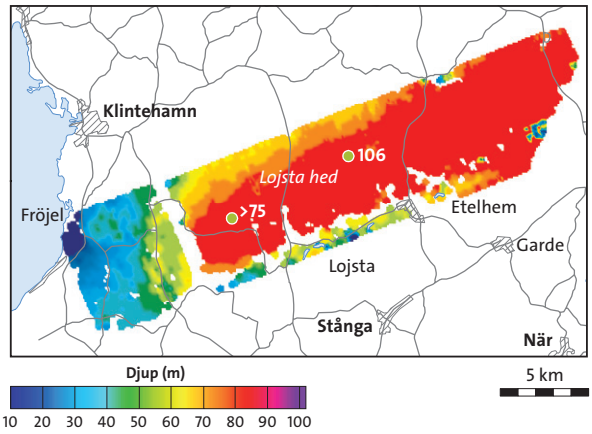

Figur 20. Jämförelse mellan resistivitetssektioner från SkyTEM-data och brunnskapacitet i tre borrade brunnar. Nivån som visar på vilket djup man nådde vatten är markerad i figuren. (Grundvattenytan ligger ca 4 m under markytan i brunn A och B och 7 m under markytan i brunn C. Läget för brunnar och profiler visas i figur 19.

med en mäktighet som varierar mellan 10 och 20 m. Resistiviteten minskar mot djupet. Med hänsyn till den ringa vattenmängd som brunnen ger, tolkar vi det som en indikation på en övergång till en bergmassa med en större märgelinblandning. Vid ca 40 m djup (0 m ö.h.) är resistiviteten lägre än 50 Ωm, vilket tyder på saltvatten. En tolkning man kan göra av detta är att områden med en mycket högresistiv kalksten i ytan som vilar på en märgelinblandad bergart inte verkar ha några goda förutsättningar när det gäller att hitta mycket grundvatten. Kanske beror det på att förutsättningarna inte finns, att det helt enkelt saknas magasineringsmöjlighet eller att grundvattenbildningen är mycket låg, eventuellt på grund av den täta kalkstenen.

För profilerna vid brunn A och B förekommer det högresistiva lagret enbart i den västra delen av profilen. Både brunn A och B ligger inom ett lager med relativt låg resistivitet (ca 200–300 Ωm). En detalj av resistivitetsvariationen vid brunn A visar även att resistiviteten minskar till ca 150 Ωm vid 10 m djup vilket sammanfaller med det djup där vatteninflödet ökade i borrhålet. Enligt borrprotokoll för brunn A observerades ett vatteninflöde vid 4,8 m och mängden ökade vid 7,2 m, 12 m samt vid 18 m (14,5 m ö.h.) till totalt ca 12 000 l/h. För brunn B påträffas vatten vid 9 m och mängden ökade till 30 000 l/h vid 17 m djup (19 m ö.h.). Korrelationen mellan låg resistivitet och en högre vattenmängd i brunn A och B beror troligtvis på att kalkstenen här är uppsprucken och innehåller större mängder vatten, vilket sänker resistiviteten. Längs profilen vid brunn B ser man flera områden med resistiviteter på 150–300 Ωm, både söderut och norrut, där det finns potential att finna samma goda förutsättningar som i brunn B. Resultatet visar att det med detaljerade analyser av SkyTEM-data är möjligt att lokalisera liknande områden med större potential för grundvattenutvinning.

Resistivitetsvärdet för förekomst av salt grundvatten i en bergvolym har satts till ca 40 Ωm (se resonemang i avsnittet Metodik). I bilaga 5 visas en tredimensionell bild av på vilken nivå gränsen för 40 Ωm ligger. I figur 21 presenterar vi en djupkarta där vi visar det faktiska djupet till samma yta. SkyTEM-data stämmer överens med data från borrhålsloggningarna av borrhål 1 och 2 (fig. 21). I borrhål 1 (bilaga 4) syns en liten men ändå tydlig ökning i konduktiviteten som kan kopplas till en saltvattengräns på ca 106 m djup (–53 m ö.h.). Den förändring som syns i resistivitetskurvan beror delvis på en ökad salthalt, men även på en ökad lermineralhalt i bergarterna. I borrhål 2 framträder en svag ökning av konduktiviteten vid ca 75 m djup (–23 m ö.h.).

Risknivån för det salta grundvattnet ligger ytnära i den västra delen nära kusten och sjunker sedan kraftigt



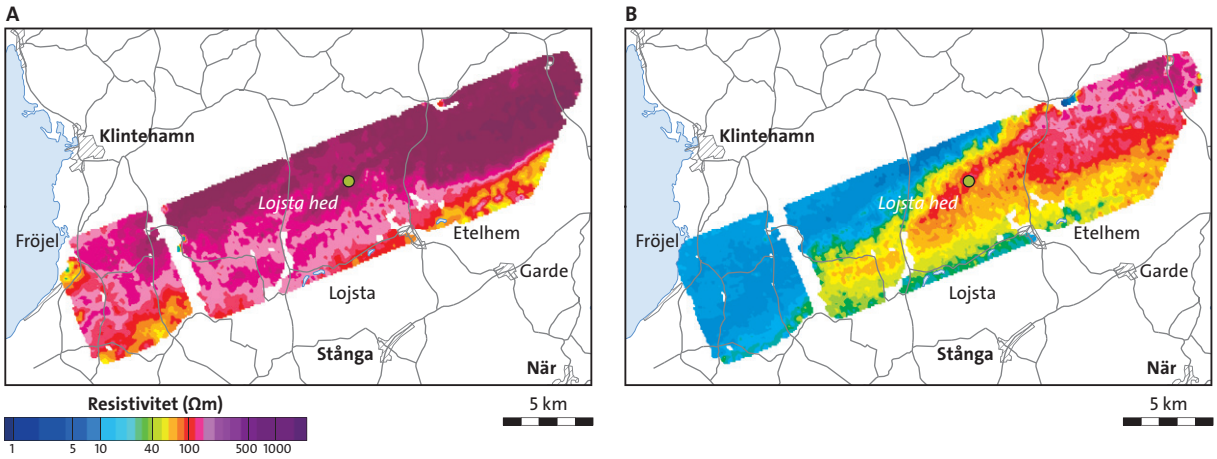

Figur 21. Djupet från markytan till gränsen för 40 Ωm tolkat som djup till gränsen för ett salt grundvatten. Borrhål 1 och 2 markerade med gröna punkter. Siffrorna vid respektive borrhål är nivån för när salt grundvatten registrerades i borrhålet, antingen vid borrning eller vid borrhålsloggning.

inåt landet (fig. 21). Nivån i den östra och södra delen är mer osäker, vilket sannolikt beror på ytligt liggande märgel (i söder vid Lojsta och Etelhem) respektive mäktigare kalkstensenheter (centrala delarna och österut). Märgeln som sänker resistiviteten och den mäktiga kalkstenen som kan ha hög resistivitet även under saltvattennivån gör att kartan i figur 21 behöver jämföras och troligen korrigeras något med hjälp av vattenanalysdata. Det ska tilläggas att det lokalt kan finnas salt grundvatten högre upp i berggrunden än vad som visas i figur 21. En bedömning är att dessa förekomster dock har en begränsad lateral utbredning och storlek.

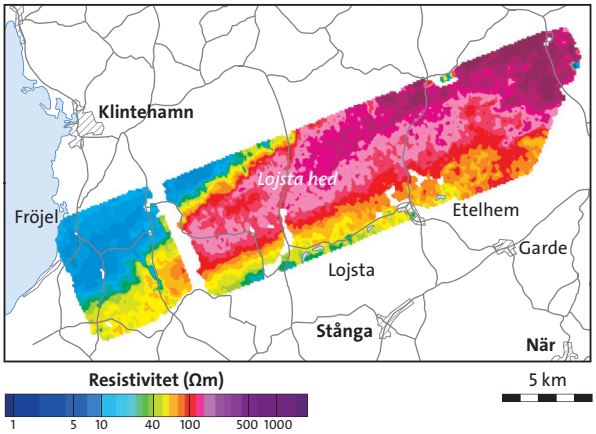
Borrhål 1 placerades i anslutning till en högresistiv struktur med nordöstlig riktning som identifierats i SkyTEM-data. Strukturen i anslutning till borrhål 1 framträder som en avlång sänka i resistivitetsdata som når som djupast ner till –60 m ö.h. (fig. 22 och bilaga 1). Strukturen ligger i ett stråk som, enligt uppgifter från SGUs regionala grundvattenkartering för Gotlands län, förväntas ha goda förutsättningar till större grundvattenuttag (jämför fig. 11). I borrhål 1 kan man se att bergartsleden varierar, troligtvis mellan rena kalkstensenheter och märgelenheter om vartannat, med djupet (bilaga 4).

En hypotes vad gäller förekomsten av dessa dalformade strukturer i kalkstenen är att de representerar avlånga revstrukturer med massiv kalksten, som med sin tyngd och hållfasthet pressas ner i underliggande kalk- och märgelsten. Detta gör att det skapas sprickor i underlagrande bergarter i anslutning till dessa strukturer, och därmed skapas också goda förutsättningar för grundvattenmagasinering och transport i anslutning till liknande strukturer.

Kapacitetstest av borrhål 1 (bilaga 3) visar på god kapacitet (15 000 l/h). Störst inflöde av färskt grundvatten




Figur 22. **A.** Medelresistivitet för djupintervall 10–20 m ö.h. **B.** Medelresistivitet för djupintervall –50 till –60 m ö.h. Den gröna punkten är borrhål 1.




Figur 23. Medelresistiviteten för djupintervall –30 till –20 m ö.h.

observerades vid 41 m djup (12 m ö.h.) och 57 m djup (–4 m ö.h.). Inflöde av salt grundvatten påvisades vid 105–115 m (–52 till –62 m ö.h.). Området i anslutning till den högresistiva strukturen verkar ha potential för större grundvattenuttag (fig. 22).

En annan intressant geologisk iakttagelse är den kilformade, storskaliga struktur som dominerar resistivitetskartan från ca –20 m ö.h. till ca –80 m ö.h. (fig. 23, bilaga 1). Strukturen följer i stort Gotlands förmodade siluriska kustlinje som låg nordost om detta område vid denna tidpunkt. Den successivt tilltagande utbredningen av den högresistiva kalkstensstrukturen mot sydväst tolkas som en successiv förflyttning av kustlinjen i samma riktning under silurisk tid motsvarande Klintebergsformationens bergarter. Rent hydrogeologiskt har denna struktur en stor betydelse. Stora delar av dessa bergarter har en tät struktur vilket gör att de kan ha en hög resistivitet trots att de ligger under nivån för det salta grundvattnet.

## OMRÅDE 2. VISBY Ö

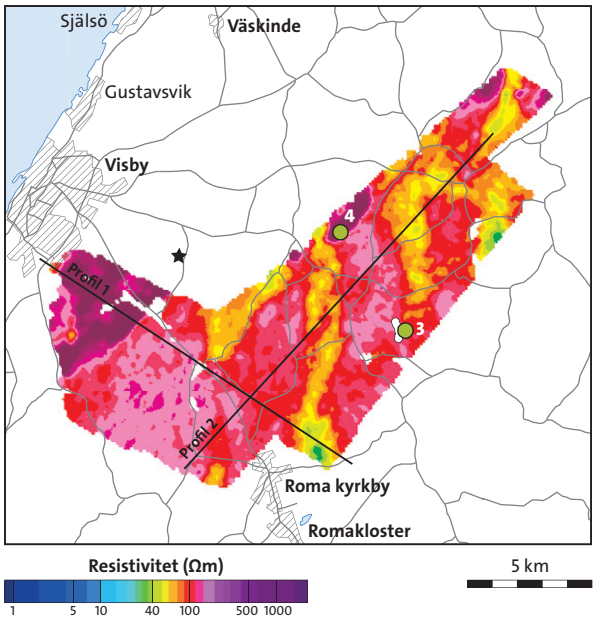
Inversionsresultaten av SkyTEM-data från område 2 visas i bilaga 1 i djupintervall om 10 m. Förutom SkyTEM-data har information från en ERT-profil (profil 3 nära borrhål 3), två borrningar (borrhål 3 och 4) och data från borrhålsloggning av dessa borrhål (fig. 24) använts.

SkyTEM-resultaten (fig. 24) från de översta metrarna överensstämmer i huvudsak med SGUs jordartskarta (fig. 25). I data kan man skilja ut tre huvudsakliga resistivitetsintervall med olika geologiskt innehåll:

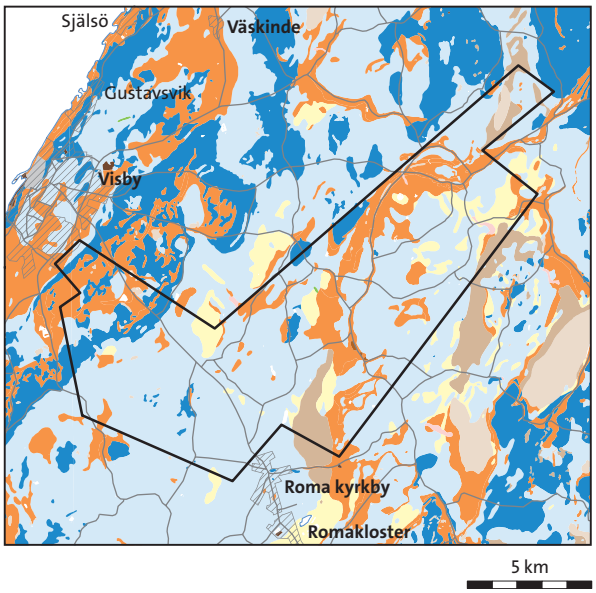
- Mycket hög till hög resistivitet (>400 Ωm) motsvarar områden med häll och tunna jordlager i områden med fragmentkalksten (kalkarenit) och revkalksten.
- Medelhög resistivitet (90–200 Ωm) motsvarar områden med ytligt förekommande märgelsten, områden med morän och ibland sand.
- Låg resistivitet i intervall med 20–90 Ωm motsvarar områden med lera, silt, kalkbleke, organogena jordarter, morän och sand. Dessa områden förekommer i huvudsak i fyra nord–sydliga strukturer som följer topografiska sänkor.

För område 2 skapades en förenklad geologisk modell längs två profiler (fig. 26) bestående av fyra lager. De två profilernas lägen är markerade i figur 24.

Lager 1 (blå i fig. 26): Det översta lagret är betydligt mer heterogent än vad som visas i modellen vilket syns vid en jämförelse med resistivitetsmodellerna. Geologisk information från t.ex. borrhål gör att man kan dela in lagret i ett antal underenheter, både horisontellt och vertikalt. Genomgående kan man se en skillnad i resistivitetsfördelningen i berggrunden i en västlig, högresistiv del med kalksten och en östlig, låg-




Figur 24. Medelresistiviteten för de översta 10 m, lokalisering av borrhål 3 och 4 (gröna punkter) samt läget för den ERT-profil som utfördes i område 2 (vit linje). Den svarta stjärnan markerar lokalisering för borrningen som visas i figur 15.




Figur 25. Jordartskarta över område 2. Undersökningsområdet markeras med den svarta ramen. Se figur 9 för teckenförklaring.

resistiv del med märgel. Tydligast blir detta där den rena kalkstenen är som mäktigast, t.ex. i det sydvästra hörnet där den rena kalkstenen utgör en höjd och märgelstenen tar vid nedanför höjden (fig. 26A). Data från borrhål 4 (se fig. 24) och från borrhålet Tallbacken 1 vid St. Vede (fig. 15, 24) visar på en övergång från relativt ren kalksten till en lerigare kalksten på 35 m djup (ca –10 m ö.h.) respektive 30 m djup. Mäktigheten av lager 1 varierar mellan 50 och 100 m i profilerna.

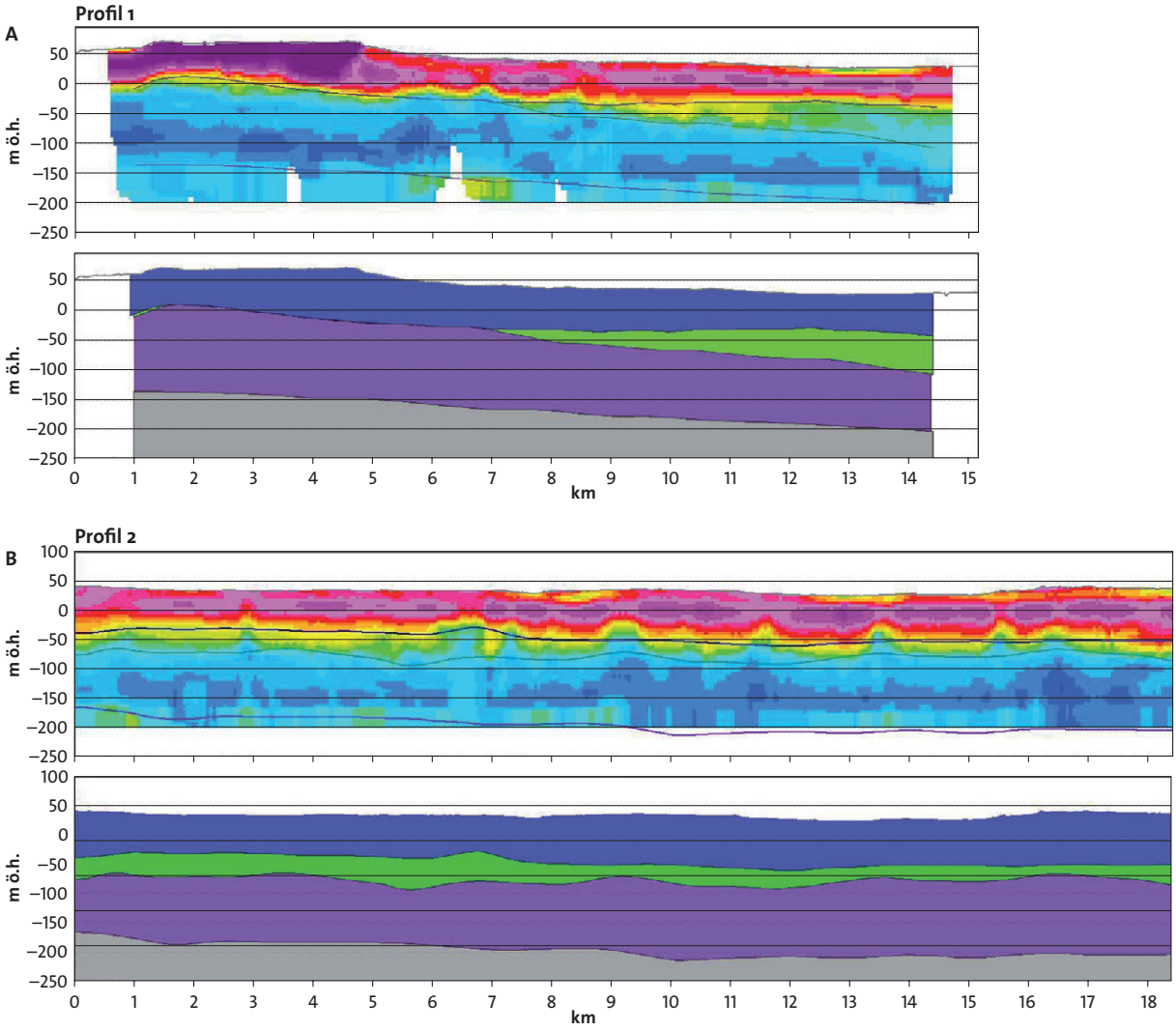
Lager 2 (grön i fig. 26): Lagret saknas i de västra delarna av område 2 där lager 1 direkt överlagrar lager 3 (Profil 1 i fig. 26). Den mer eller mindre horisontella överytan ligger på mellan –23 m ö.h. och –65 m ö.h. Lagrets mäktighet varierar mellan 0 och 75 m. Lager 2 skiljer sig från lager 3 genom att det har en något högre resistivitet vilket kan vara litologiskt betingat. En tolkning är att bergarterna i lager 2 innehåller mindre lermineral än bergarterna i lager 3. En annan möjlighet är att grundvattnet i lager 2 har en något lägre salthalt än i lager 3. Detta skulle kunna bero på så kallad urvaskning, dvs. att sött grundvatten har trängt undan relikt saltvatten. Från borrningen av borrhål 3 (fig. 24, bilaga 3) kan man se att de översta 88 m består av mycket uppsprucket berg. Det betyder att det finns förutsättningar för mycket grundvatten och därmed möjlighet för urvaskning. Från borrhålsloggningen av borrhål 3 (fig. 24) kan man urskilja gränsen mellan lager 1 och 2 vid 57 m djup (bilaga 4). Någonstans inom lager 2 (eller lager 3) ligger nivån för var man riskerar att få ett saltpåverkat grundvatten.

Lager 3 (lila i fig. 26): Överytan av lager 3 ligger på 10 m ö.h. till –120 m ö.h. och har en stupning på 0,4° (7 m per km) mot sydost (Profil 1 i fig. 26). Mäktigheten varierar mellan 110 och 125 m. Lager 3 består troligen av någorlunda homogen märgelsten. Någonstans inom lager 3 (eller lager 2) ligger nivån för var man riskerar att få ett saltpåverkat grundvatten.

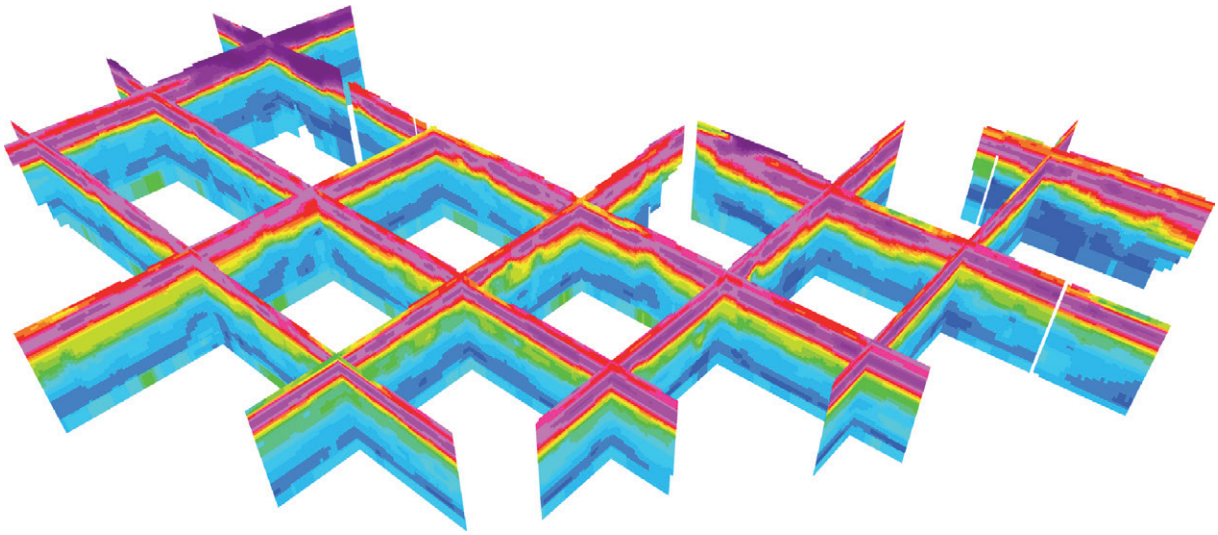
Lager 4 (grå i fig. 26): Det understa lagret i modellen bedöms motsvara den ordoviciska Klasenkalkstenen med en överyta som ligger på –125 m ö.h. till –250 m ö.h. Överytan på lagret har en stupning på 0,3° mot sydost. Enligt Erlström m.fl. (2009) visar ett fåtal borrningar på att denna litologiska gräns (övergång från silurisk märgel- och lersten till ordovicisk kalksten) ligger på mellan –150 och –250 m ö.h. inom området (fig. 26) vilket visar att SkyTEM-data och de tidigare erfarenheterna stämmer mycket väl överens.

Figur 27 visar en tredimensionell bild över området som användes som underlag för att skapa de ytor som visar på vilken nivå de olika lagren i den geologiska modellen uppträder (fig. 26).

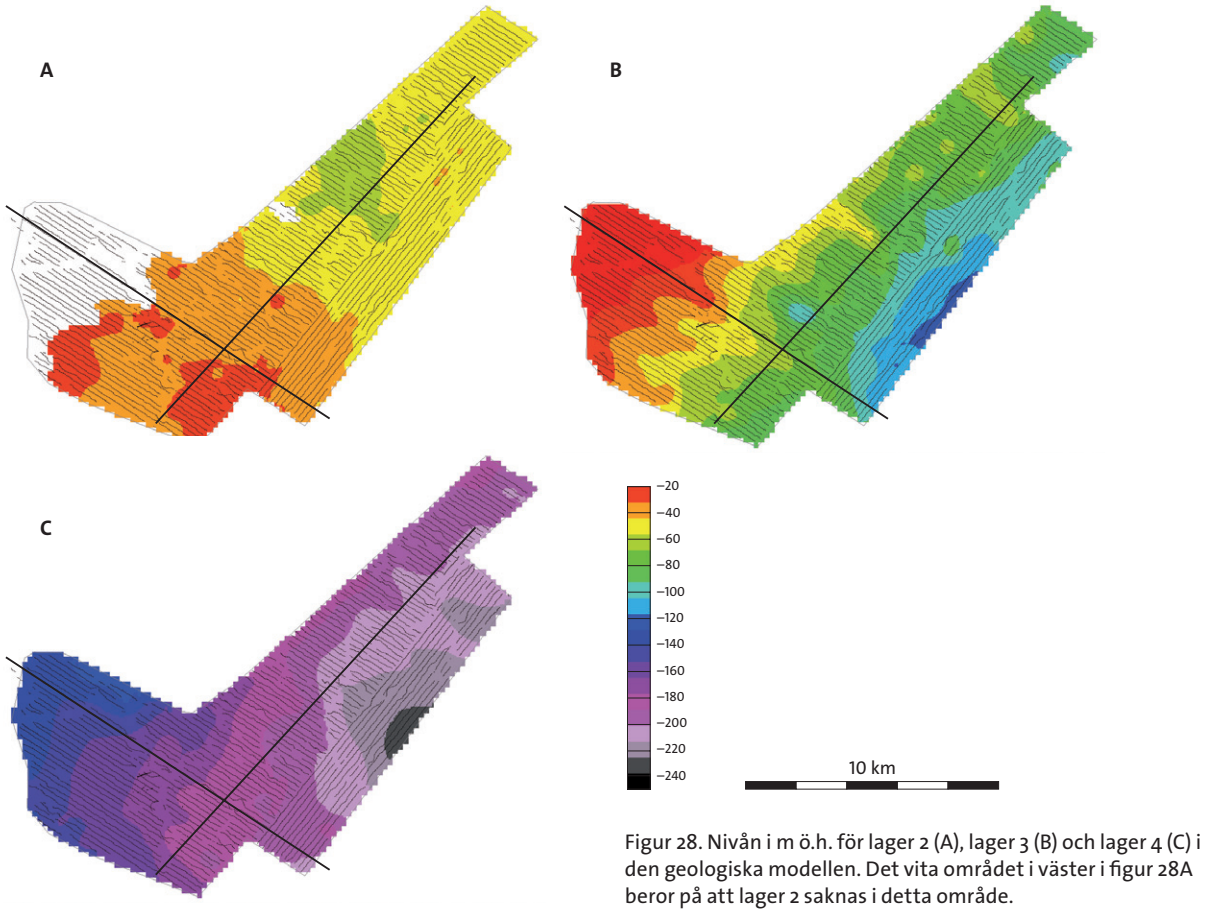
Den nivå där man riskerar att få ett saltpåverkat grundvatten bedöms sammanfalla med överytan av lager 2 i öst och med lager 3 i väst, vilket är en konservativ bedömning (jämför nivån för 40 Ωm som vi tolkar som nivån för det salta grundvattnet i bilaga 5).




Figur 26. Profil 1 (**A**) och profil 2 (**B**) visar resistiviteten längs de svarta linjerna som är markerade i figur 24. Under varje profil visas förenklade geologiska modeller som är tolkade efter de gränsdragningar som är markerade i resistivitetsprofilerna. De olika färgerna i de tolkade profilerna förklaras i texten. Se figur 24 för förklaring av färgerna i resistivitetsprofilerna.



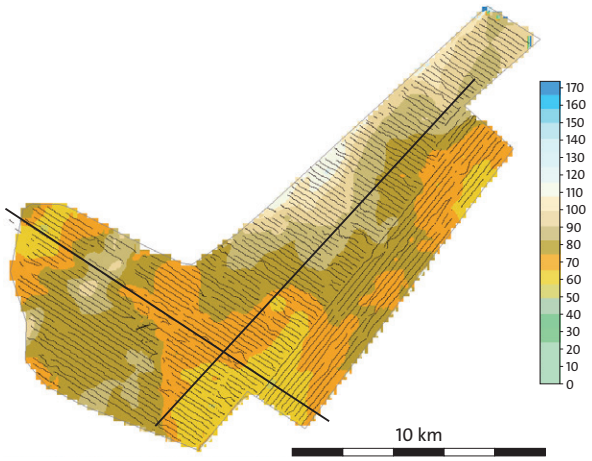
Figur 27. Resistivitetsdata från området visat i ett rutnät av sektioner som en tredimensionell figur. Figuren visar området sett från ostsydost. Se figur 24 för förklaring av färgerna.




Figur 28. Nivån i m ö.h. för lager 2 (A), lager 3 (B) och lager 4 (C) i den geologiska modellen. Det vita området i väster i figur 28A beror på att lager 2 saknas i detta område.

I resistivitetsprofilerna i figur 26 kan man se att resistivitetsvärdena vid övergången till lager 2 och 3 ligger under 100 Ωm och i de flesta fall nära 40 Ωm. I borrhål 3 syns en ökning av konduktiviteten vid 42 m (–21 m ö.h.), 58 m (–33 m ö.h.) och 68 m (–43 m ö.h.). Vid 42 m djup (–21 m ö.h.) går konduktiviteten över 1 000 mS/m viket ungefärligen motsvarar en salthalt på 300 mg/l. Resistivitetskurvan visar inte lika tydliga språng utan en mer gradvis minskning från ca 100 Ωm vid 42 m (–21 m ö.h.) och nedåt. Vi anser dock att konduktivitetsresultaten från loggning av borrhål 3 inte är helt tillförlitliga, utan att mätningen sannolikt är påverkad av den korta tiden mellan borrningen och borrhålsloggningen. Det gör troligen att vattnet i borrhålet fortfarande var omrört vid borrhålsloggningen. I borrhål 4 däremot framträder en mycket tydlig förändring av konduktiviteten i vattenpelaren på ca 93 m djup (–37 m ö.h.). Vid denna nivå ändras resistiviteten också till <100 Ωm (bilaga 4). Inom lager 1 bör riskerna vara mycket små att stöta på saltvatten vid brunnsborrning.

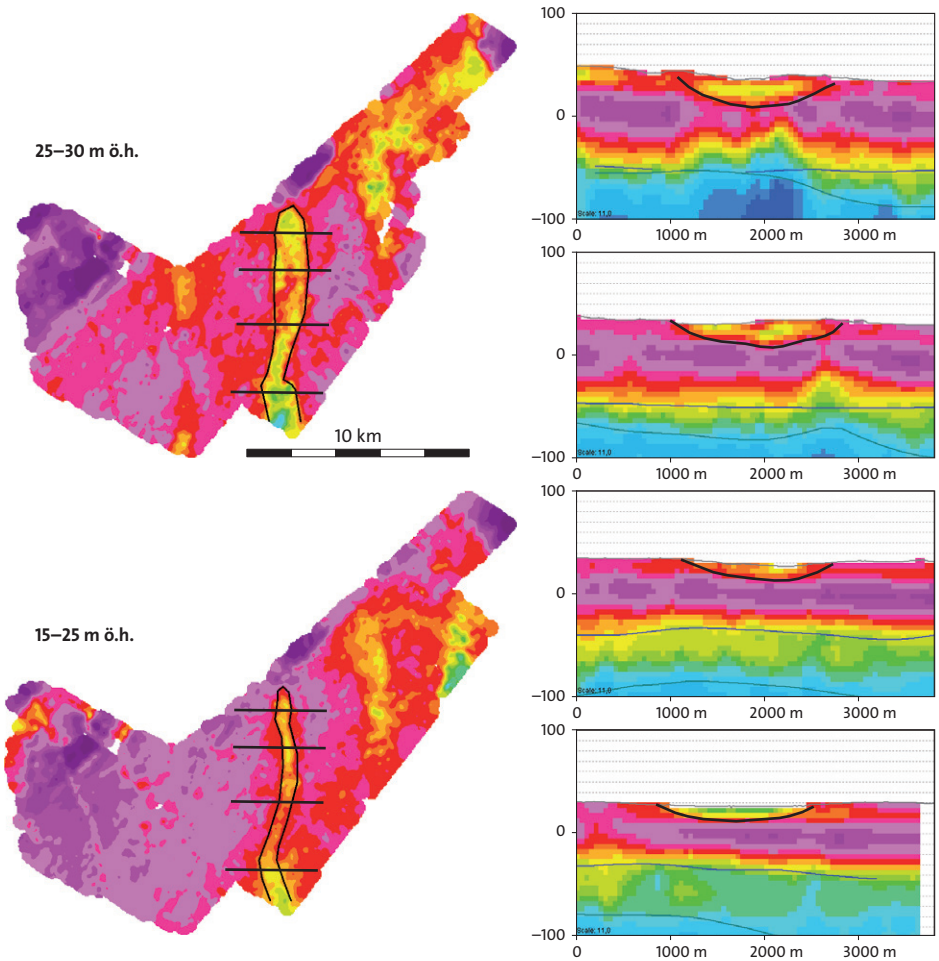
I figur 29 redovisas en djupkarta som visar på vilket djup (meter under markytan) man riskerar att få ett saltpåverkat grundvatten. Det går inte att urskilja vilken koncentration det salta grundvattnet har i lager 2




Figur 29. Mäktighet av lager 1 (djup till lager 2 i öster och lager 3 i väster). Figuren kan även sägas visa en tolkning av djupet till nivån där man riskerar att få ett saltpåverkat grundvatten vid en borrning.

och 3, eftersom berggrunden på samma nivå uppvisar en förändring i lerinnehåll. Kartan kan finjusteras med hjälp av t.ex. vattenanalysresultat i framtiden.

En av de nord–sydliga strukturer med lägre resistivitet som nämnts ovan (fig. 24) är en delvis begravd dal




Figur 30. Till vänster visas två medelresistivitetskartor för 25–30 m ö.h. (ovan) respektive 15–25 m ö.h. (nedan) med profillägen över en tolkad begravd dal. Till höger visas de fyra profilerna över dalen.

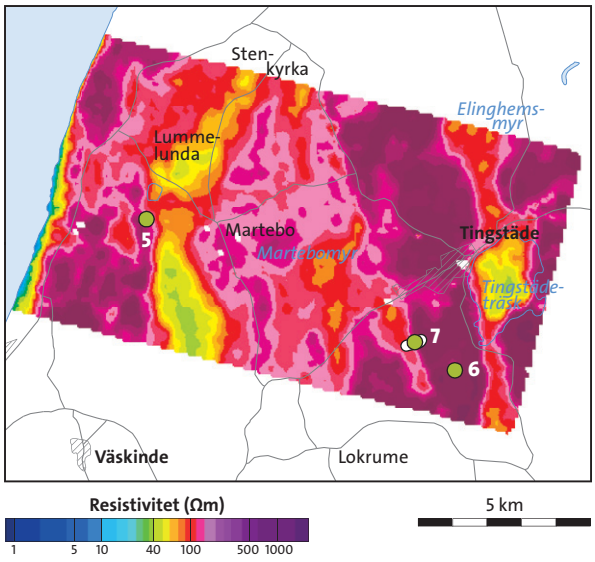
(fig. 30) som skär ned i berggrunden. Den är som mest ca 1,5 km bred och uppemot 30 m djup. Dalstrukturen minskar i bredd ned mot djupet, något som tyder på att det är en verklig dalstruktur. Dess botten ligger ytligast i den södra delen och djupast i norr. Det är dalens fyllning som skiljer sig från omkringliggande jordarter och berggrund. Resistiviteten varierar mellan 30 och 60 Ωm i dalen som bedöms vara fylld av lerig morän, lera eller torv. Det har gjorts ett fåtal brunnsborrningar i dalen och dessa visar på mellan 5 och 17 m jorddjup och företrädesvis leriga jordarter. Strukturen torde i sig inte ha någon potential för större grundvattenuttag. De mäktiga lerlagren kan dock tjäna som ett gott lokalt skydd mot föroreningar. Även de andra strukturerna som syns i figur 24 kan utgöra samma typ av erosionsdal men mäktigheten på sedimenten verkar vara något mindre (bilaga 1).

## OMRÅDE 3. LUMMELUNDA

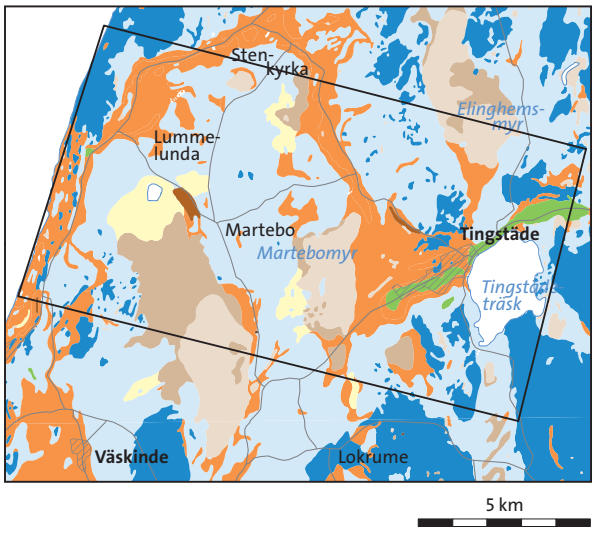
Inversionsresultaten av SkyTEM-data från område 3 visas i bilaga 1. RMT-mätningar utfördes längs en profil (profil 4). Tre borrningar (borrhål 5, 6 och 7) utfördes varav två borrhål loggades (5 och 6).

Medelresistiviteten från inversionsresultaten har beräknats från markytan ner till ca 10 m djup (fig. 31) och jämförts med sammansättningen av de ytnära geologiska lagren (fig. 32). Man kan urskilja tre dominerande områden med specifik geologisk uppbyggnad och geoelektriska egenskaper:

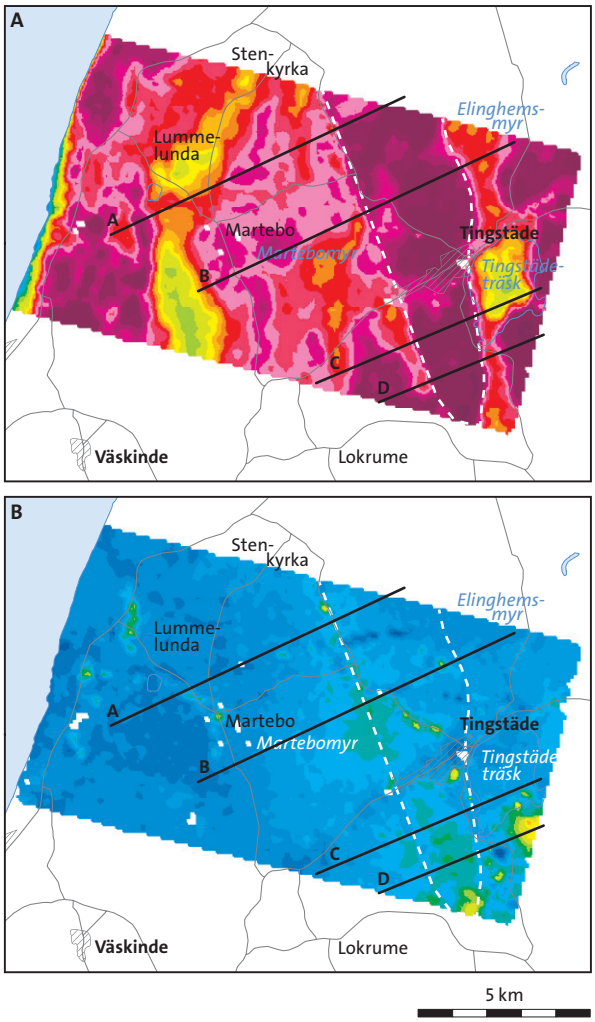
- Områden med mycket hög till hög resistivitet (>400 Ωm) representerar områden med häll och mycket tunna jordlager. Bergarten som dominerar är stromatoporoidékalkstenen som finns i hela området förutom längst i väster. Här påträffas enstaka kroppar av revkalksten som dock inte går att urskilja i SkyTEM-data på grund av den höga resistiviteten även hos omkringliggande berggrund.
- Områden med låg till medelhög resistivitet (60–200 Ωm) motsvarar områden med sand och morän.
- Områden med låg resistivitet (15–60 Ωm) motsvarar områden med lera, silt, organogena jordarter, kalkbleke, morän och sand. De lägre resistiviteterna är i stort sett alltid knutna till fuktiga områden och sjöar. Liksom i område 2 bildar de lågresistiva områdena långsträckta, nord–sydligt riktade stråk som är knut-




Figur 31. Medelresistiviteten för de översta 10 m, lokalisering av borrhål 5, 6 och 7 samt läget för den RMT-profil (nr 4) som utfördes i område 3.




Figur 32. Jordartskarta över område 3. Undersökningsområdet inom den svarta ramen. Se figur 9 för teckenförklaring.

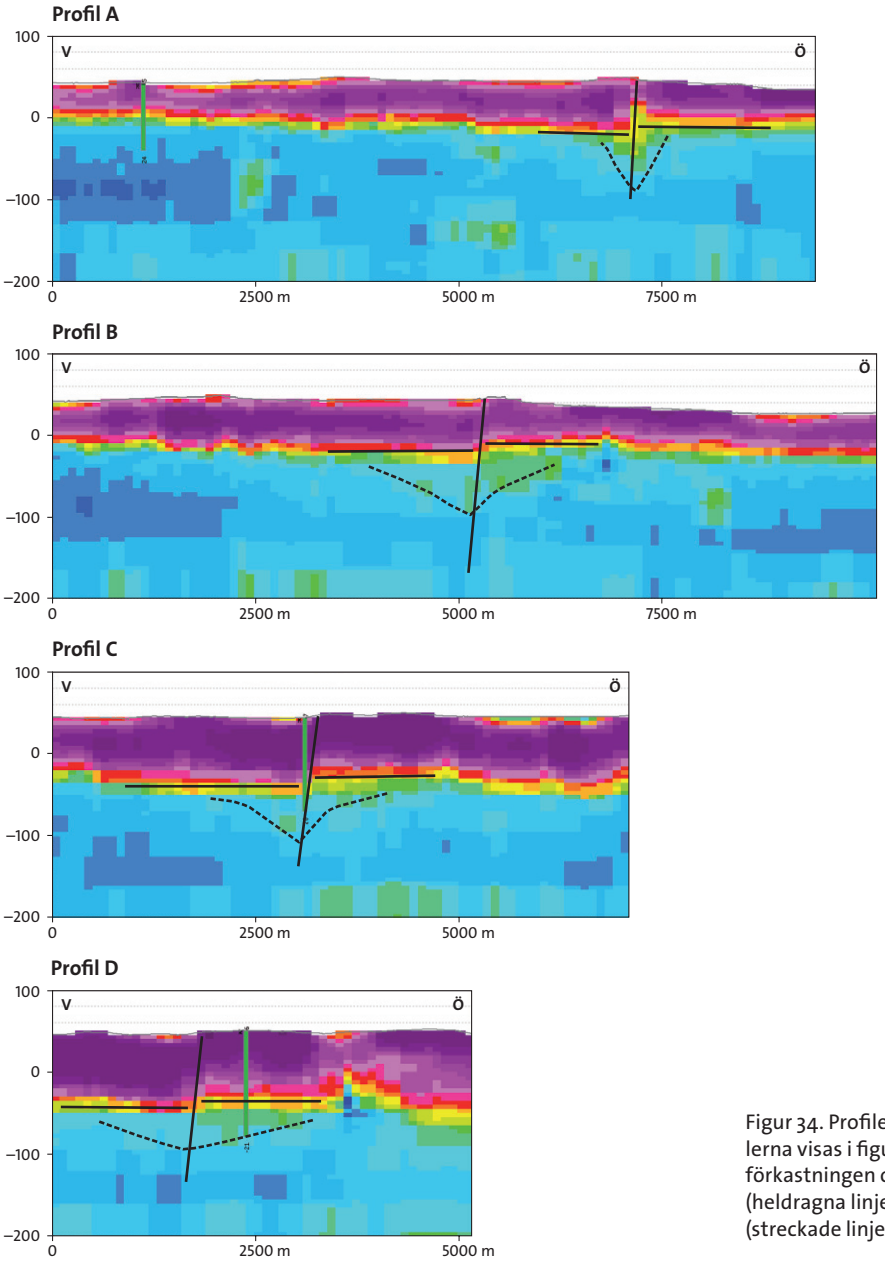



Figur 33. Medelresistivitetskarta för de översta 10 m (**A**) och –50 till –60 m (**B**). De svarta strecken representerar läget för de profiler som visas i figur 34. De vita streckade linjerna visar den kilformade struktur som diskuteras i texten.

na till de topografiskt lågt liggande områdena. Längst i väster finns också ett smalt område med lägre resistivitet som kan knytas till förekomsten av märgelsten.

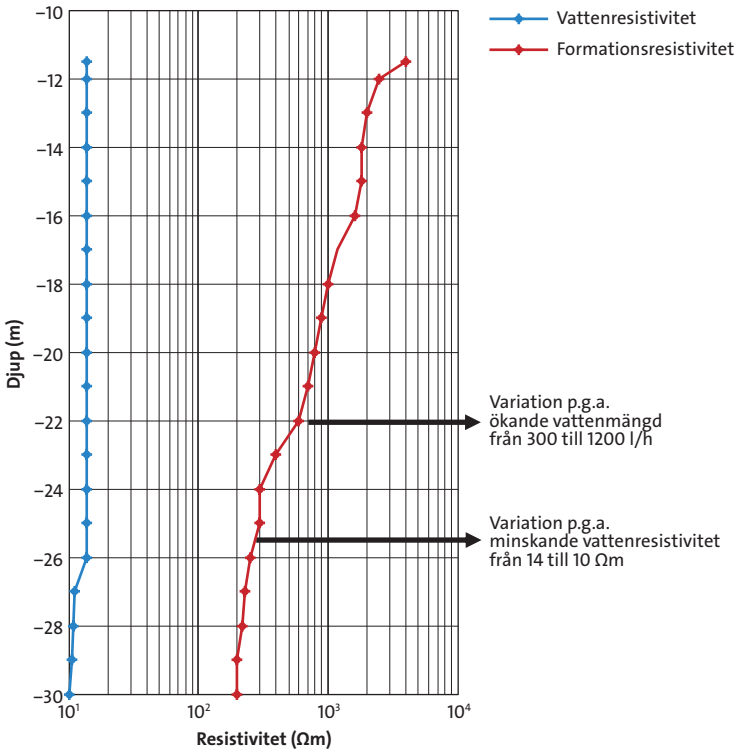
I den östra delen av området visar resistivitetskartorna en bred struktur med nordvästlig till sydostlig strykning (fig. 33) som tydligt framträder i den ytliga fördelningen av jordarter och berggrund. Strukturen sammanfaller med två svaghetszoner i berggrunden som sträcker sig ända ut till kusten i nordväst, där de kan kopplas till förekomsten av två havsvikar vid Lickershamn och Irevik. De två svaghetszonerna skapar en kilformig struktur. I anslutning till det västra benet och ner i det södra hörnet finns det på stora djup en rätt stor skillnad i resistivitet mot omkringliggande berggrund (fig. 33). Resistivitetsprofilerna från SkyTEM-data indikerar att partiet som ligger i denna kilformade struktur har rört sig i höjdled ca 10 m (fig. 34 A–D), dvs. strukturen är förkastningsavgränsad. Detta kan innebära att det finns uppsprucken berggrund i anslutning till dessa zoner och att de kan ha en relativt högre vattenföring än omgivningen. Orsaken till de högre resistiviteterna på större djup (fig. 33) kan vara att det söta grundvattnet har vaskat ur det salta, relikta grundvattnet i detta område. Anledningen till utvaskningen kan vara ett högre vattenflöde knutet till den uppspruckna berggrunden i förkastningszonen. Gränsområdena i anslutning till denna struktur bedöms utgöra bra områden för att hitta större mängder grundvatten.

Figur 35 visar den uppmätta vattenresistiviteten (invers av uppmätt vattenkonduktivitet) och bulkresis-




Figur 34. Profilerna A–D. Lokaliseringen av profilerna visas i figur 33. De svarta linjerna markerar förkastningen och nivåskillnaderna vid denna (heldragna linjer) samt det urvaskade området (streckade linjer).

tiviteten (formationsresistivitet) i borrhål 5. På grund av tekniska problem genomfördes loggningen endast till 30 m djup. Även om det är ett ganska kort mätintervall framträder värdefull information om sambanden mellan olika parametrar som kan påverka bulkresistiviteten (dvs. den modellerade resistiviteten från SkyTEM-data). Enligt borrhålsloggningen (bilaga 3) indikerar gammakurvan tre avsnitt. Från markytan ned till 17 m förekommer ett avsnitt med relativt låga nivåer av gammastrålning, som förmodligen representerar revartad kalksten. Resistiviteten i detta avsnitt är relativ stabil med ett medelvärde på ca 2 000 Ωm. Det andra avsnittet ligger mellan 17 och 27,7 m, under vilket det sker en successiv ökning av gammastrålningen. Förmodligen innehåller avsnittet inslag av märgel, dvs. en ökad andel lermineral vilka orsakar den förhöjda gammastrålningen (Schnyder m.fl. 2006). Från 17 m djup och neråt visar formationsresistiviteten en gradvis minskning från ca 2 000 Ωm till 600 Ωm. Detta hör sannolikt samman med en gradvis ökning av lerinnehållet samt en ökning av porositeten. Dock visar inte vattenkonduktivitetsmätningarna eller den beräknade vattenresistiviteten några variationer ner till 26 m djup. Detta innebär att variationen i den uppmätta elektriska resistiviteten endast kan relateras antingen till förändringar i berggrundens uppbyggnad eller till mängden vatten i berggrunden. Det finns ett tydligt samband mellan ökning av vattenmängd och minskning av resis-

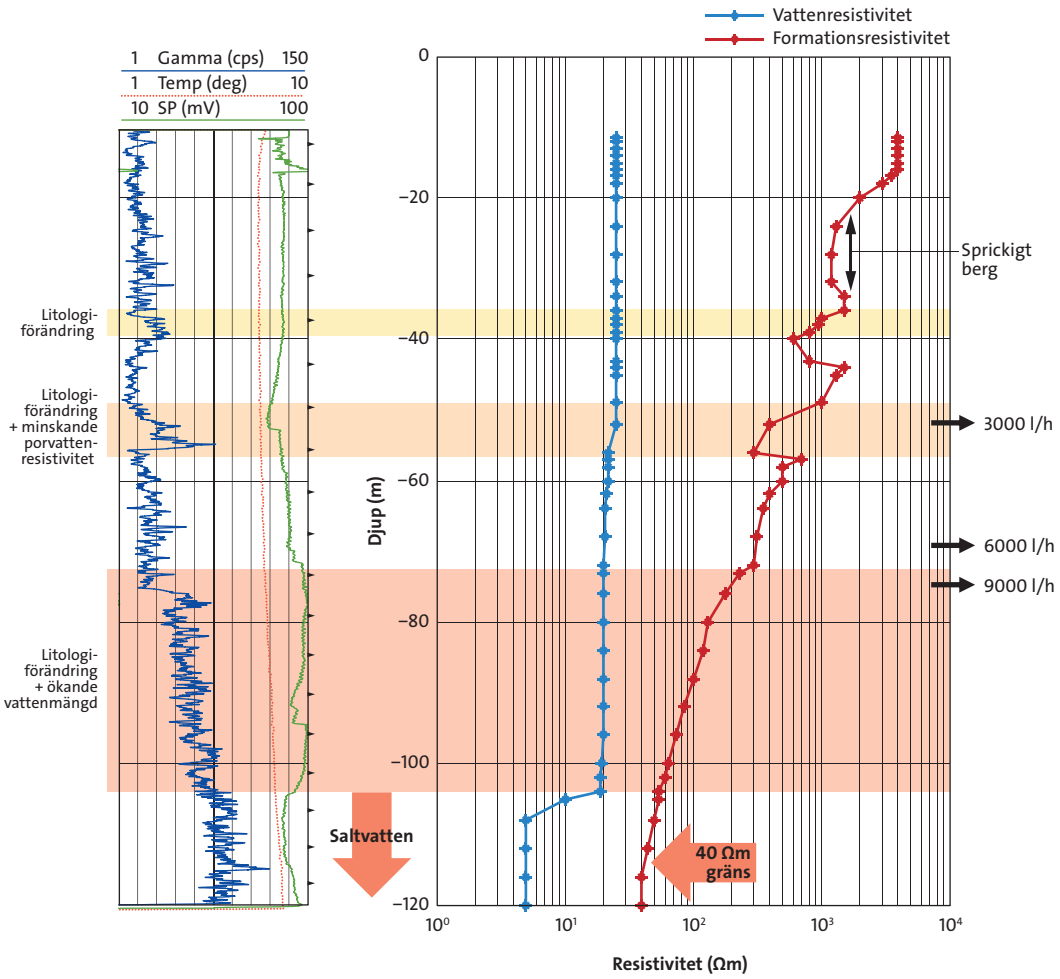



Figur 35. Resultat från loggning av bulkresistiviteten (formationsresistivitet) och vattenkonduktivitet i borrhål 5. För att kunna jämföra variationen av de uppmätta parametrarna har vi konverterat vattenkonduktivitet till resistivitet (blå kurva). Variationen av de uppmätta vattenmängderna (jämför bilaga 3) visas på högersidan.

tivitet vid 22 m djup (borrhål 5) där vattenflödet ökar från 300 l/h till 1 200 l/h. Detta indikerar antingen en ökad porositet eller en ökad förekomst av vattenfyllda sprickor (se ekvation 3 eller Archie 1942). Vid 26 m djup minskar vattenresistiviteten från 14 Ωm till 10 Ωm. Den uppmätta formationsresistiviteten (270 Ωm) minskar på 26 m djup och stabiliseras på 200 Ωm på ca 30 m djup.

I figur 36 presenteras insamlade data och observationer från borrhål 6. Dessa data uppvisar mycket intressant och värdefull information om vattenmängd, vattenkvalitet samt de geologiska enheternas variationer. Gammastrålningen visar ett stabilt värde kring 30 cps (counts per second) från markytan ner till ca 36 m djup. Genom hela intervallet är vattenresistiviteten ca 25 Ωm. Däremot sker en gradvis minskning av den uppmätta resistiviteten från 5 000 Ωm (under 16 m) till ca 1 200 Ωm (på 32 m djup). Denna minskning kan tolkas som revartad kalksten (5 000 Ωm) som är delvis sprickig (1 200 Ωm). I borrhål 6 (bilaga 3) finns en anmärkning att sprickfrekvensen ökar markant på 29 m djup. Vid 36 m har zon 1 markerats med gul färg (fig. 33) där en ökning av gammastrålningen till ca 40 cps tyder på en förändring av bergrundens uppbyggnad. En gradvis minskning av den uppmätta resistiviteten från 1 200 Ωm till 600 Ωm inom samma djupintervall tyder på att innehållet av lermineral ökar. Djupavsnittet 40–50 m visar samma egenskaper som den sprickrika revkalkstenen. Mellan 49 och 57 m minskar bulkresistiviteten från 1 200 Ωm till 300 Ωm, samtidigt som gammastrålningen ökar (15 till 75 cps), vattenresistiviteten minskar (25 till 20 Ωm) och vattenmängden ökar (till 3 000 l/h på 51 m djup). Sammantaget gör det att vi tolkar detta intervall som en egen zon (zon 2, fig. 36). Dessa observationer betyder troligen att halten av lermineral (inslag av märgel i revkalksten) samt porositeten ökar. Bulkresistiviteten minskar måttligt i djupintervallet 56–73 m. Dock kan man se en minskning i gammastrålning och en ökad vattenmängd (6 000 l/h) vid 66 m. Under 73 m minskar bulkresistiviteten (upp till 100 Ωm) på 88 m djup. Gammastrålningen ökar markant för samma intervall och når 90 cps på 106 m djup. Vattenresistiviteten är dock stabil i detta intervall (20 Ωm) vilket tyder på samma vattenkvalitet. Djupintervallet 73–106 m har markerats som zon 3 i figur 36, och här består berggrunden troligen av märgelsten. Vattenmängden ökar till sin högsta nivå 9 000 l/h i borrhålet på ca 74 m djup. Detta tyder på att grundvattnet framför allt förekommer i gränsen mellan de två geologiskt åtskilda bergarterna kalksten (över) och märgelsten (under). Under 106 m faller porvattenresistiviteten från 20 Ωm till lägre än 5 Ωm. Detta tolkar vi som saltvattennivån där formationsresistiviteten når gränsvärdet 40 Ωm.

Figur 37 visar resultaten från en 2D-modellering av RMT-data och en profil med SkyTEM-data. RMT-profilen ligger 1,5 km nordväst om borrhål 6 och vi har

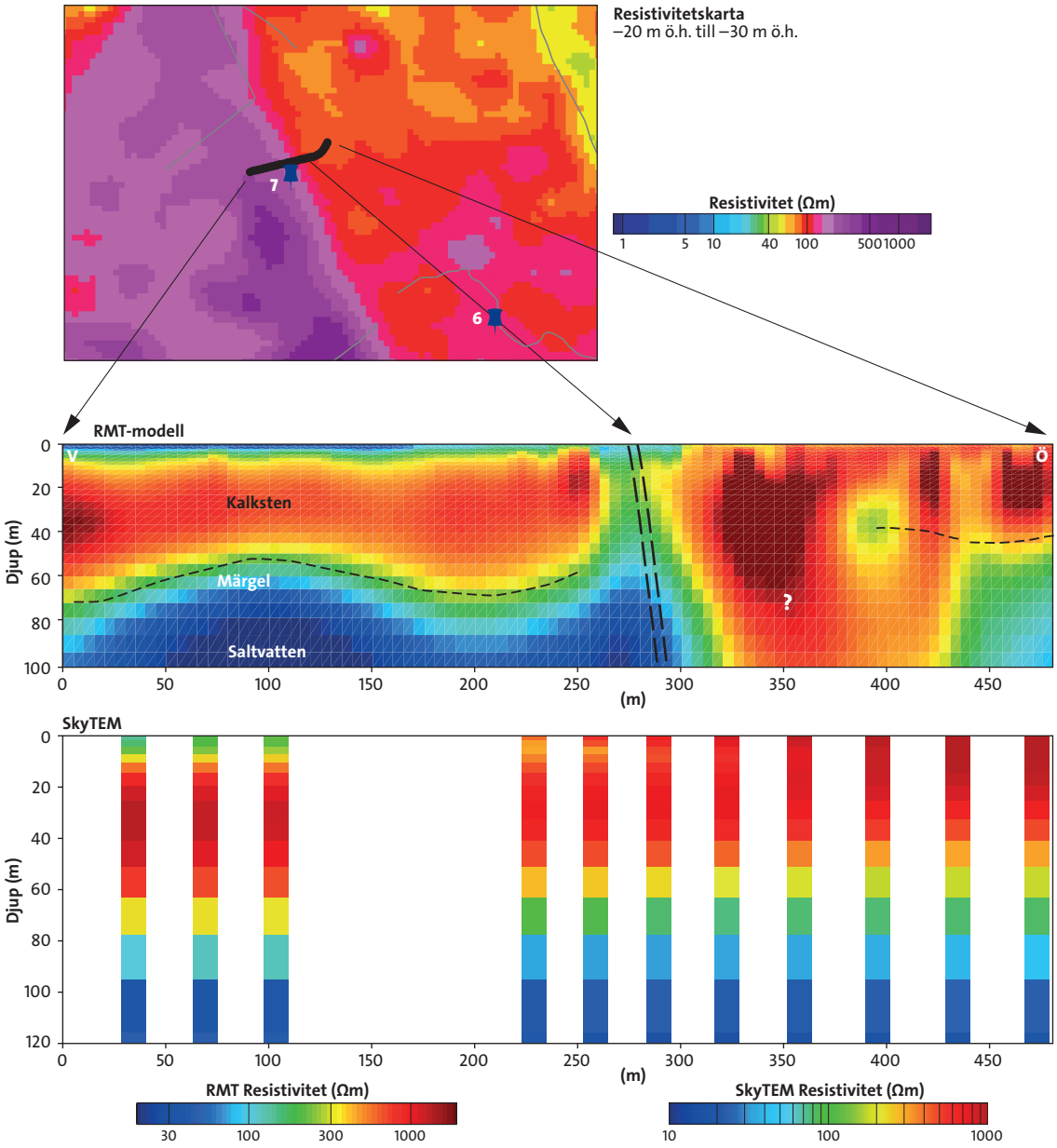



Figur 36. Resultat från loggning av formationsresistivitet och vattenresistivitet (till höger) samt gammastrålning, temperatur och självpotential (till vänster) i borrhål 6. För att kunna jämföra variationen av de uppmätta parametrarna har vi konverterat vattenkonduktivitet till resistivitet (blå diagram). Variationen av de uppmätta vattenmängderna från brunnsborrningen (jämför bilaga 3) visas till höger.

använt informationen från detta borrhål för att tolka och beskriva RMT-modellen. I borrhål 7 genomfördes ingen loggning på grund av tidsbrist. RMT-modellen visar en tydlig lågresistiv zon och en kontakt mellan höga och låga resistiviteter vid 300 m (den streckade, branta och svarta linjen i RMT-modellen). Den sammanfaller med en liknande kontakt i resistivitetskartan (–20 till –30 m ö.h, fig. 37).

RMT-modellen visar en god korrelation med SkyTEM-modellen i den västra delen av profilen (0–250 m) där vi har ett ca 60 m mäktigt, högresistivt lager i ytan samt i slutet av profilen (440–490 m) där vi har ett ca 40–50 m mäktigt, högresistivt lager i ytan. Det finns även ett lågresistivt lager i ytan (jordlager) i båda modellerna. Mellan 320 och 430 m är korrelationen mycket dålig mellan RMT- och SkyTEM-modellerna. Den högresistiva strukturen som kommer fram i modellen är troligen orsakad av störningar i data på grund av ett elstängsel i närheten. Tabell 3 sammanfattar informationen från borrprotokollet i borrhål 7 (bilaga 3) tillsammans med modellerade resistiviteter för samma djup. Den uppmätta vattenmängden i borrhål 7 är betydlig mindre än den som uppmättes i borrhål 6, vilket betyder att bulkresistiviteten bör vara högre i borrhål 7. RMT-modellen i närheten av borrhål 7 (fig. 37) visar relativt hög bulkresistivitet över den tolkade saltvattenytan där det finns en mindre vattenmängd, och den sjunker vid stigande salthalt (t.ex. på 87 m djup). Den högresistiva zonen i RMT-modellen mellan 0 och 260 m tolkas som förekomst av revartad kalksten som delvis är uppsprucken. Den djupaste lågresistivitetszonen i RMT-modellen, med resistivitet upp till 100 Ωm (fig. 34), visar sannolikt förekomst av saltvatten i berggrunden.

I figur 38 visas resistivitetsfördelningen för olika djupintervall tagna från modellering av SkyTEM-data

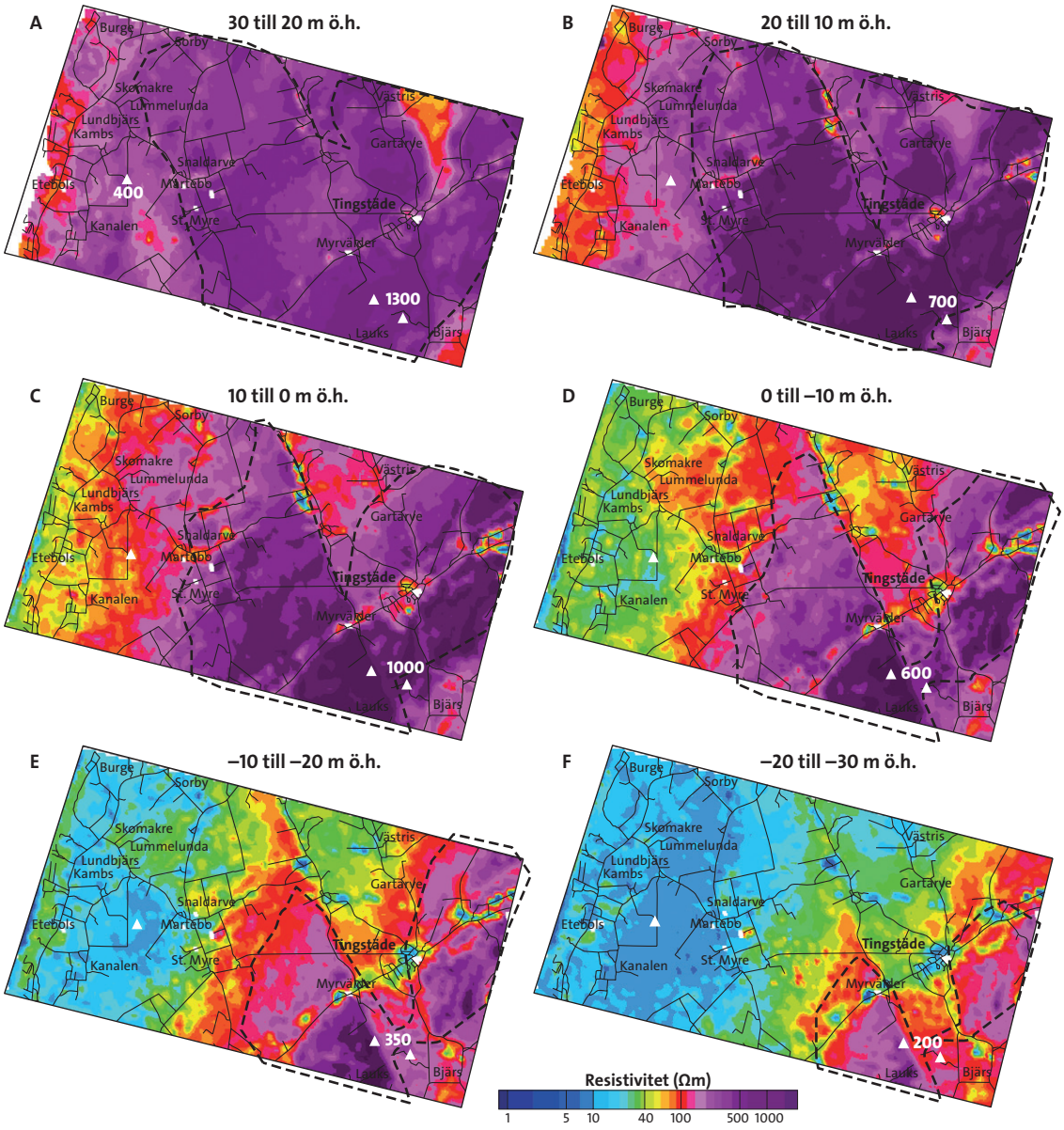



Figur 37. Medelresistivitetskarta (–20 till –30 m ö.h.) från SkyTEM (överst). Resistivitetsmodell från 2D-modellering av RMT-data (mitten) och 1D-modellering av SkyTEM-data (nederst). Notera även förkastningen i SkyTEM-modellen som syns i figur 34. I resistivitetsmodellerna visas djupet från ytan.

i område 3. De streckade linjerna visar den ungefärliga gränsen mellan revartad kalksten och märgelsten. Variationen av resistivitet i djupintervallet 20–30 m (fig. 38A) tyder på att den västra delen av området domineras av märgelsten och lagrad kalksten. Gammastrålningsdata visar ett ökat innehåll av lermineral, och resistivitetsdata i borrhål 5 indikerar att ett lågresistivt lager finns under 20 m djup (jämför fig. 35). I figur 38A visas medelvärdet av den uppmätta resistiviteten (400 Ωm) i borrhål 5 på 20–30 m djup. Medelvärdet överensstämmer bra med resistiviteten från SkyTEM-data.

Tabell 3. Sammanfattning av borrprotokollet från borrhål 7 och resistivitetsresultaten från RMT profil 3.

| Djup (m) | Vatten-mängd (l/h) | Resistivitet i RMT-modell (Ωm) | Anmärkning |
|---|---|---|---|
| 24 | 120 | ~1200 | Kalksten 1–115 m |
| 33 | 300 | ~1200 | |
| 87 | 1200 | <100 | Salt grundvatten |



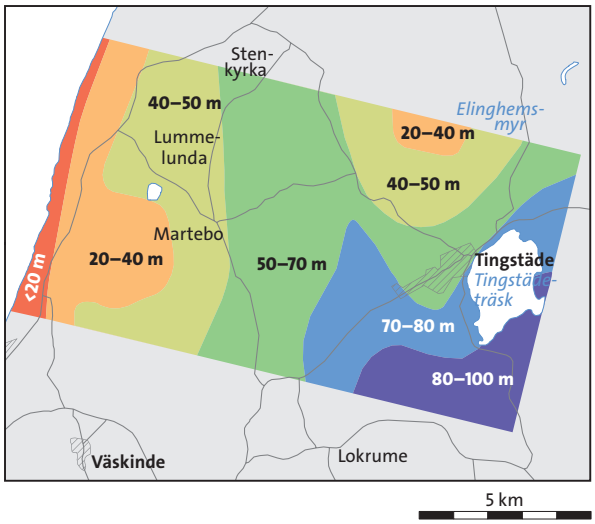

Figur 38. Preliminär tolkning av områdets berggrund baserat på resistivitetsmodeller i olika djup från SkyTEM-data, borrhålsloggningsdata, RMT-profilen och borrprotokoll i borrhål 5, 6 och 7 i område 3. De svarta streckade linjerna visar gränsen mellan revartad kalksten och märgelsten och lagrad kalksten. Vita trianglar indikerar läget av borrhål 5, 6 och 7. De vita siffrorna visar de uppmätta formationsresistiviteterna i borrhålen. RMT-profilen visas som en vit linje nära borrhål 7.

I figur 39 visas en approximerad modell som visar borrdjupet till det salta grundvattnet. Tolkningen är baserad på SkyTEM-resultaten och övriga mätdata från undersökningen och följer i princip gränsen för 40 Ωm (jämför figur 3 i bilaga 5). Isolinjerna går relativt parallellt med kusten fram till den västra svaghetszonen, som diskuterats tidigare i detta avsnitt. Där svänger riktningen mot nordväst–sydost.

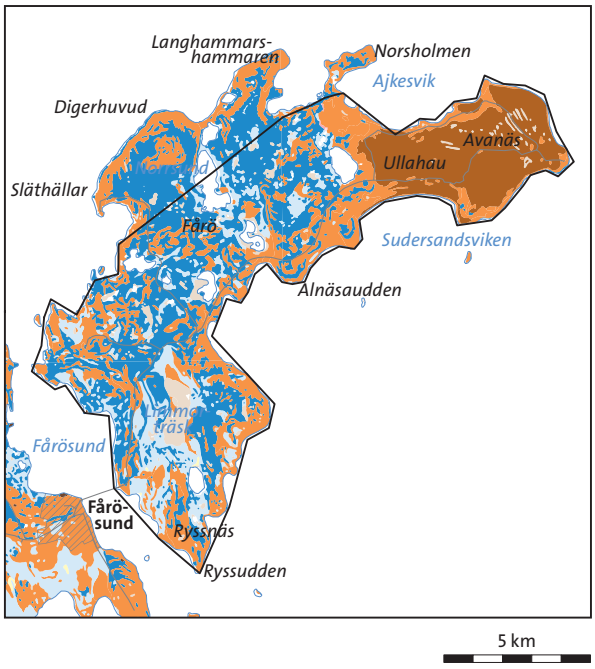
## OMRÅDE 4. FÅRÖ

Inversionsresultaten av SkyTEM-data från område 4 visas i bilaga 1 i intervall om 10 m. På Fårö har vi utfört en mycket grundlig genomgång av materialet. Detta gjordes delvis för att Region Gotland var med och finansierade delar av undersökningen på Fårö, delvis för att undersökningsresultaten från området har använts i ett examensarbete (Thulin Olander 2015). I Thulin Olanders (2015) arbete redovisas även kompletterande information om området.

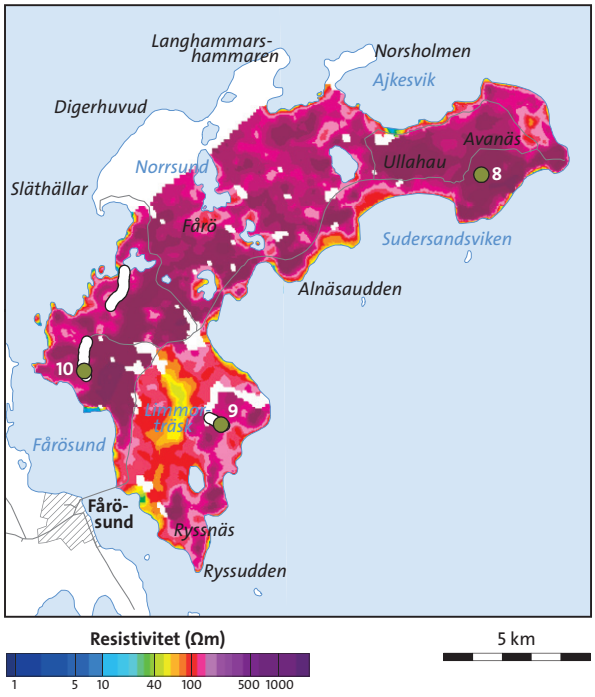
RMT-mätningar utfördes längs tre profiler (fig. 40) och i anslutning till två av dessa utfördes borrhål 9 och 10 varav borrhålsloggning gjordes i borrhål 9 (fig. 40). En tredje borrning (borrhål 8) utfördes på östra delen av ön vid Avanäs (fig. 40). SkyTEM resultaten från de




Figur 39. Djupet till tolkad saltvattengräns i område 3. Djupet stämmer i huvudsak överens med gränsen för 40 Ωm (se bilaga 5).




Figur 41. Jordartskarta över Fårö. Undersökningsområdet inom den svarta ramen. Se figur 9 för teckenförklaring.

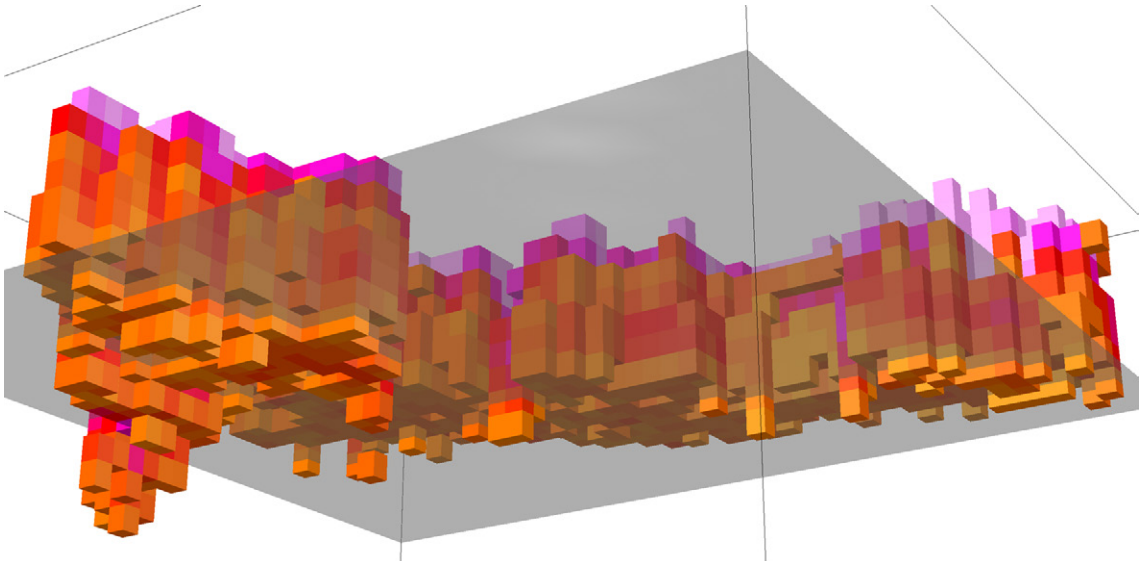



Figur 40. Medelresistivitet för de översta 10 m, lokalisering av borrhål 8, 9 och 10 samt läget för de RMT-profiler som utfördes på Fårö.

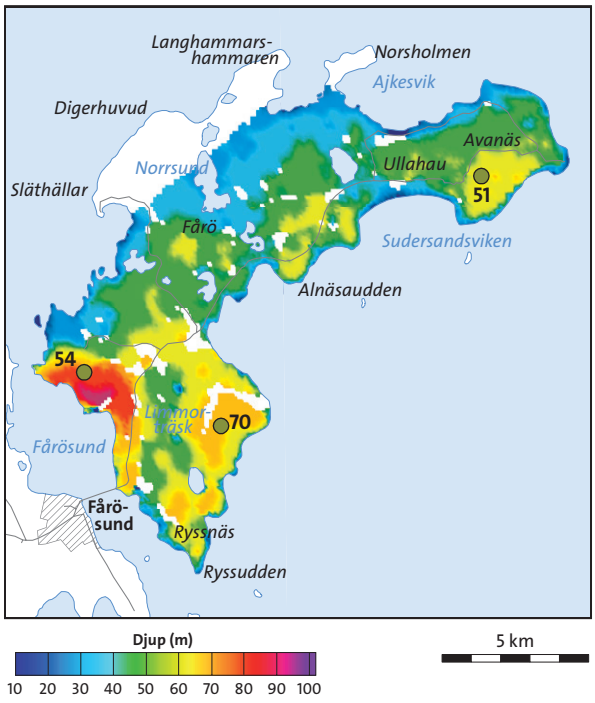
översta 10m (fig. 40) överensstämmer i huvudsak med SGUs jordartskarta (fig. 41)

Gränsvärdet för att indikera att salt grundvatten förekommer i en bergvolym är satt till 40 Ωm enligt diskussion i avsnittet Metodik. Figur 42 visar delar av en resistivitetsmodell (s.k. voxelmodell) inom ökroppen på Fårö. Det är endast den del av modellen där resistiviteten överstiger 40 Ωm som visas i figur 42, dvs. den del av berggrunden och jorden där inte nämnvärda mängder av salt grundvatten beräknas förekomma. Av figur 42 framgår att det salta grundvattnet är undanträngt i de sydvästra delarna där en konformig enhet förekommer ända ned till drygt –100 m ö.h. En möjlig förklaring kan vara att området domineras av en tät kalksten utan lerinslag. Den låga porositeten och sprickfrekvensen gör då att det salta grundvattnet upptar så liten volymandel att det inte förmår sänka resistiviteten tillräckligt för att bulkresistiviteten ska bli lägre än 40 Ωm. Geometrin i den geologiska uppbyggnaden i detta område förefaller störd. Bergartsgränsernas stupningar avviker från den gängse på Fårö. Tolkningen är att den massiva kalkstenen här under årmiljonernas gång sjunkit ner i den underliggande, relativt mjukare berggrunden. I området gränsar mycket höga resistiviteter mot mycket låga resistiviteter vilket är en tydlig markering på förändrade förhållanden över ett mycket kort avstånd (jämför bilaga 2). En annan förklaring på den markanta gränsen är att det finns en förkastning i området.

I figur 43 visas en översiktlig bild av ett möjligt läge för salt grundvatten (gränsen för 40 Ωm) på Fårö. Man kan tydligt se att det är ett mindre djup ned till det salta grundvattnet i de norra delarna av undersökningsområdet och ett större djup längre söderut. I stort sett kan gränsen till det salta grundvattnet sägas följa gränserna mellan olika bergartsled med en stupning på ca 0,2 % i nordväst–sydostlig riktning vilket är samma lutning som de geologiska lagren på Fårö har (jäm-

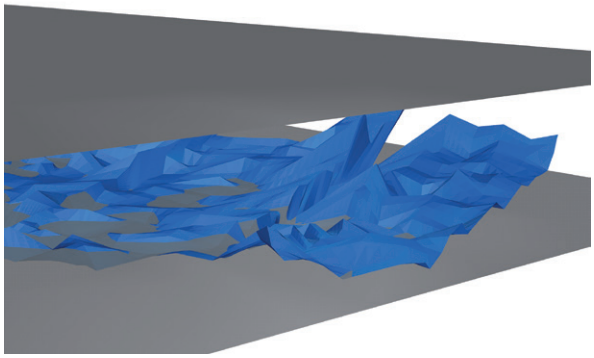


Figur 42. Resistiviteter över 40 Ωm enligt SkyTEM-undersökningen visas med ett kraftigt överdrivet vertikalt mått. Betraktelsepunkten ligger sydost om Fårö under havsytan. Planet ligger på –50 m ö.h.




Figur 43. Djupet från markytan till gränsen för 40 Ωm. Nivån 40 Ωm tolkas som gränsen till det salta grundvattnet. I figuren visas även de tre borrhålen och det djup på vilket saltvatten påträffades, antingen vid brunnsborrningen eller vid borrhålsloggningen. Notera de avvikande värdena vid Fårösund där nivån för det salta grundvattnet ligger ytligare än gränsen för 40 Ωm vilket tolkas bero på en tät kalksten i detta område. I de kustnära områden (<100m från havet) bör resultaten användas med större försiktighet.

för 3D-modellen av 40 Ωm-gränsen i bilaga 5). Man kan även se hur områdena längs sjöarna som ligger i förkastningar har ett mindre djup till saltvattenytan.



Figur 44. Fårö, detalj från Avanäs. Detalj av den identifierade isoresistivitetsytan för 40 Ωm som är resultatet av en detaljerad studie av varje mätprofil. De bägge grå planen representerar 0 m ö.h. respektive –50 m ö.h. I figuren är det vertikala måttet kraftigt överdrivet. Betraktelsepunkten ligger ost om Avanäs under havsytan.

De mycket stora djupen till gränsen 40 Ωm i sydväst sammanfaller med den högresistiva kalkstenen i detta område och djupet avspeglar med andra ord inte djupet till det salta grundvattnet i detta område.

Genom att identifiera läget av isoytan för 40 Ωm längs varje mätprofil går det också att framställa isoresistivitetsytor i tre dimensioner som ger en mer detaljerad bild av det möjliga läget för det salta grundvattnets yta. Ett exempel på en sådan från den östra delen av Fårö visas i figur 44.

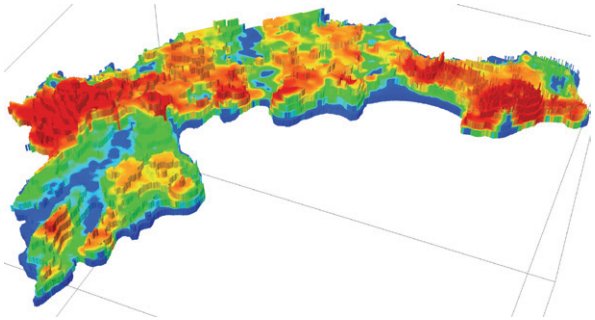
I en förenklad terrängmodell över Fårö framgår det att höglänta områden ofta sammanfaller med högresistiva områden (fig. 45). En del av förklaringen är att de höglänta områdena sammanfaller med vittrings-

resistenta kalkstenstyper, att dessa har ett lägre innehåll av lermineral, att de är förhållandevis sprickfattiga samt att de har relativt låg porositet. Lerrika bergarter som märgelsten och märgel är mer lättvittrade vilket präglat den lokala morfologin, och därmed påträffas de ofta i låglänta områden.

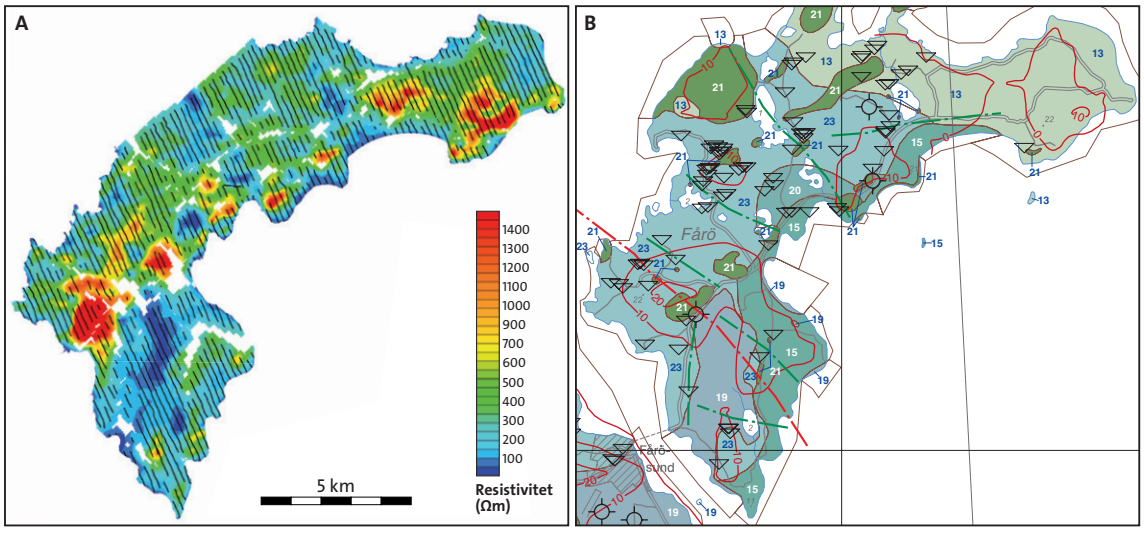
Den berggrundsgeologiska karta som redovisas av Erlström m.fl. (2009) bekräftar antagandet om att berggrundens sammansättning påverkar morfologin. På södra delen av Fårö finns ett ca 5 km långsträckt stråk med låga resistiviteter i ytnära delar (fig. 46A). Detta sammanfaller med ett område som anges bestå av märgelsten och märgel (fig. 46B). Inom de sydvästra högresistiva områdena finns både revkalksten och stromatoporoidékalksten påträffade i två isolerade enheter (fig. 46). Flera av de andra ytligt liggande, lågresistiva enheterna sammanfaller med sjöar och sprickzoner.

På Avanäs, på den östra delen av ön, finns två högresistiva områden i ytan (fig. 47A). Jordartskartan (Svantesson 2005) visar att området är täckt av flygsand med en del torv och svallsediment (fig. 47B). I den västra av de två högresistiva enheterna ligger Ullahau med markerade dyner. Det är troligt att den västra, högresistiva enheten till stor del orsakas av att sanddynerna inte innehåller vatten i de högre belägna delarna samt att de saknar lera vilket leder till den mycket höga resistiviteten. Det östra områdets höga resistiviteter i ytan kan möjligen förklaras av sand och svallsediment utan stort lerinnehåll, alternativt av tunt jordtäcke eftersom berggrundskartan indikerar att revkalksten och andra kalkstenar finns i området. I området finns ett borrhål (borrhål 8) som visar att jordtäcket är 2,8 m.

Jordarterna på Avanäs domineras av flygsand och svallsediment (Svantesson 2005). I området förekommer även lågresistiva enheter som ligger relativt ytligt. Tre större enheter har identifierats genom detaljerad analys av mätprofiler från området. Läget av enheterna framgår av figur 48 och de ligger i ett område där jordartskartan (Svantesson 2005) visar förekomst av torv. Möjligen kan de tre enheterna förklaras av större torvomvandlade sjöar eller träsk som gömts i sedimenten och som genom sitt vatteninnehåll bildar lågresistiva enheter. Något som talar för detta är att flera brunnar i området ger s.k. sumpvatten som därför mest används



Figur 45. En grov terrängmodell över Fårö som draperats med resistiviteten i ytnära lager. Röda och gula färger markerar relativt sett högresistiva markvolymer. Vertikalmåttet i höjdmodellen är kraftigt överdrivet. Figuren sedd från ovan söderifrån.



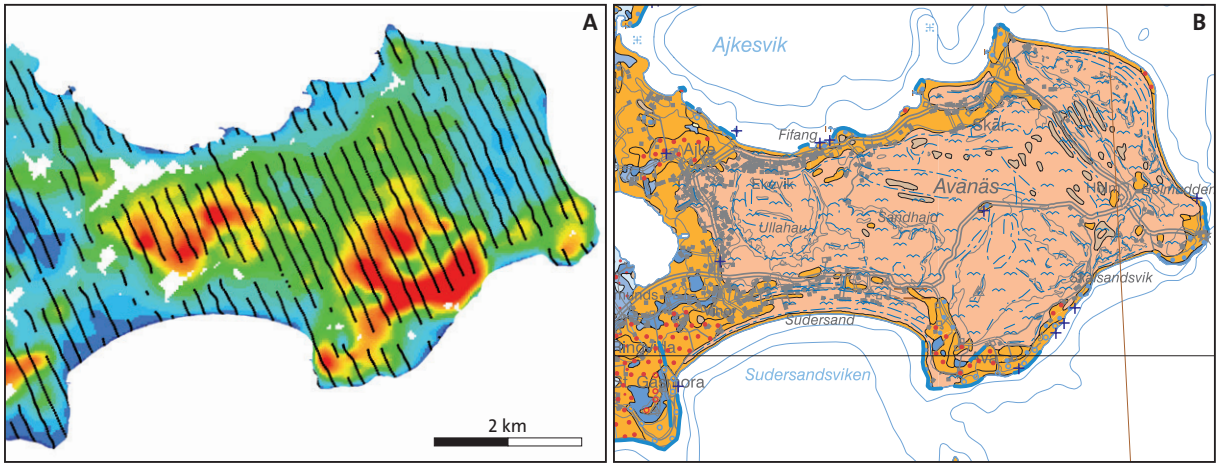

Figur 46. **A.** Resistivitetskarta (översta 4 m) över Fårö. **B.** Geologisk karta över berggrunden (Erlström m.fl. 2009). På södra delen av Fårö finns ett lågresistivt stråk som sträcker sig nästan 5 km i ungefär nord–sydlig riktning. Den geologiska kartan över berggrunden visar att den lågresistiva enheten sammanfaller med märgelsten eller märgel (betecknas 19 på berggrundskartan). Några markerat högresistiva enheter påträffas också i sydväst på ön där de sammanfaller med berggrundsenheter av revkalksten och stromatoporoidékalksten (betecknas 21 på berggrundskartan).

till bevattning. Andra alternativa förklaringar kan vara förekomsten av sötvatten eller visst lerinnehåll i svallsedimenten. Allt detta bygger på antagandet att jorddjupet är så stort att enheterna ligger i sedimenten som överlagrar berggrunden. Om djupet till berggrunden mot förmodan är litet i området skulle de tre enheterna ligga i berggrunden. Områdets berggrund domineras av medelkristallin kalksten (kalkarenit) med inslag av stromatoporoidékalksten samt krinoidékalksten och revkalksten (Erlström m.fl. 2009).

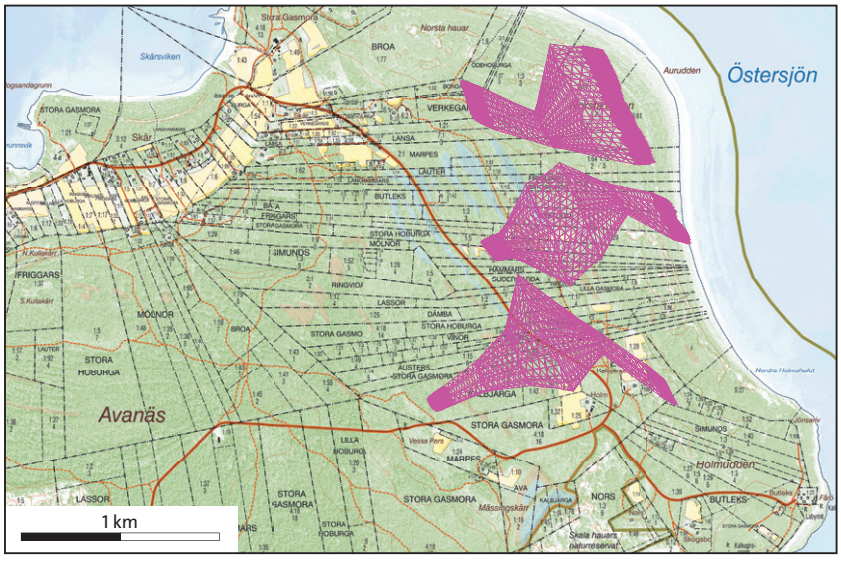
De tre lågresistiva enheterna (fig. 48) ligger mellan 0 och –20 m ö.h. och visas i tre dimensioner i figur 49. De tre lågresistiva enheternas geologiska förklaring kan inte exakt härledas utan fördjupade undersökningar. Fortsatta undersökningar är motiverade, speciellt med tanke på att enheterna kan utgöra sötvattenkällor ovanför det tolkade läget för det salta grundvattnet (fig. 49).

Sjöarna på Fårö sammanfaller ofta med lågresistiva områden eftersom sötvattnets resistivitet är relativt lägre än omgivande jordlager och berggrund (fig. 45). Normalvärden på konduktiviteten för sjövatten anges av Billsjö & Sondal (2011) till 5–40 mS/m vilket motsvarar ett resistivitetsintervall av 25–200 Ωm. Billsjö & Sondal (2011) kommenterar dock att sjöarna på Gotland har högre konduktiviteter på grund av ett generellt högre pH. Det är därför rimligt att anta att resistiviteterna i sjövatten på Gotland befinner sig i den lägre delen av resistivitetsintervallet som anges ovan.

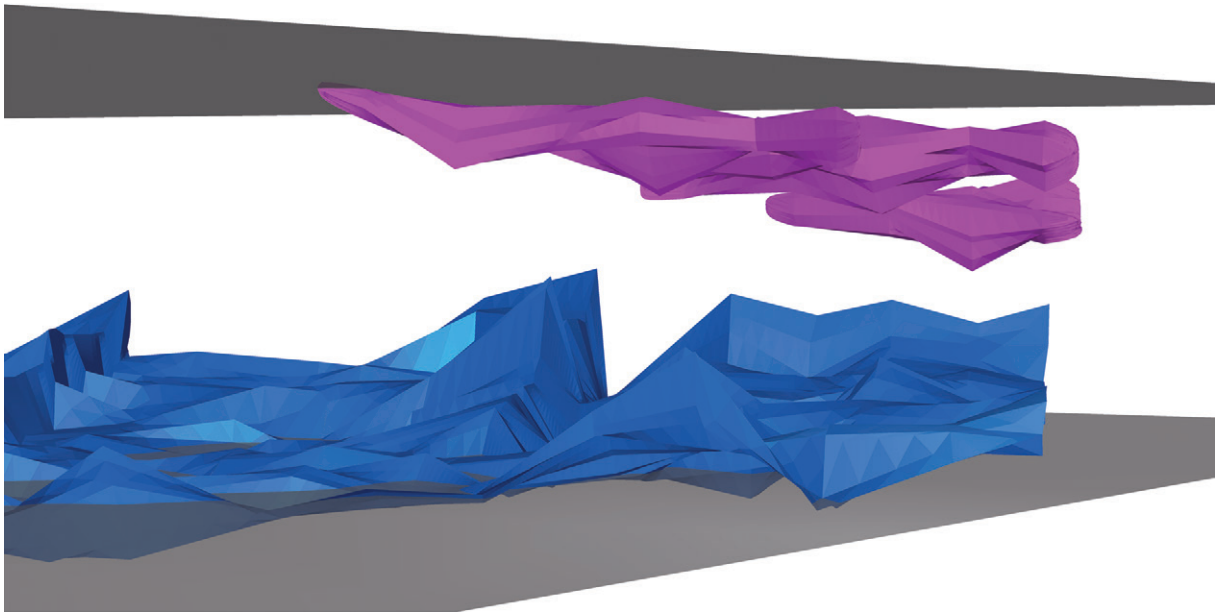
Eftersom sjöarna innehåller sötvatten är det av vikt att försöka avgöra om de kan utgöra delar av större,




Figur 47. **A.** Resistivitetskarta över Avanäs. För resistivitetsvärde se figur 46. **B.** Jordartskarta över samma område (Svantesson 2005). På Avanäs på östra delen av Fårö finns två ytliga, högresistiva enheter som visas i rött på resistivitetskartan (översta inversionslagret dvs. 0–4 m under markytan). Jordarterna inom de högresistiva områdena består huvudsakligen av flygsand och svallsediment.

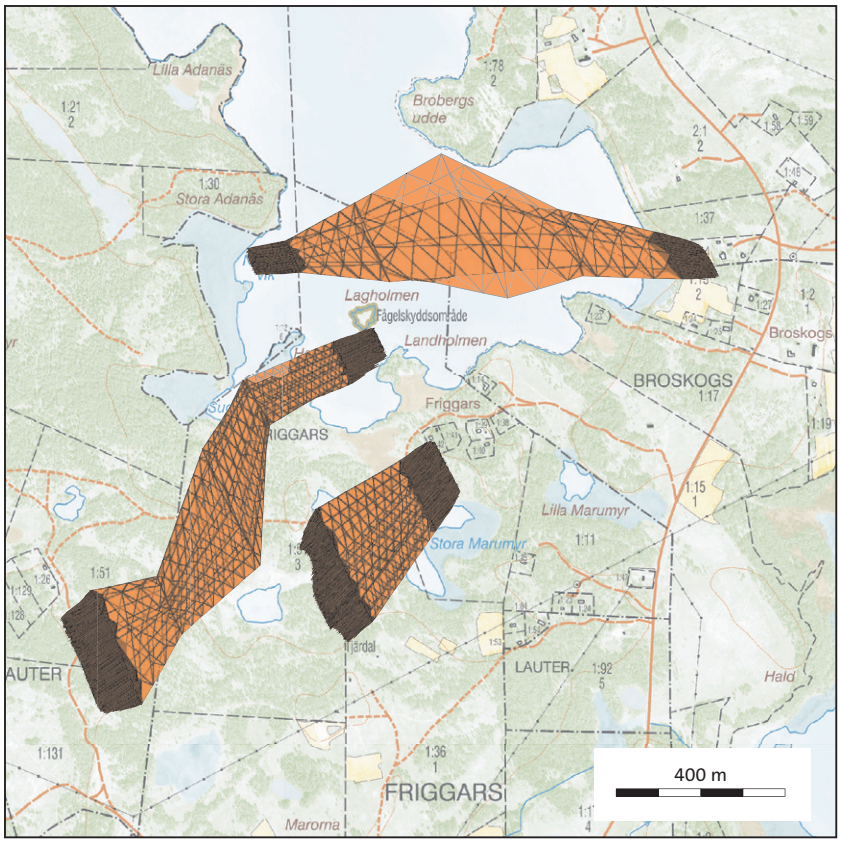



Figur 48. På östra delen av Avanäs finns tre lågresistiva enheter som påträffas i ett område där jordartskartan visar förekomst av torv i svallsediment (Svantesson 2005).



Figur 49. De tre lågresistiva enheterna (rosa) på östra delen av Avanäs visade i tre dimensioner. Figuren visar att dessa enheter ligger klart ovanför den tolkade överytan för salt grundvatten (blå). De plana ytorna i grått ligger på 0 m ö.h. och –50 m ö.h. Vertikalmåttet är kraftigt förstorat i förhållande till horisontalmåttet.

Figur 50. Lågresistiva enheter som identifieras genom detaljerade studier av mätprofilerna. De flesta enheterna är avgränsade till att ligga inom sjöarnas laterala utbredning. Två undantag finns dock i den centrala delen av området (se även fig. 51).




Figur 51. Lågresistiva enheter i och vid sjön Norrsund i den centrala delen av Fårö. Två av enheterna finns utanför sjön Norrsund. Den ena enheten är delvis förenad med sjön och blötmarksområdet Stora Marumyr. Den större sträcker sig knappt 1 km i sydvästlig riktning räknat från sjön Norrsund.

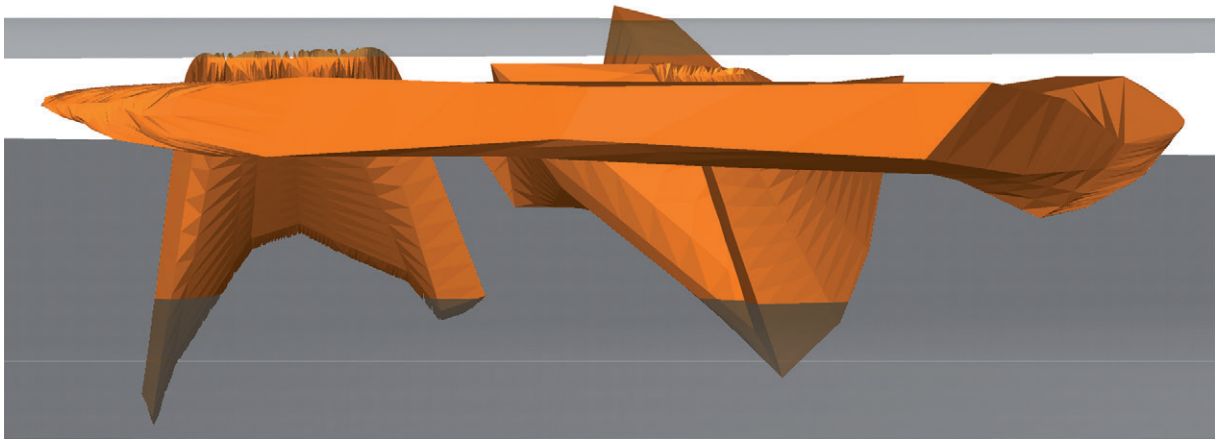
lågresistiva enheter som skulle kunna utgöra större akviferer, dvs. sötvattensförande enheter som utbreder sig lateralt från sjöarna och in under markytan.

Mätprofilerna vid och över sjöarna innehåller lågresistiva enheter vars utbredning går att studera i tre dimensioner. En överblick över utbredningen av de lågresistiva enheterna vid sjöarna visas i figur 50. I närheten av sjön Norrsund finns emellertid två något större enheter som utbreder sig utanför själva sjön (fig. 51). Den mindre av dessa enheter ligger mycket nära den lilla sjön Stora Marumyr men är något förskjuten mot nordväst. Den andra större enheten, som går i sydvästlig riktning från Friggars, är omkring 1 km lång.

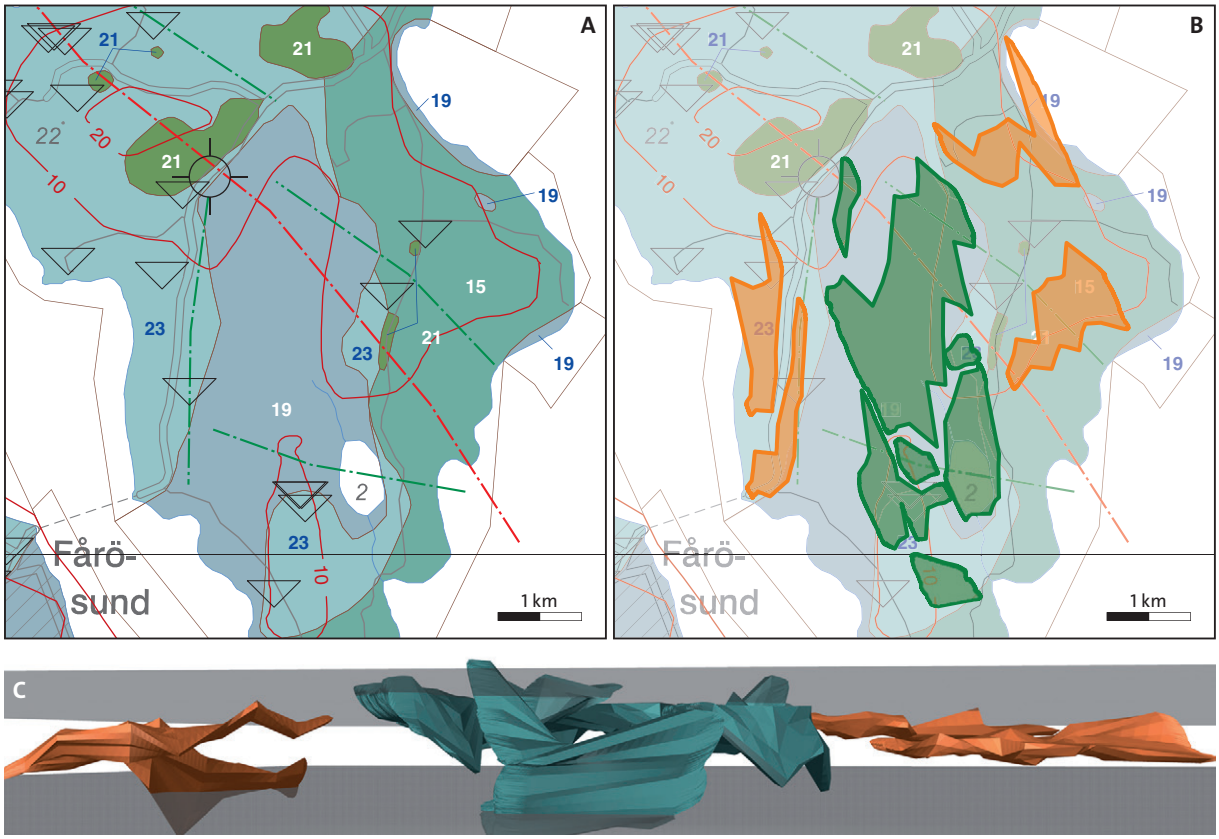
Den tredimensionella utbredningen av de lågresistiva enheterna framgår av figur 52. Den enhet som ligger i sjön Norrsund har en subhorisontell utbredning medan de två andra är mer brant stående. Enligt jordartskartan (Svantesson 2005) domineras området sydväst om sjön av ett tunt och osammanhängande jordlager, vilket dock inte skulle förklara de uppmätta värdena. Anledningarna till de lågresistiva enheterna utanför sjön Norrsund bedöms därför vara kopplade till berggrundens egenskaper. Frågan är om de representerar geologiska enheter som är vattenförande, exempelvis sprickzoner med vatten, eller om de visar förekomst av märgelsten eller märgel. Tyvärr finns det idag ingen geologisk information på djupet i området som gör att vi säkert kan säga vilket av alternativen som är rätt.

På södra Fårö har ett antal områden med låg resistivitet i ytan identifierats i SkyTEM-data. Dessa sammanfaller med områden med märgelsten och märgel enligt den berggrundsgeologiska kartan (fig. 53, Erlström m.fl. 2009). Lagren är oftast tunna med mäktigheter i regel under 10 m.

Både öster och väster om området med märgelsten och märgel finns ytterligare lågresistiva enheter (fig. 53). Enligt berggrundskartan utgörs ytberggrunden i dessa områden av olika typer av kalksten. Den regionala profil över berggrunden som redovisas på berggrundskartan indikerar att lagerställningen i stort är flack i området vilket kan innebära att märgelstenen fortsätter lateralt utåt från dess centrala utbredning och går in under kalkstenslager. I så fall skulle inte dessa lateralt belägna lågresistiva enheter utgöra intressanta objekt för grundvattenuttag. Det kan dock inte helt uteslutas att de lågresistiva enheterna representerar porösa, vattenförande lager i kalkstenen. Figur 53 visar också en tredimensionell bild av dessa flankerande lågresistiva enheter. I bilaga 2 redovisas RMT-mätningar från området öster



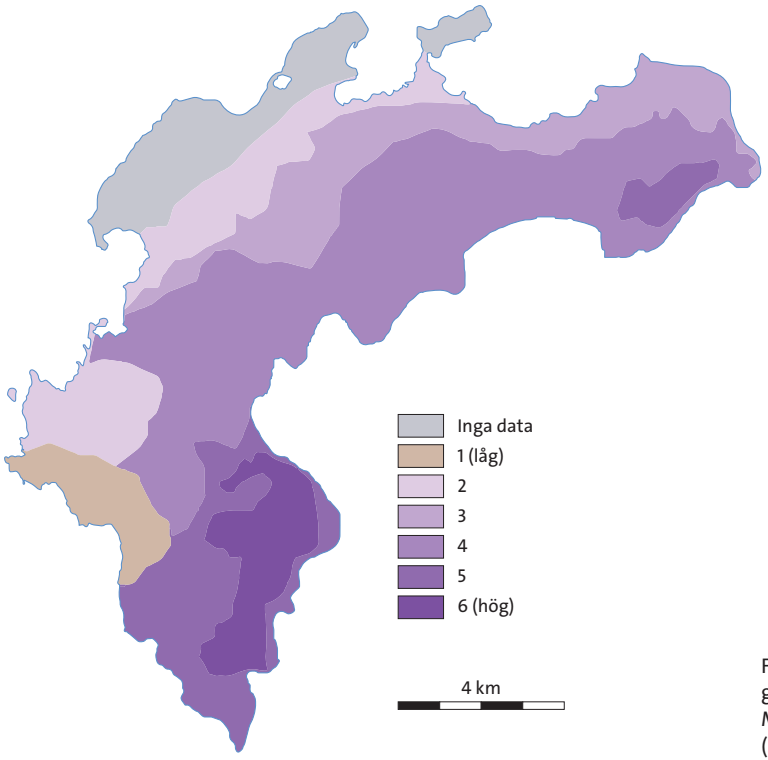
Figur 52. De lågresistiva enheterna i och vid sjön Norrsund visade i tre dimensioner. Den horisontellt liggande enheten (närmast betraktaren) finns i själva sjön Norrsund medan de två andra med vertikala utbredningar ligger huvudsakligen utanför sjön Norrsund. Det övre grå planet ligger 5 m ö.h. och det nedre planet –10 m ö.h. Vertikalmåttet är kraftigt förstorat i förhållande till horisontalmåttet.




Figur 53. **A.** Berggrundskartan över södra Fårö (från Erlström m.fl. 2009). **B.** Lågresistiva enheter (gröna) ligger i anslutning till märgelsten och märgel (grått område betecknat 19) enligt berggrundskartan. Orange ytor visar de flankerande lågresistiva enheter som skulle kunna utgöras av porösa lager i kalksten, alternativt inlagringar av märgel i kalksten. **C.** De lågresistiva kropparna i tre dimensioner. De två grå planen ligger på 5 m ö.h. och –20 m ö.h. Vertikalmåttet är kraftigt förstorat jämfört med horisontalmåttet.

om den ytligt liggande märgelstenen (profil 5). Även borrhål 9 är lokaliserat inom dessa lågresistiva lager. RMT-mätningen och borrhålsloggningen tolkade de lågresistiva lagren som trolig märgel.

I figur 54 presenterar Thulin Olander (2015) en karta över uttagspotentialen inom undersökningsområdet. De två områden med högst potential är de mörklila områdena vid Avanäs i sydöst och vid Limnor träsk i sydväst. De tänkta akvifererna ligger på ca –20 till –40 m ö.h. (jämför RMT-profil 5 i bilaga 2 för området i sydväst). Båda områdena sammanfaller med de områden där djupet till saltvattenytan är som störst (fig. 43). Berggrundens resistivitet ligger i intervallet 150–300 Ωm vilket stämmer överens med det resistivitetsintervall som tidigare visat sig indikera goda grundvattenförutsättningar (jämför fig. 20). Resultaten från borrningarna av brunnarna 8 och 9 visar dock inte på några större flöden vid dessa djup (4 800 respektive 3 000 l/h). Det ska tilläggas att det med största sannolikhet finns områden där det finns goda förutsättningar för grundvattenuttag för enskild förbrukning som inte belyses i denna karta (fig. 54) då fokus var att peka ut områden som kan innehålla större grundvattenmagasin. Den bedömdad uttagskapaciteten verkar dock vara högre i dessa områden än vad SGU tidigare känt till (jämför fig. 11).



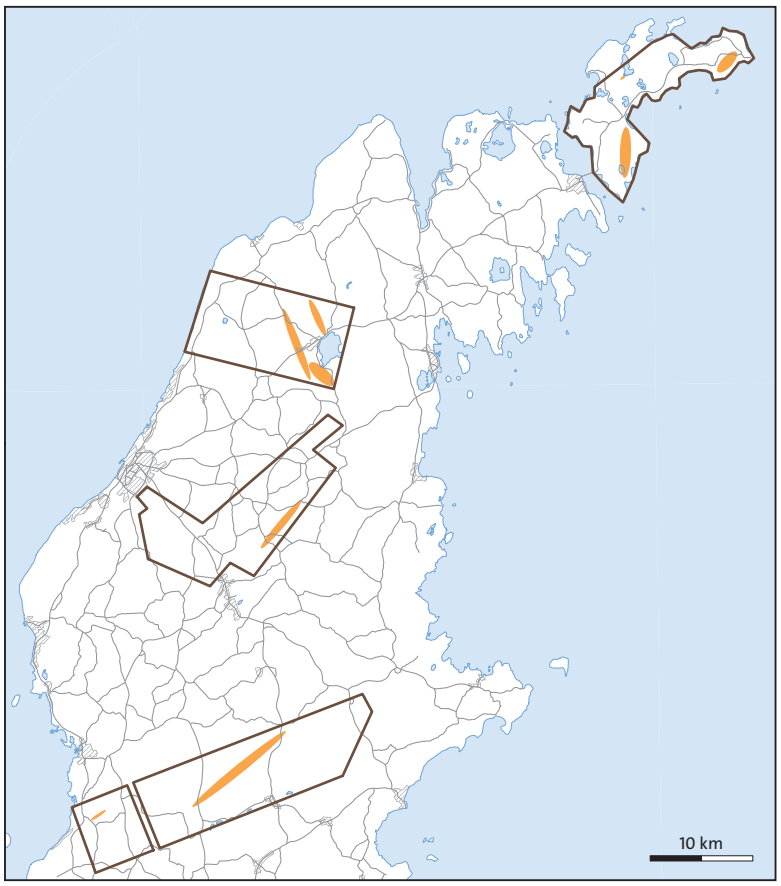

Figur 54. Tolkad potential för större grundvattenuttag ur berggrunden. Modifierad från Thulin Olander (2015).

# Diskussion och slutsatser

En fullständig analys av alla data som samlats in i samband med SkyTEM-mätningarna på Gotland skulle vara mycket tidskrävande. För att belysa vilka möjligheter som finns har vi koncentrerat arbetet på ett urval av analyser och metoder med olika inriktningar. Mängden data möjliggör, tillsammans med annan geologisk information, stora möjligheter till fortsatta, fördjupade analyser av de geologiska förhållandena på Gotland. Resultaten från de utvärderingar och tolkningar som presenteras i rapporten visar också på hur man kan förbättra underlaget genom att kalibrera och verifiera tolkningar med kompletterande undersökningar i form av borrningar och geofysiska mark- och borrhålsundersökningar.

I samtliga undersökningsområden har vi kunnat urskilja på vilket djup under markytan som det salta grundvattnet uppträder (fig. 21, 29, 39 & 43). Kartorna visar vilket djup man inte bör överstiga vid borrning, då man i så fall ökar risken för att få ett salt vatten i sin brunn. Kartornas noggrannhet kan förbättras genom att inarbeta vattenanalysdata. Man kan då även bestämma sig för vilken saltkoncentration man vill ha som gräns. Den nivå vi visar i rapporten är nivån för riktigt salt grundvatten. Är man intresserad av t.ex. smakgränsen (300 mg/l) kan nivån behöva justeras till ett något ytligare läge. Tullström (1954) gjorde en nivåkarta över gränsen mellan sött och salt grundvatten på vissa delar av ön. Idag har vi ett mycket större antal brunnar och information om kemi som tillsammans med SkyTEM-data kan förbättra underlaget väsentligt (jämför fig. 12).

I den utförda tolkningen har ett antal områden identifierats som intressanta ur ett dricksvattenperspektiv med betoning på större grundvattenuttag (fig. 55). Vidare har tolkningen gett tydliga exempel på hur man genom mer detaljerade analyser av SkyTEM-data kan avgränsa områden med hög potential för grundvattenutvinning och hur man kan optimera brunnsplacering (fig. 19). Studierna visar att resistivitetsintervallet 150–300 Ωm i kalksten på ett måttligt djup verkar indikera goda förhållanden för grundvattenuttag ur berggrunden. Speciellt verkar detta gälla i områden med två kalkstenslager med ett mellanliggande märgellager. Det övre kalkstenslagret verkar ha relativt låga uttagsmöjligheter medan den undre kalkstensenheten i många fall ger rätt bra med vatten. Det är dock viktigt att betona att SkyTEM-data endast bör användas för




Figur 55. Schematisk bild över huvudsakliga områden där data från undersökningen visar på att det kan finnas förutsättningar för större grundvattenuttag ur berggrunden.

en första avgränsning av intressanta områden. För att bedöma uttagsmängder, tillrinningsområden, grundvattenbildning etc. behövs fler undersökningar i form av geofysiska mark- eller borrhålsmätningar, borrningar och provpumpningar. Genom att få in mer information om utagskapacitet från brunnar och arbeta in dessa kan underlaget förbättras och t.ex. användas i planering av exploateringsområden.

I dataunderlaget har vi inte lyckats särskilja eller påvisa förekomst av karst som var en av de ursprungliga frågeställningarna. Anledningen är antingen att karstområdena är för små för att kunna ses i dataunderlaget, eller att det behövs mer ingående analys och annan geologisk information för att särskilja dessa områden. Man ska även beakta att SkyTEM-metoden inte är som bäst när det gäller att skilja på de mycket höga resistiviteterna som det ofta är frågan om i områden med karst ovanför grundvattenytan.

SkyTEM har däremot visat sig väl lämpad för identifiering av lågpermeabla jord- och bergarter. Basinformationen visar bland annat på förekomst av ett antal större berggrundsvolymer som domineras av märgel och märgelsten. Då dessa bergartsvolymer ofta är betydligt tätare än kalkstenen, samlas och transporteras mycket vatten i anslutning till gränserna mellan dessa bergartsled där det finns mer tomrum i form av sprickor etc. Det gör att märgelvolymernas gränser delvis kan användas för att avgränsa grundvattenmagasin. Detsamma gäller de lågpermeabla jordarter som man kan bestämma mäktighet och utbredning av. Dessa resultat kan användas som underlag för sårbarhetskartering av jordlager och den ytnära berggrunden. Man kan t.ex. peka ut var dricksvattenbrunnar ligger något mer skyddade mot föroreningar och var man kanske bör undvika att borra för geoenergi på grund av risk för onödig penetrering av täta jordlager eller berggrund.

Sammanfattningsvis representerar resultaten undersökningar i fyra delområden med varierande geologisk uppbyggnad. Resultaten har generellt sett gett mycket värdefull och ny information som bland annat medför möjligheter till en tredimensionell kartläggning av förekommande jordlager och berggrundsenheter. Användbarheten har befunnits vara stor för identifiering av potentiella, större grundvattenförekomster och för identifiering av salt grundvatten. Undersökningarna ger också värdefull strukturgeologisk information som avsevärt ökar förståelsen av berggrundens uppbyggnad.

En fördjupad analys och uppföljning med fler borrhål och geofysiska markmätningar skulle med säkerhet öka förståelsen och möjligheten till prognostisering av möjliga grundvattenförekomster ytterligare. Med säkerhet skulle även en utökning med fler mätområden ge förutsättningar för ett mer regionalt tredimensionellt geologiskt och hydrogeologiskt underlag.

## Referenser


Alm, P.-G., 2014: *Loggningsrapport. Borrhålsloggning Gotland*. Sveriges geologiska undersökning Dnr 423-2056/2014. 49 s.

Archie, G.E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers 146*, 54–62.

Ballay, R.E., 2012: *The "m" exponent in carbonate petrophysics*. The Society for the Geosciences applications of Geostatistics and Neural Networks. Hämtad från <www.geoneurale.com> den 9 februari 2015.

Bastani, M., 2001: EnviroMT – a new controlled source/radio magnetotelluric system. *Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala Dissertations from the faculty of Science and Technology 32*, 179 s.

Billersjö, S. & Sondal, J., 2011: Restaurering av Mörtsjön – en del av Åkerströmmens avrinningsområde. *Kungliga Tekniska högskolan, Mark- och vattenteknik, LWR-KAND-EX-2011:1*, 41 s.

Calner, M., Jeppsson, L. & Munnecke, A., 2004: The Silurian of Gotland – Part I: Review of the stratigraphical framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development. *I* A. Munnecke, T. Servais & C. Schulbert (eds.): *Early Palaeozic Palaeogeograhy and Palaeoclimate* (IGCP 503). Abstracts and Field Guides. *Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband 5*, 113–131.

Carlstedt, A. & Erlström, M., 2004: *Visby vattenförsörjning. Revidering av skyddsområde för Visby–Vibble vattentäkter*. Sveriges geologiska undersökning Dnr 08-1285/2003. 14 s

Cherns, L., 1982: Paleokarst, tidal erosion surfaces and stromatolites in the Silurian Eke Formation of Gotland. *Sedimentology 29*, 819–833.

Engh, L., 1980: *Lummelundagrottan med tillhörande karstområde. Svenska grottor 3.* Sveriges speleologförbund, 290 s.

Eriksson, M.E. & Calner, M., 2005: The dynamic Silurian Earth. Subcommission on Silurian Stratigrahy Field Meeting 2005. Field guide and abstracts. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden 121*, 99 s.

Eriksson, M.J., 2004: Formation and significance of a middle Silurian ravinement surface on Gotland, Sweden. *Sedimentary Geology 170,* 163–175.

Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U. & Wickström, L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning K 221*, 60 s.

Erlström, M. & Persson, L., 2014: Radiomagnetotelluric mapping of marlstone and limestone in the Silurian bedrock of Gotland. *GFF 136, 571–580*.

Floden, T., 1980: Seismic stratigraphy and bedrock geology of the central Baltic. *Stockholm Contributions in Geology 35,* 240 s.

Gustafsson, M. & Erlström, M., 2007: *Provpumpning Bro stentäkt*. Sveriges geologiska undersökning Dnr 08-779/2007. 7 s.

Glover P.W.J., Hole M.J. & Pous J., 2000: A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth and Planetary Science Letters 180*, 369–383.

Göta älvs vattenvårdsförbund, 2014: *Begreppsförklaringar, konduktivitet*. Hämtad från <http://www.gotaalvvvf.org/resultat/begreppsforklaringar/konduktivitet.4.271d6b7512e53cf0cf98000910.html> den 9 februari 2015.

Hedström, H., 1911: Om grundvattenförhållandena i trakten av Visby. *Sveriges geologiska undersökning C 239*, 1–69.

Kalscheuer, T., Pedersen, L.B. & Siripunvaraporn, W., 2008: Radiomagnetotelluric twodimensional forward and inverse modelling accounting for displacement currents. *Geophysical Journal International 175*, 486–514.

Karlqvist, L., Fogdestam. B. & Enqvist, P., 1982: Hydrogeologisk karta över Gotlands län. Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning Ah 3*, 60 s.

Lindewald, H., 1981: Saline groundwater in Sweden. *Intruded and relict groundwater of marine origin: Seventh Salt Water Intrusion Meeting*, 24–32.

Loke, M.H., 2004: *Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the leastsquares method. Manual for Res 2D-inv, version 3.54.* Hämtad från <www.geoelectrical.com> den 9 februari 2015.

Löfgren, M., 2004: *Diffusive properties of granitic rock as measured by in-situ electrical methods*. Doktorsavhandling. Kungliga Tekniska högskolan, Institutionen för kemiteknik, 86 s.

Gotlands kommun, 2010: *100 undersökningen. Dricksvattenkvalitén i enskilda vattentäkter 2010*. Miljö- och hälsoskyddsnämnden, Gotlands kommun, 19 s.

Thulin Olander, H., 2015: *A contribution to the knowledge of Fårö's hydrogeology*. Master Thesis. Lunds universitet, 39 s.

Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J.-F. & Baudin, F., 2006: Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 229*, 303–320.

Siripunvaraporn, W. & Egbert, G., 2000: An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data. *Geophysics 65,* 791–803.

Sivhed, U., Erlström, M., Bojesen–Koefoed, J.A. & Löfgren, A., 2004: Upper Ordovician carbonate mounds on Gotland, central Baltic Sea. Distribution, composition and reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Geology 27*, 115–140.

SkyTEM, 2013a: *SkyTEM Survey: Gotland (Area 1), Sweden.* Data report. SkyTEM Surveys ApS, Denmark, 32 s.

SkyTEM, 2013b: *SkyTEM Survey: Gotland (Area 2), Sweden.* Data report. SkyTEM Surveys ApS, Denmark, 22 s.

SkyTEM, 2013c: *SkyTEM Survey: Gotland (Area 3), Sweden*. Data report. SkyTEM Surveys ApS, Denmark, 21 s.

SkyTEM, 2013d: *SkyTEM Survey: Gotland (Area 4), Sweden*. Data report. SkyTEM Surveys ApS, Denmark, 21 s.

SMHI, 2009: *Sjödjupsstatistik*. Hämtad från <http://www.smhi.se/k-data/hydrologi/sjoar_vattendrag/sjodjup_SVAR_2009.pdf> den 9 februari 2015.

Stesky, R.M., 1986: Electrical conductivity of brine-saturated fractured rock. *Geophysics 51*, 1585–1593.

Svantesson, S.I., 2005: Jordartskartan Gotland, norra delen, skala 1:100 000. *Sveriges geologiska undersökning K 4:1*.

Thunehed, H., 2000: *Mapping and characterisation of Swedish gedrock by DC resistivity and transient-field electromagnetic measurements*. Doktorsavhandling. Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser, 169 s.

Tullström, H., 1954: Prelimenärt meddelande om hydrogeologiska undersökningar på Gotland. Grundförbättring. *Tidskrift för jordbrukets rationalisering genom grundförbättring 4*, 243–254.

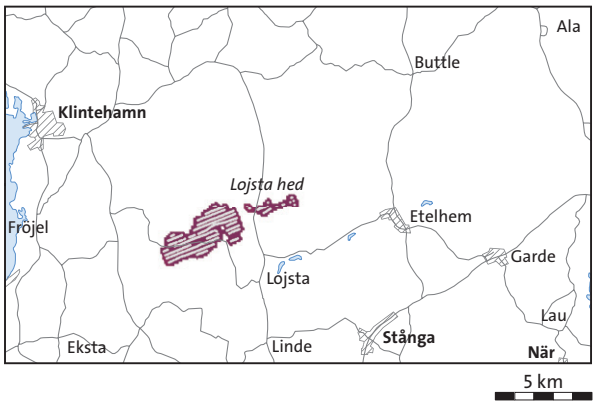
Waxman, M.M. & Smits, L.J.M., 1968: Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand. *Society of Petrography and Engineering Journal 8,* 107–122.

# Bilaga 1. Medelresistivitet för valda intervall

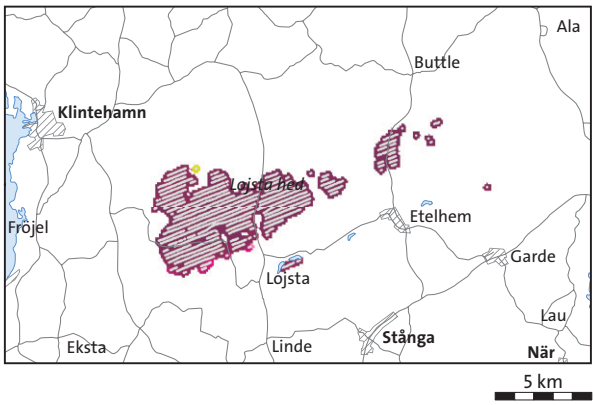
När medelresistivitetskartorna framställts har vi använt en sökradie på 250 m, vilket betyder att varje punkt som ligger inom 250 m från en SkyTEM-sondering har fått ett värde. Detta värde får ses som konservativt och bidrar till att minska osäkerheten. Ett antal områden saknar data då dessa bedömts vara alltför påverkade av mänsklig aktivitet och därmed visa felaktigt resultat. Det är relativt små områden som rensats bort, och data med något större osäkerhet går att interpolera fram. Förutom medelresistiviteten redovisas även SkyTEM-soneringarna som underlaget baseras på som små gråa punkter, varje punkt motsvarar en geofysisk sondering.

## OMRÅDE 1

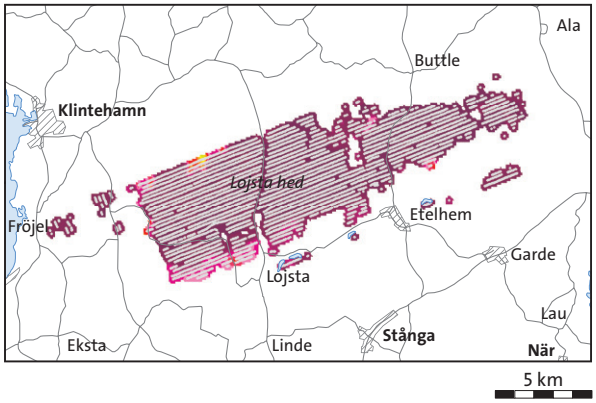
80 till 70 m ö.h.



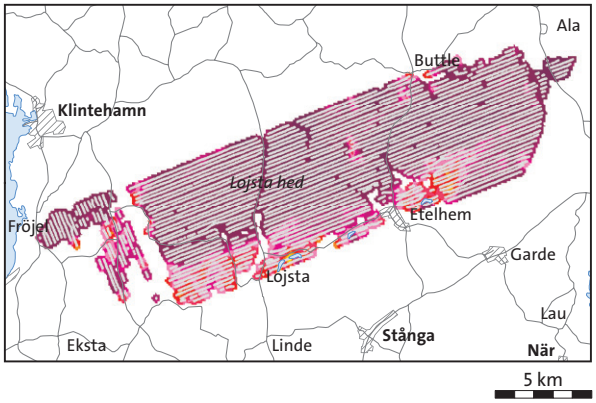

70 till 60 m ö.h.



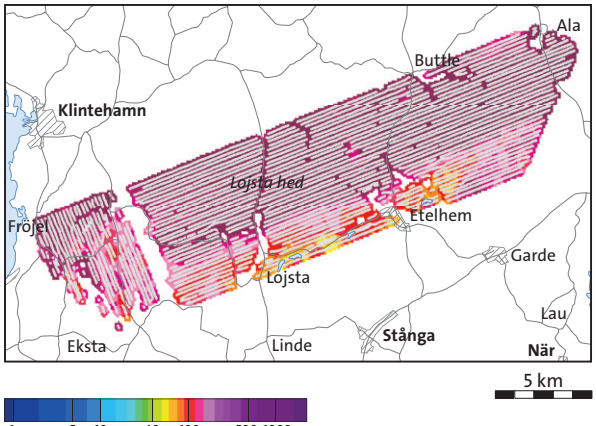

60 till 50 m ö.h.



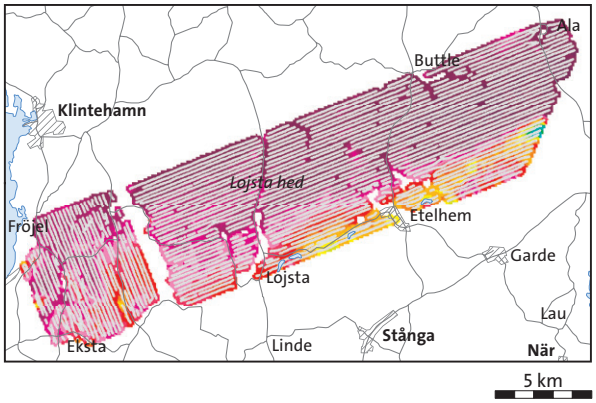

50 till 40 m ö.h.



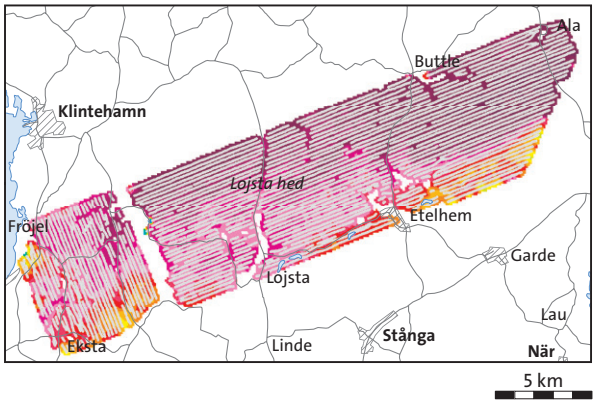

40 till 30 m ö.h.



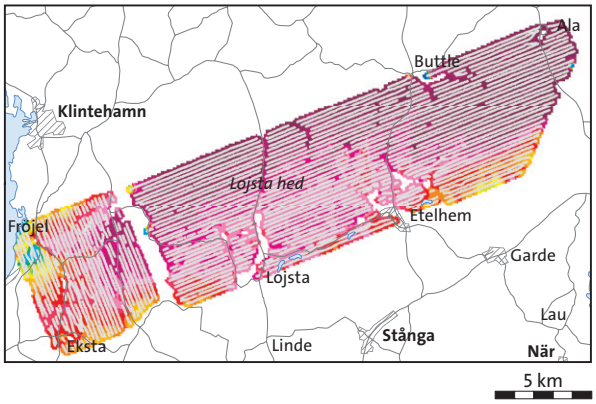

30 till 20 m ö.h.



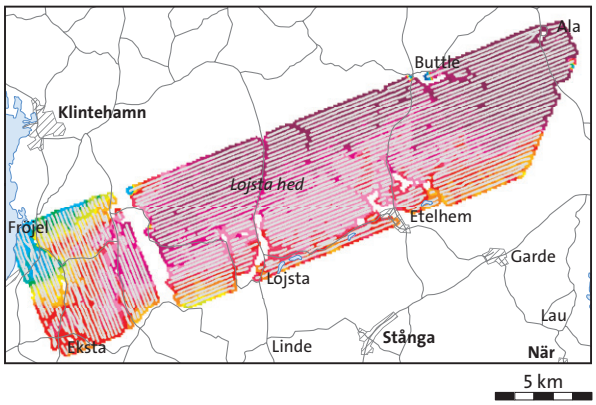
20 till 10 m ö.h.



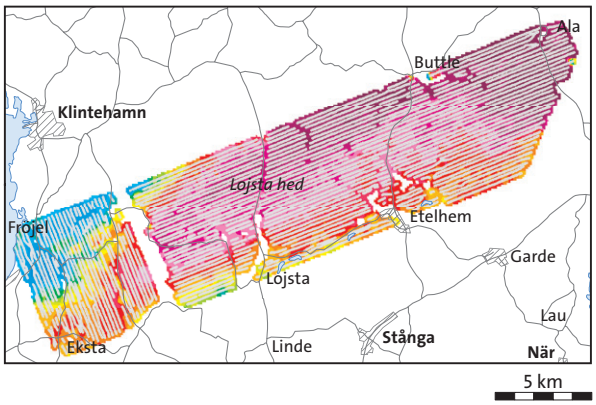

10 till 0 m ö.h.



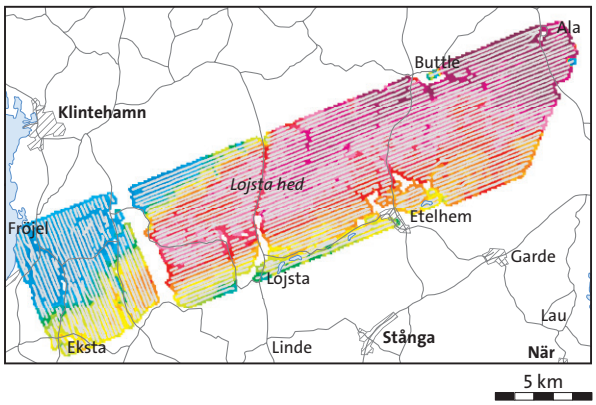

0 till –10 m ö.h.



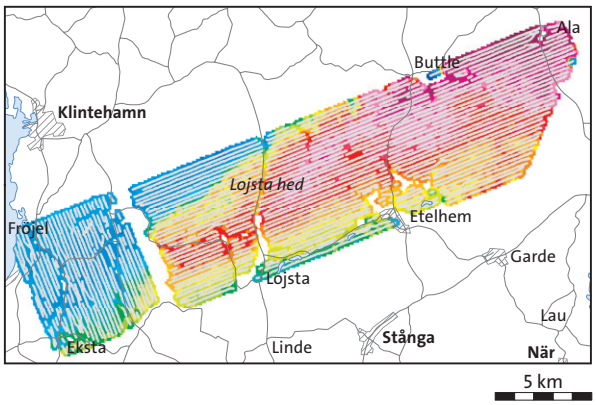

–10 till –20 m ö.h.



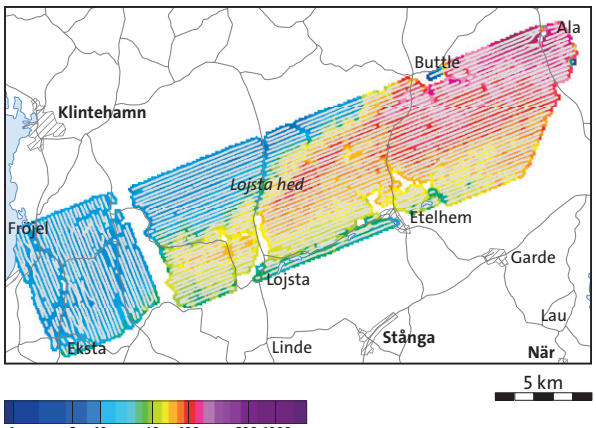

–20 till –30 m ö.h.



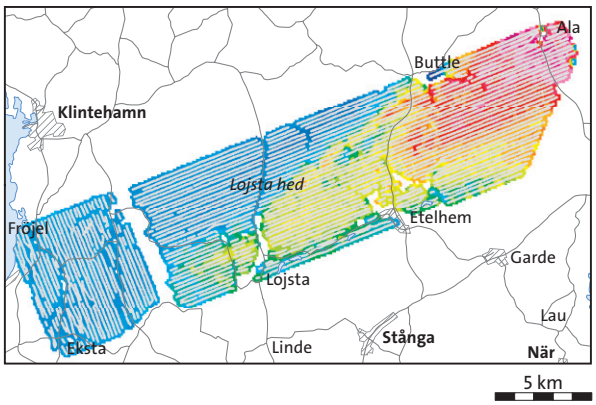

–30 till –40 m ö.h.



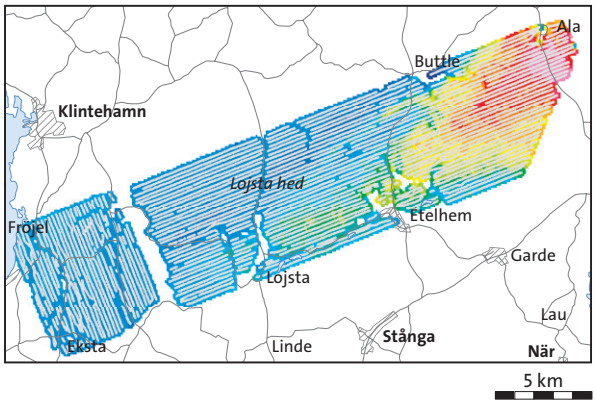

–40 till –50 m ö.h.



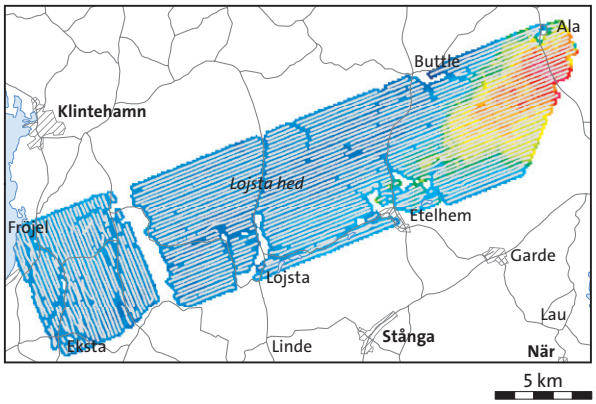

–50 till –60 m ö.h.



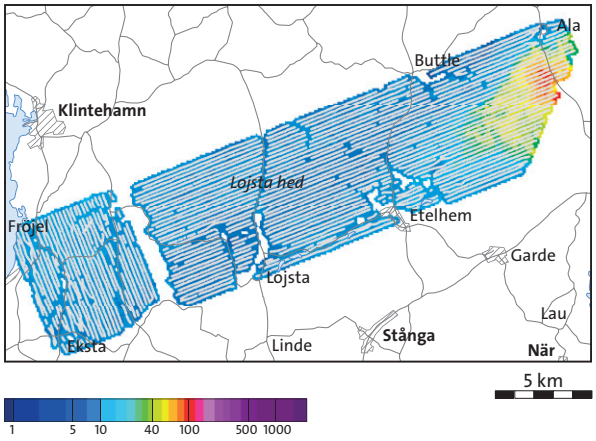
–60 till –70 m ö.h.



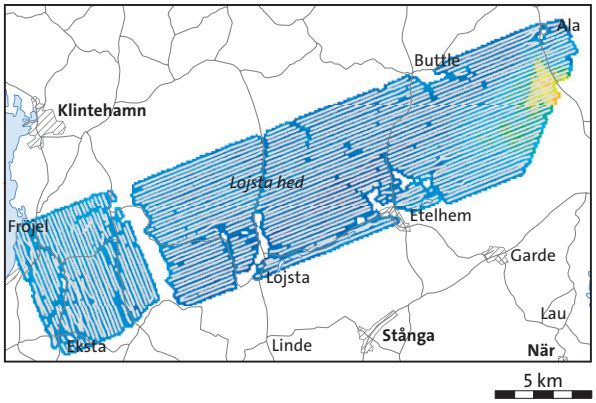

–70 till –80 m ö.h.




–80 till –90 m ö.h.

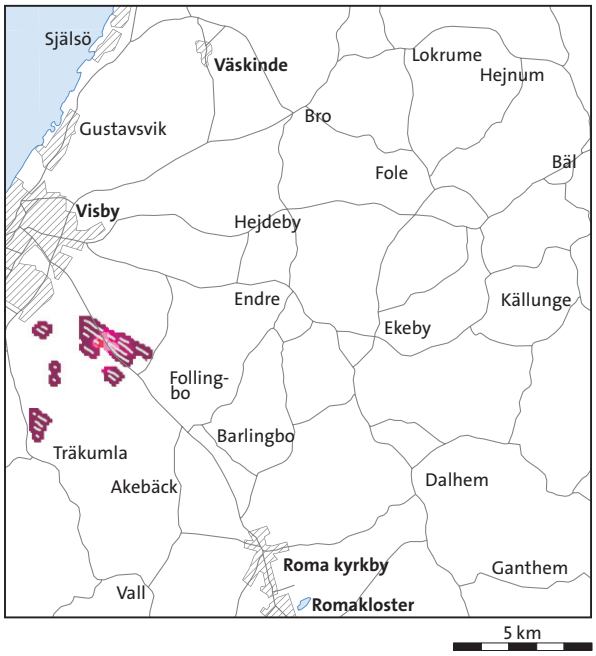



–90 till –100 m ö.h.

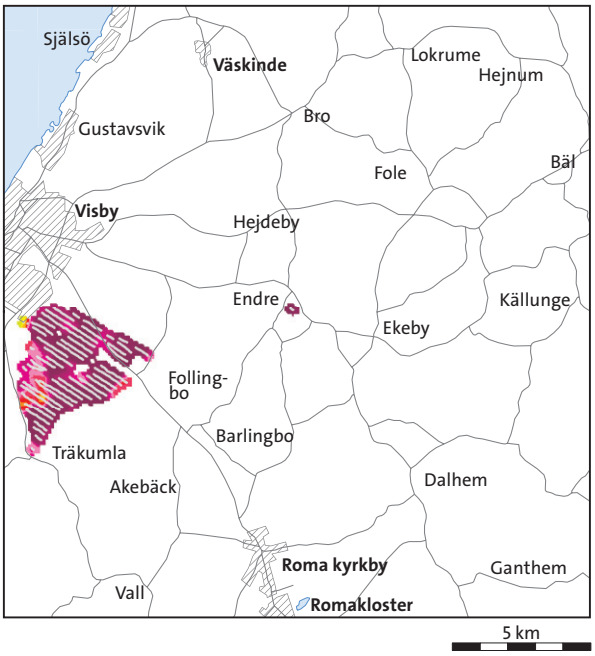


## OMRÅDE 2

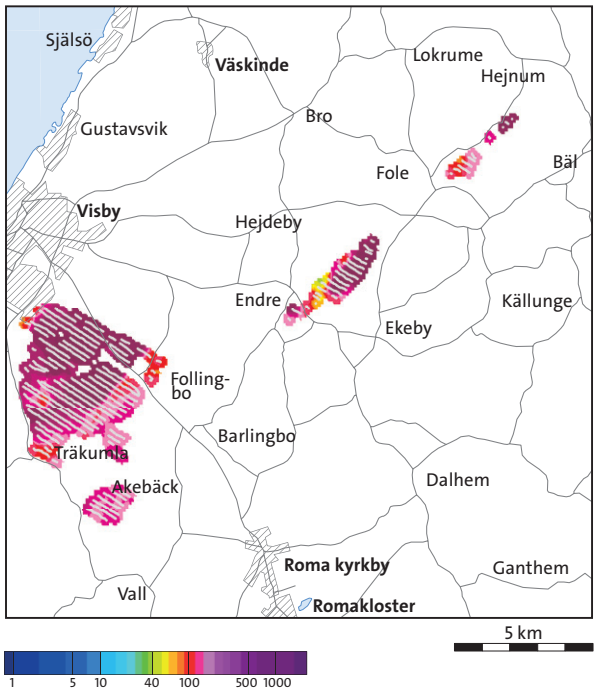
80 till 70 m ö.h.



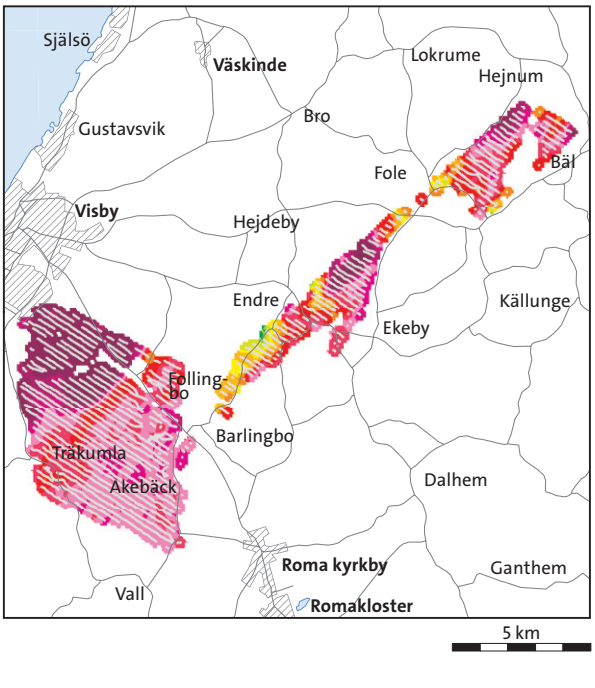

70 till 60 m ö.h.



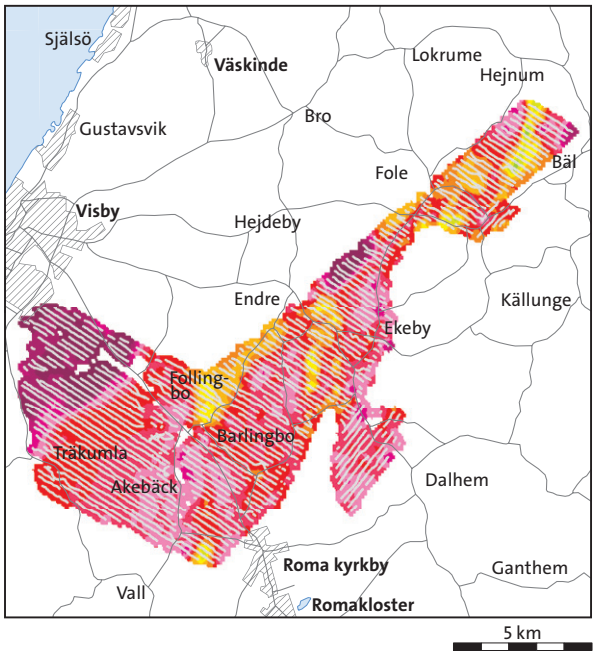

60 till 50 m ö.h.



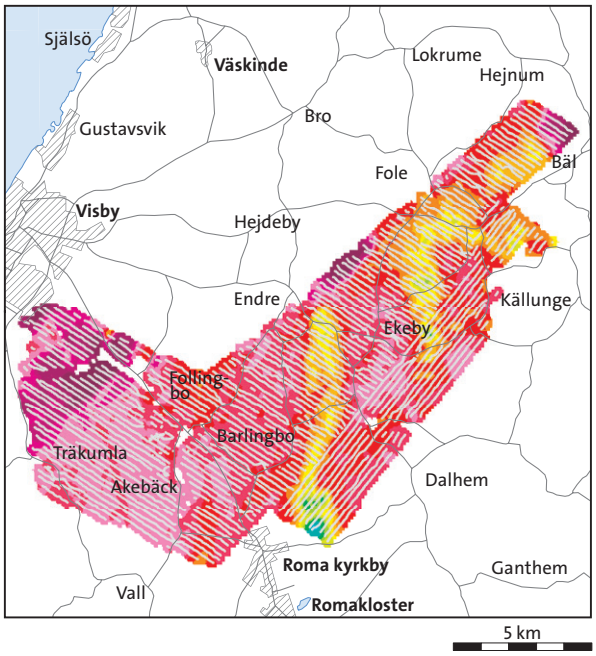

50 till 40 m ö.h.



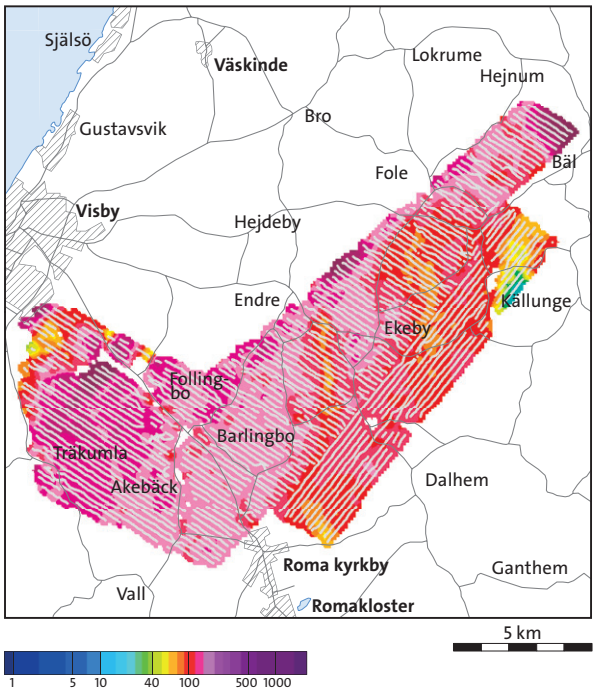
40 till 30 m ö.h.



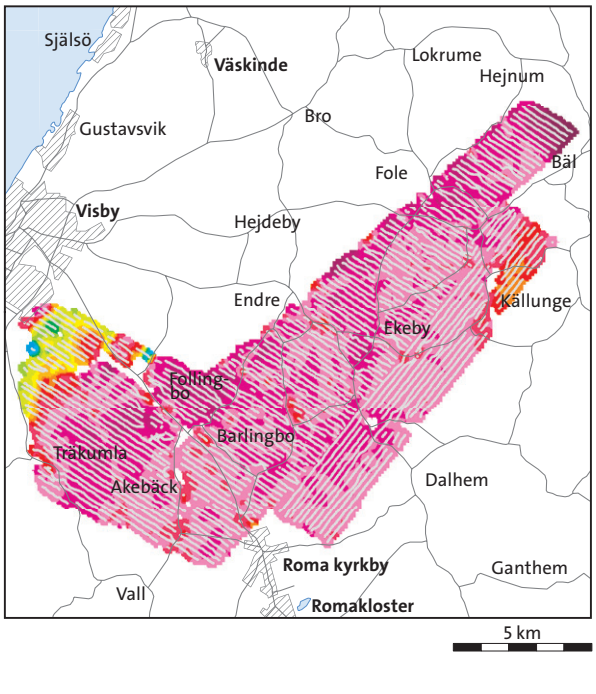

30 till 20 m ö.h.



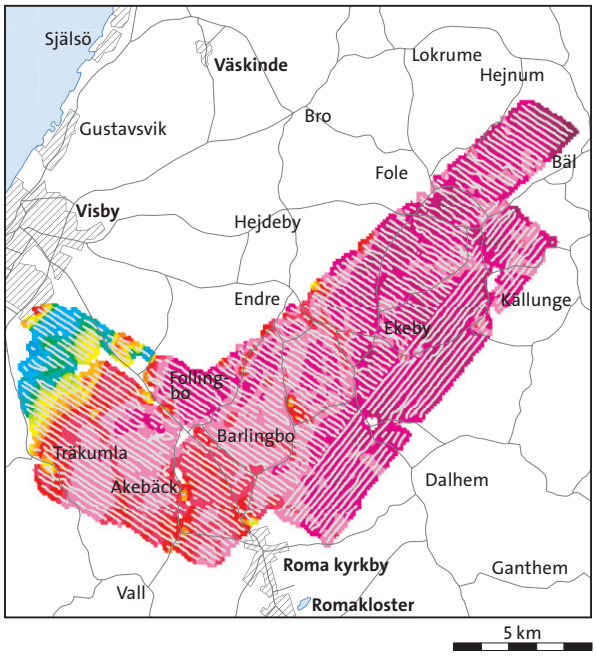

20 till 10 m ö.h.



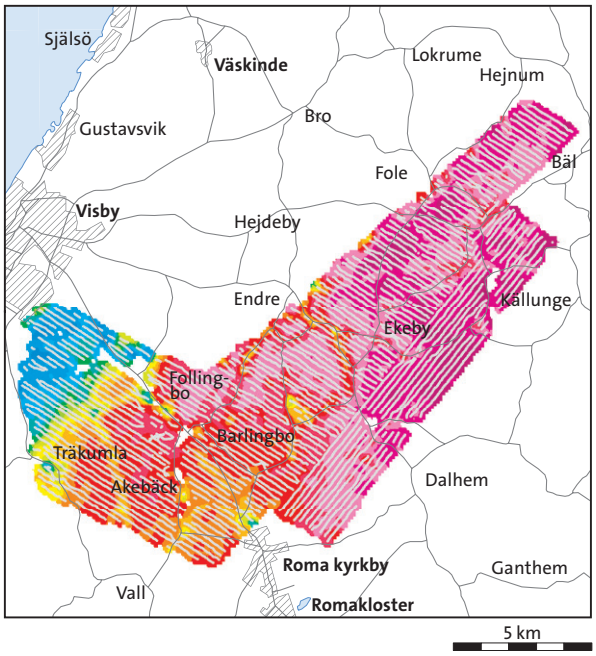

10 till 0 m ö.h.



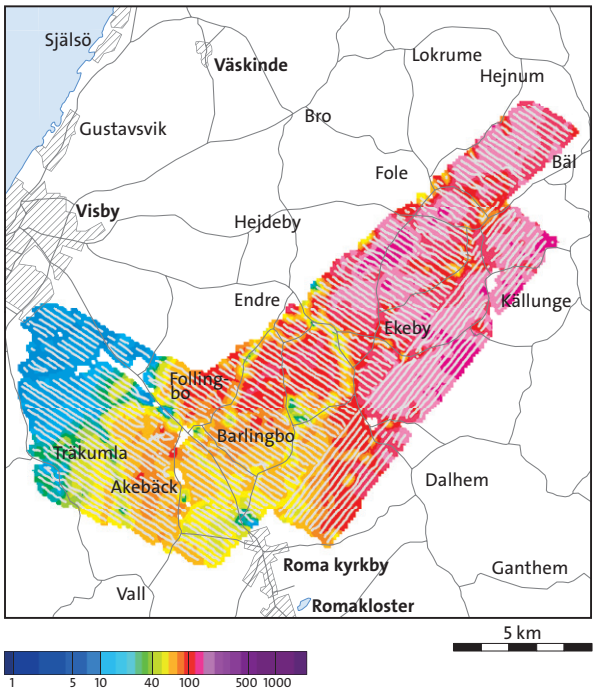
0 till –10 m ö.h.



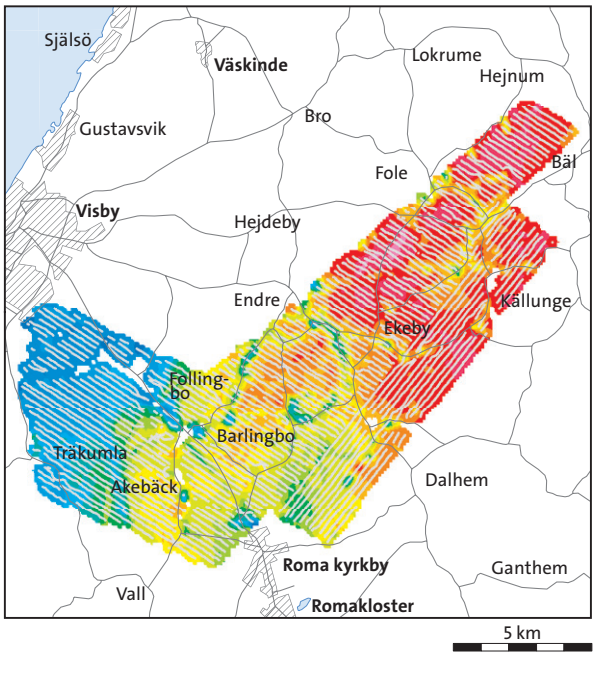

–10 till –20 m ö.h.



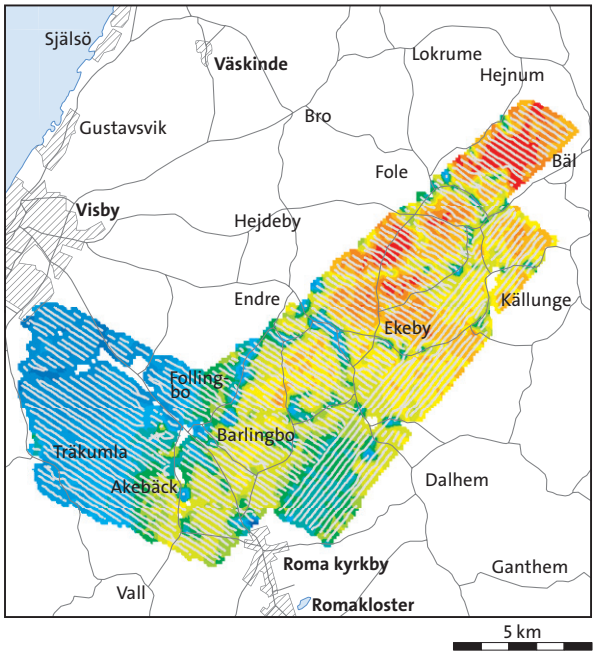

–20 till –30 m ö.h.



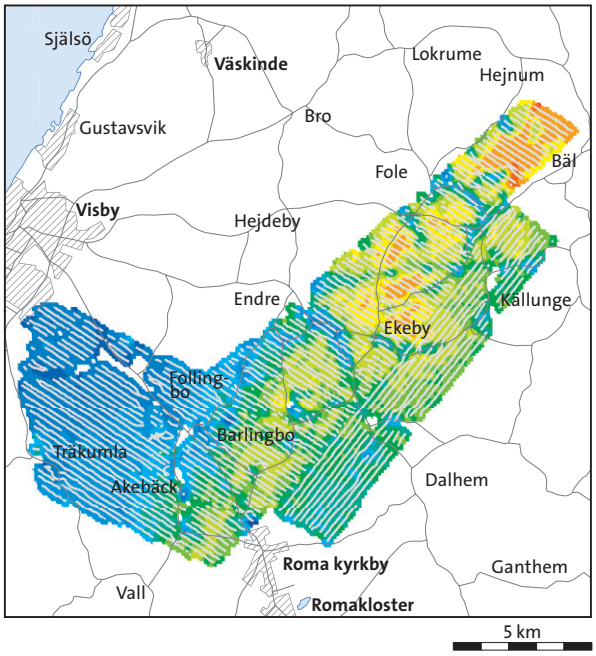

–30 till –40 m ö.h.



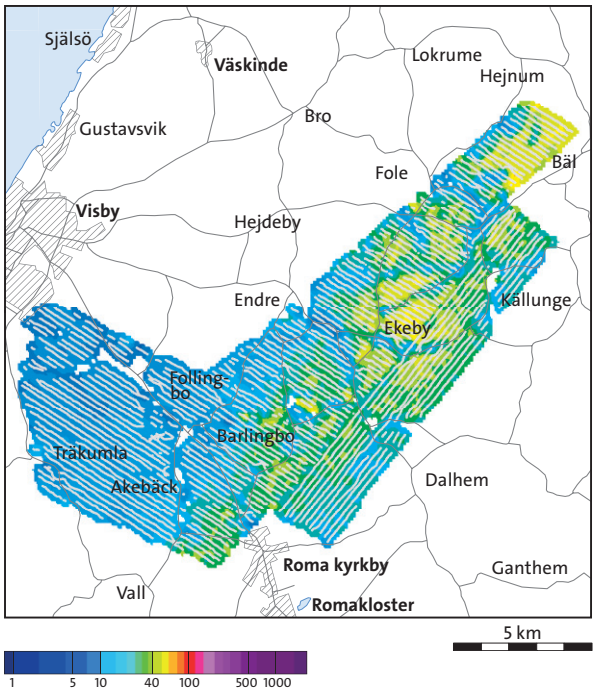
–40 till –50 m ö.h.



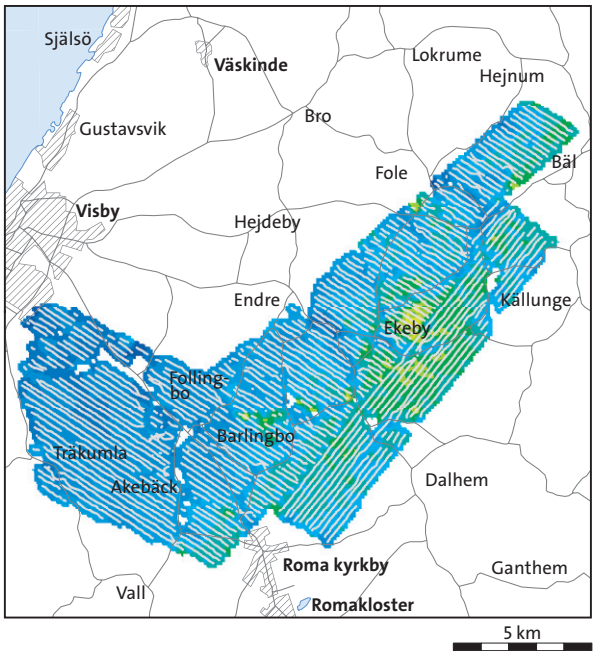

–50 till –60 m ö.h.



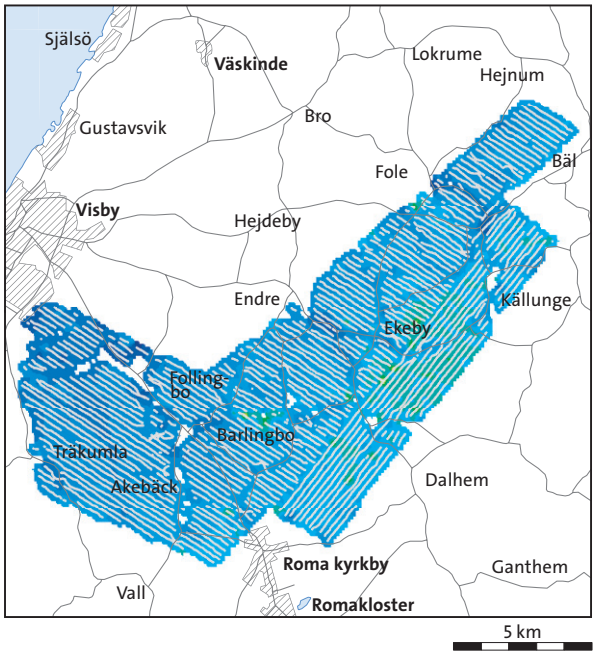

–60 till –70 m ö.h.



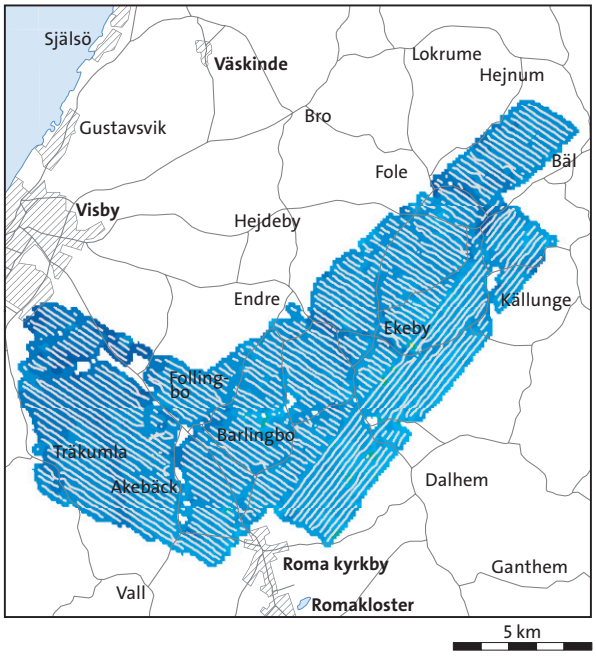

–70 till –80 m ö.h.



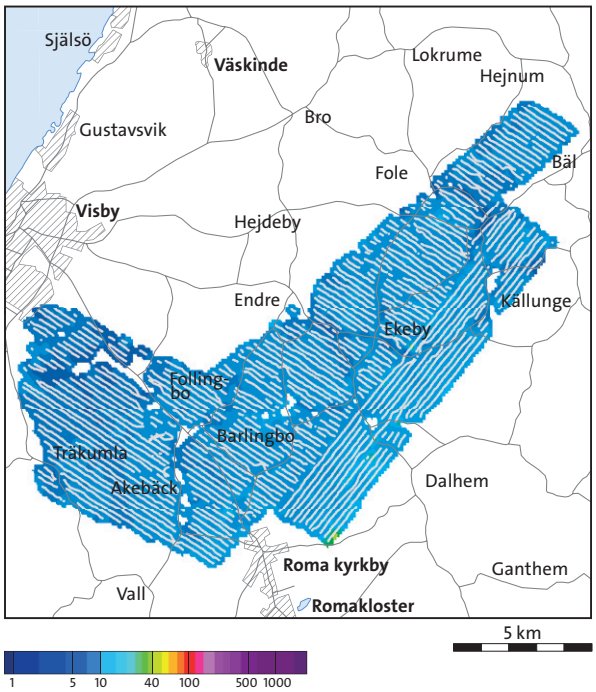
–80 till –90 m ö.h.




–90 till –100 m ö.h.

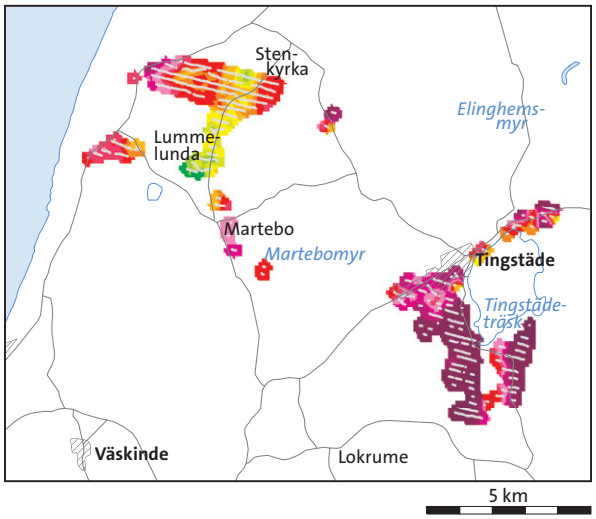



–100 till –110 m ö.h.

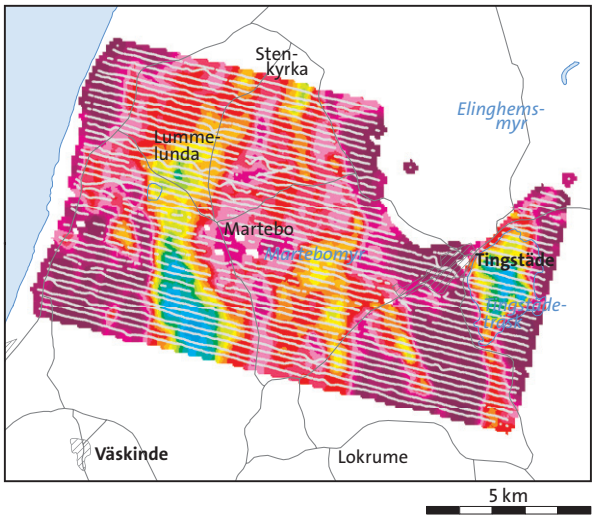


## OMRÅDE 3

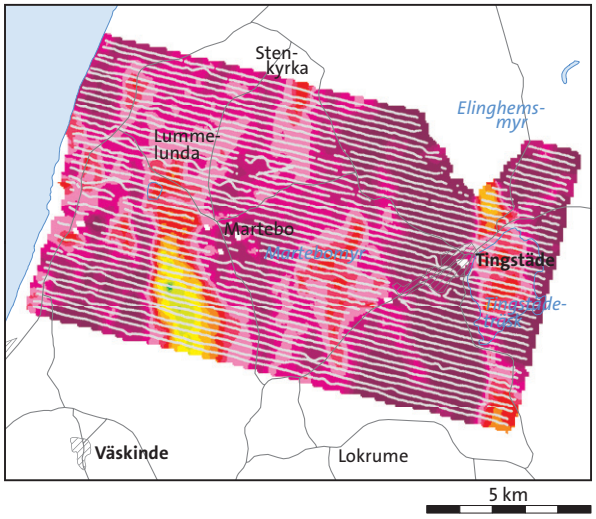
60 till 50 m ö.h.



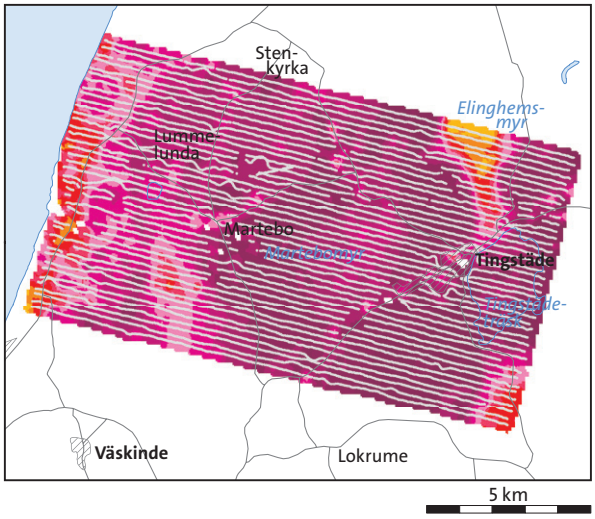

50 till 40 m ö.h.



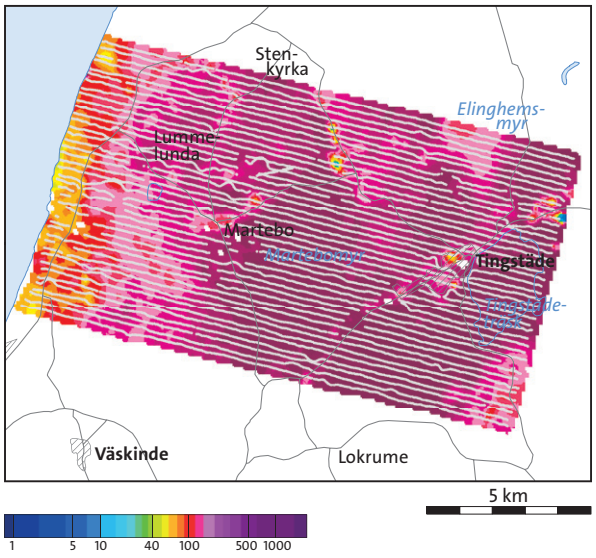

40 till 30 m ö.h.



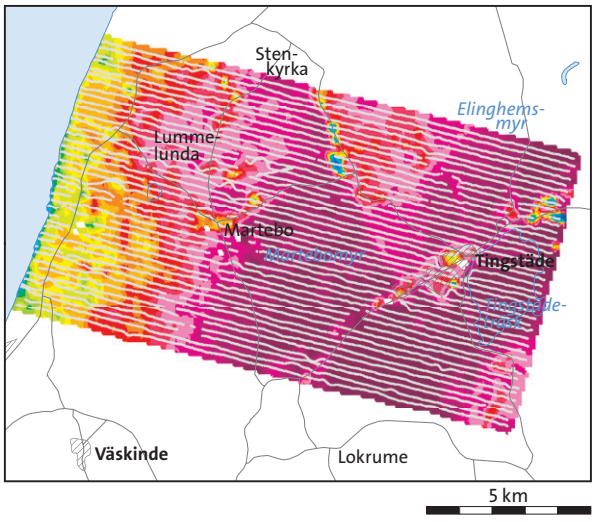

30 till 20 m ö.h.



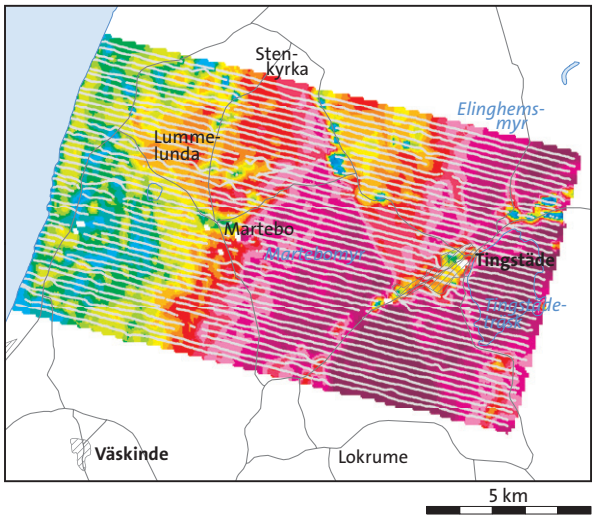

20 till 10 m ö.h.



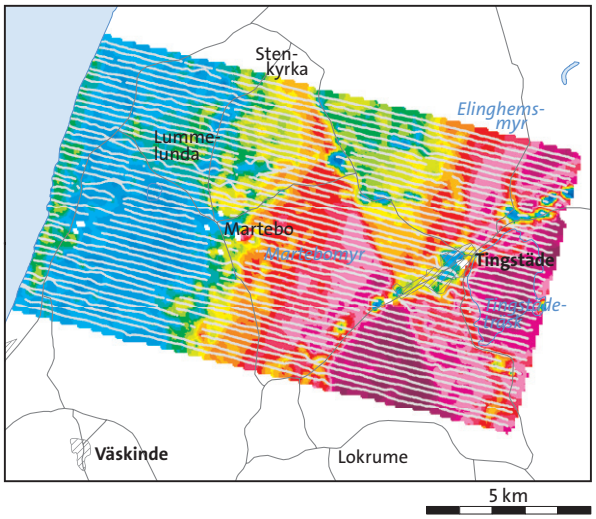

10 till 0 m ö.h.



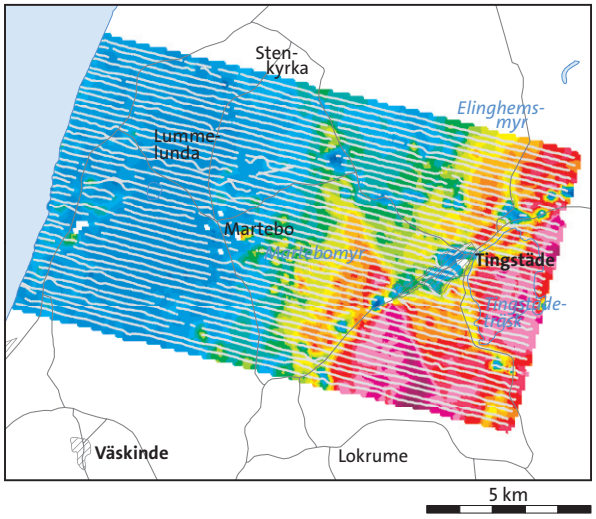
0 till –10 m ö.h.



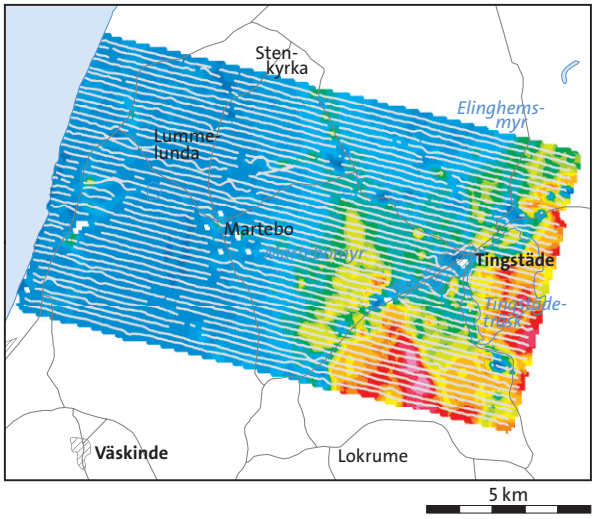

–10 till –20 m ö.h.



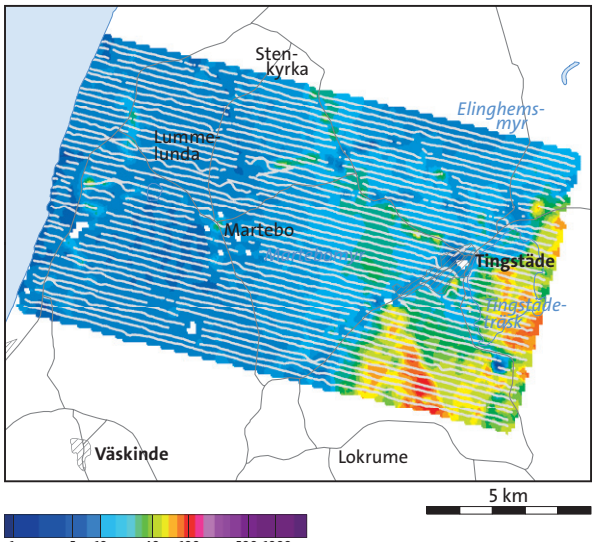

–20 till –30 m ö.h.



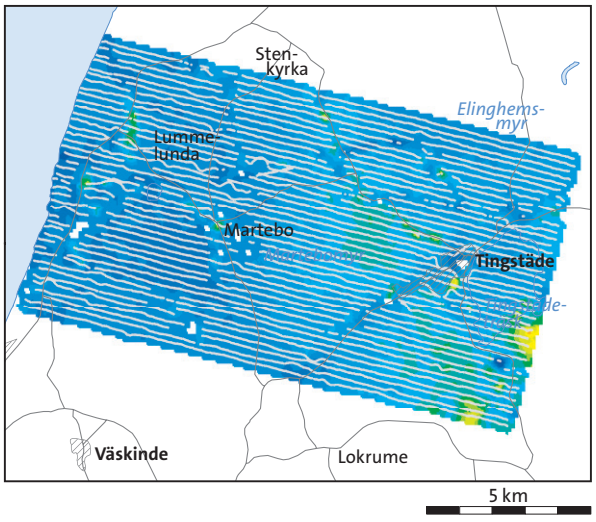

–30 till –40 m ö.h.

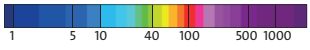



–40 till –50 m ö.h.

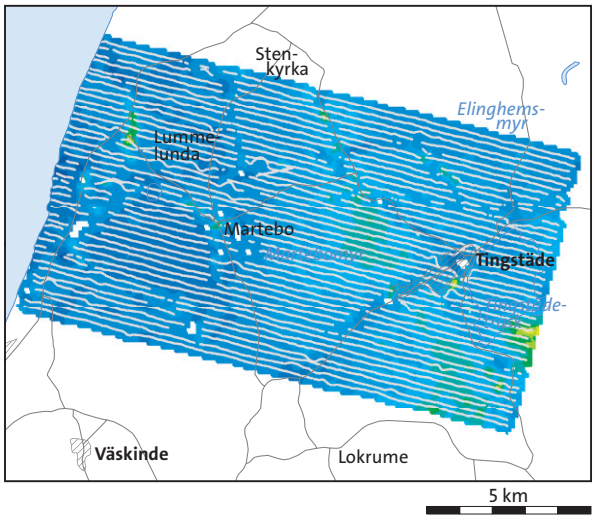



–50 till –60 m ö.h.

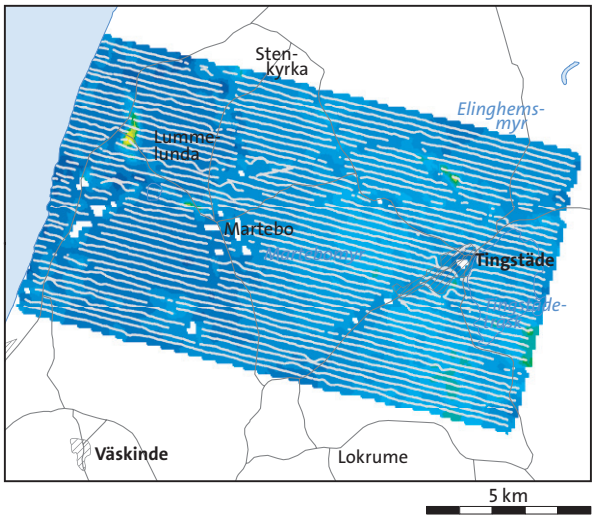


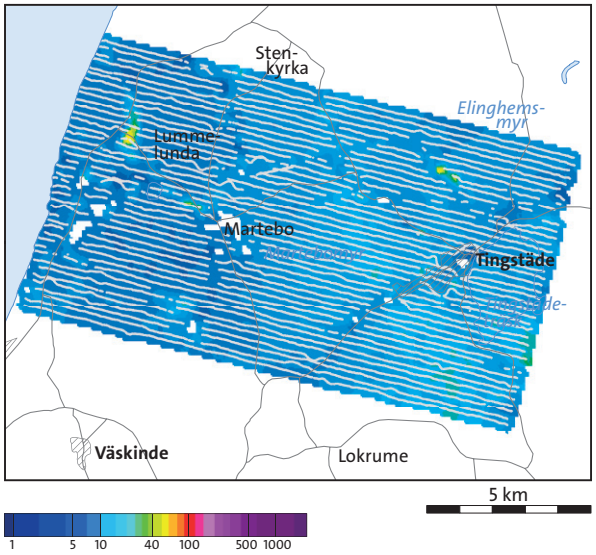
–60 till –70 m ö.h.



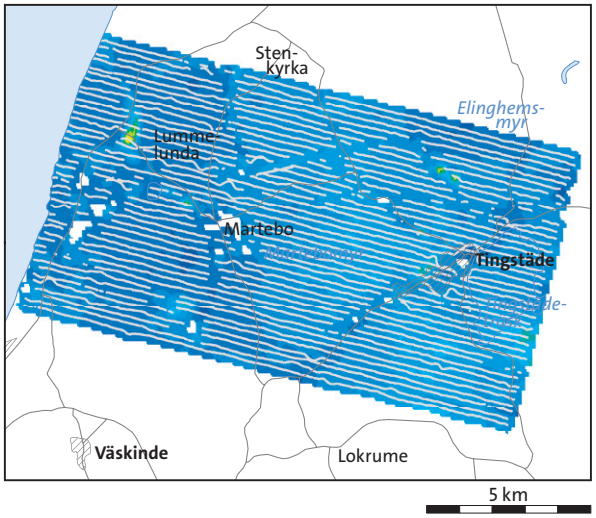

–70 till –80 m ö.h.




–80 till –90 m ö.h.



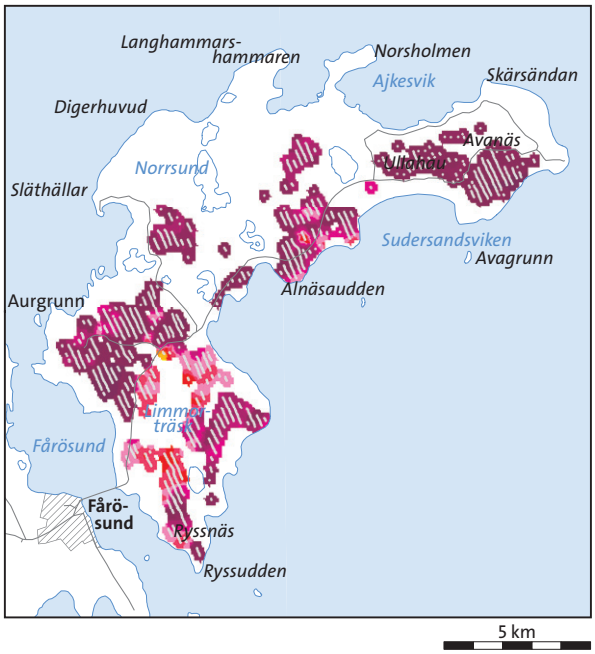

–90 till –100 m ö.h.



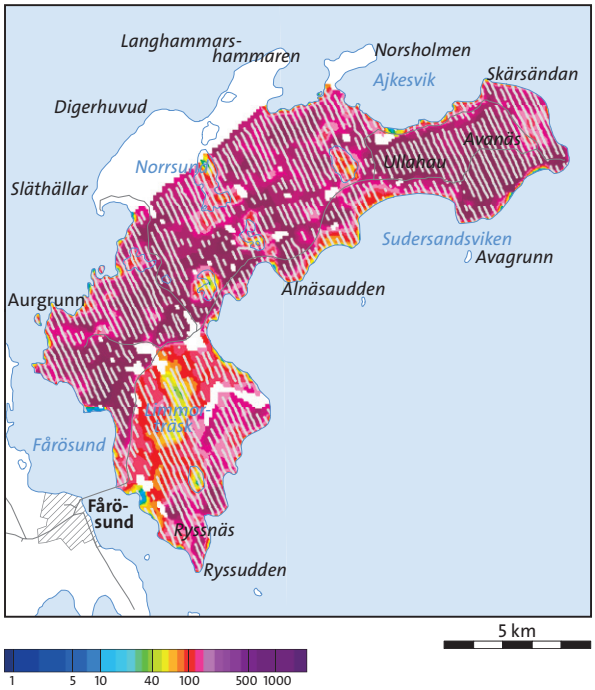
## OMRÅDE 4

30 till 20 m ö.h.

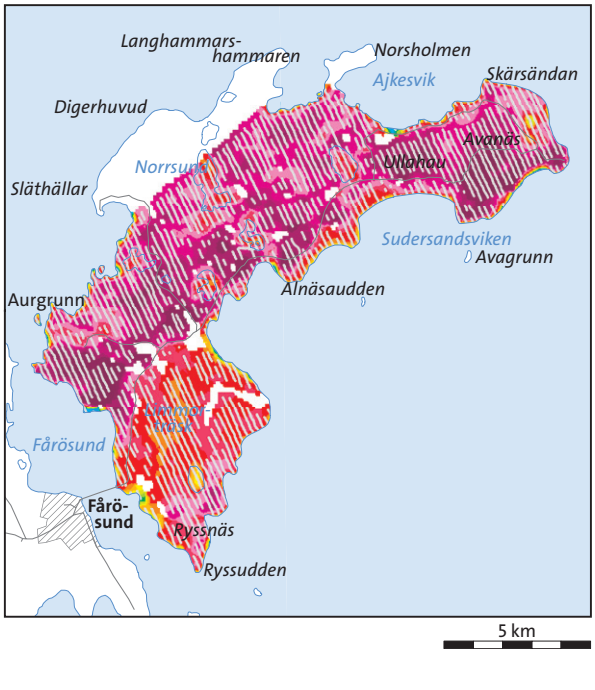
20 till 10 m ö.h.



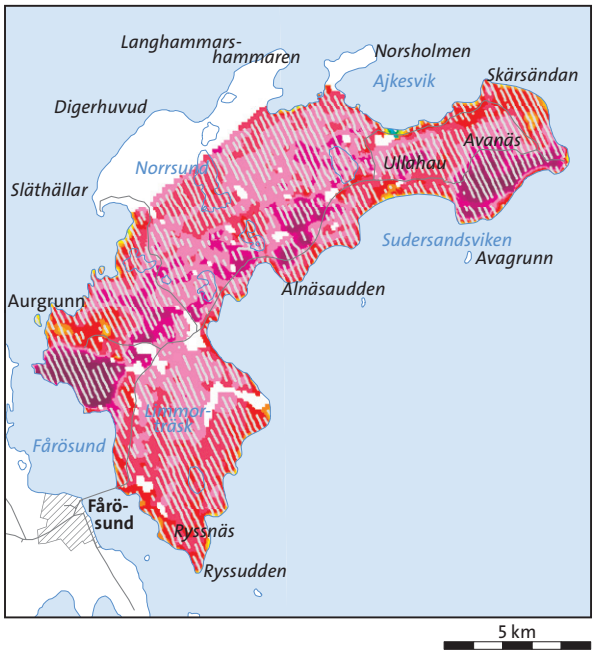

10 till 0 m ö.h.



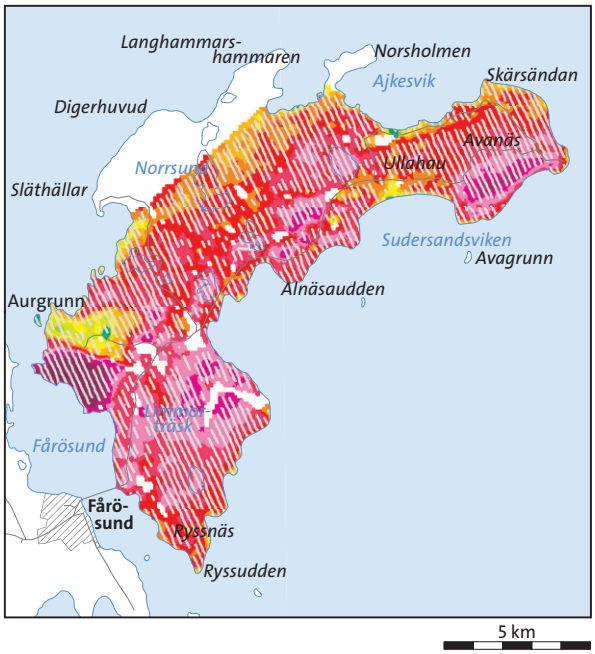

0 till –10 m ö.h.



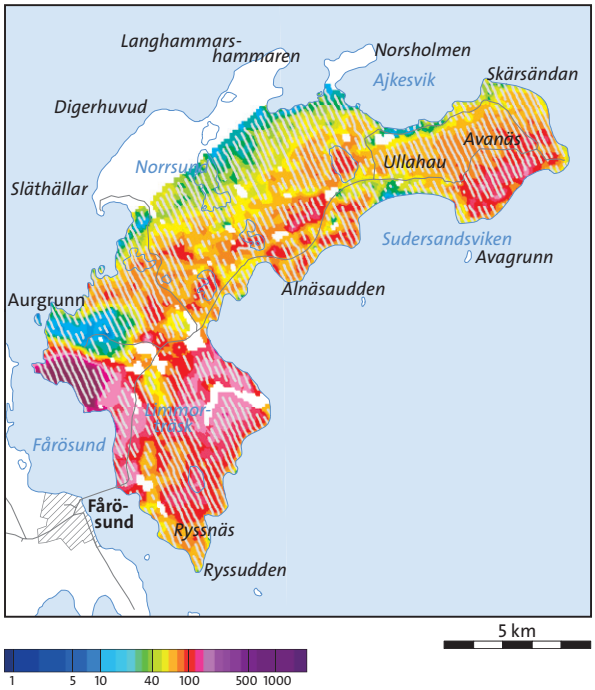
–10 till –20 m ö.h.



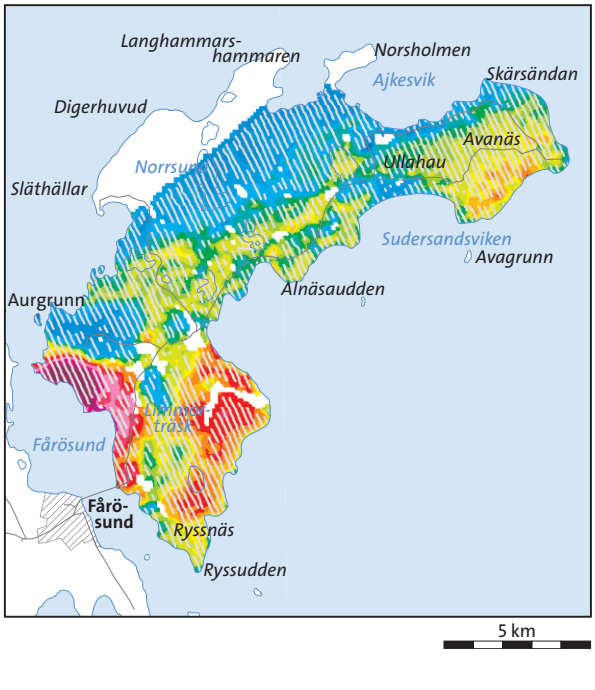

–20 till –30 m ö.h.



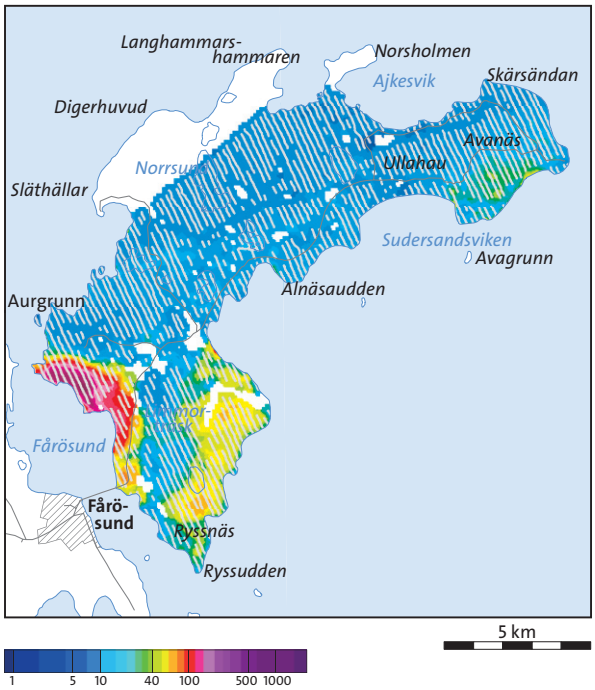

–30 till –40 m ö.h.



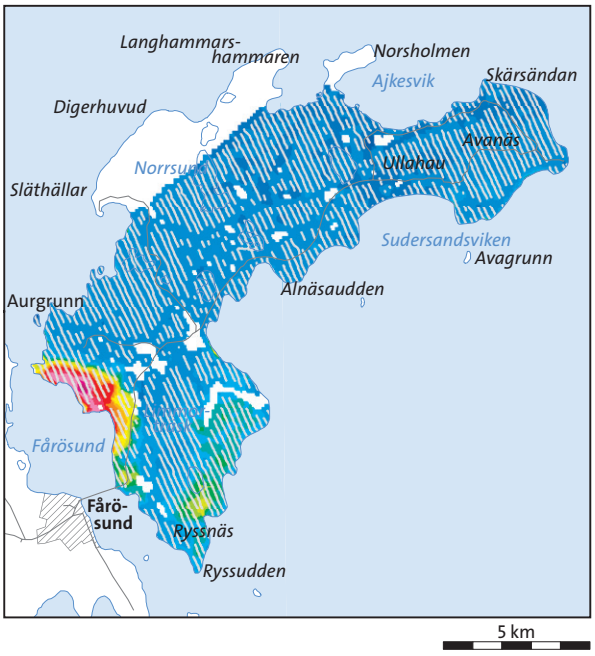

–40 till –50 m ö.h.



–50 till –60 m ö.h.




–60 till –70 m ö.h.



# Bilaga 2. Geofysiska markmätningar

Elektriska och elektromagnetiska profilmätningar utfördes inom de fyra områdena. Två metoder har använts: radiomagnetotellurik (RMT) och elektrisk resistivitetstomografi (ERT). Totalt mättes sju markprofiler med en längd varierande mellan ca 500 m och 1 380 m. Sex profiler uppmättes med RMT och en profil med ERT.

## RADIOMAGNETOTELLURIK (RMT)

Radiomagnetotellurik (RMT) är en elektromagnetisk metod där signalen från befintliga radiosändare i frekvensområdet 10–250 kHz (VLF- och LF-bandet) används. Instrumentet (EnviroMT) är utvecklat vid Uppsala universitet (Bastani 2001). Vid mätning registreras det elektriska fältet i två mot varandra vinkelräta riktningar, och det magnetiska fältet i tre vinkelräta riktningar. Markens resistivitet kan därefter bestämmas. Lägre frekvenser tillför information från djupare nivåer medan de höga frekvenserna ger detaljerad, ytnära information. RMT-metodens djupkänning är beroende av markens resistivitet. På Gotland är djupkänningen ca 100 m i områden som domineras av kalksten, medan den är betydligt lägre i områden med lågresistiv märgel och märgelsten.

Vid RMT-mätningen användes ett mätpunktsavstånd på tio meter. RMT-metoden är känslig för elektriska installationer som kraftledningar och nedgrävda ledningar. Även elstängsel kan störa mätningen, vilket var fallet längs några av profilerna som mättes på Gotland.

## ELEKTRISK RESISTIVITETSTOMOGRAFI

Vid elektrisk resistivitetstomografi (ERT) utsänds en ström i marken via två strömelektroder och potentialskillnaden registreras med två potentialelektroder. Markens skenbara resistivitet kan sedan bestämmas. Genom att öka avståndet mellan strömelektroderna erhålls en större djupkänning. Vid mätningen användes ett multielektrodsystem, Terrameter LS (ABEM), där 81 elektroder med ett inbördes avstånd på 5 m placerades ut längs profillinjen. Registreringen av mätdata skedde sedan automatiskt för olika elektrodkonfigurationer. Ett elektrodavstånd på 5 m användes för samtliga profiler. Djupkänningen för ERT-metoden är ca 60 m för den elektrodkonfiguration som använts här.

## 2D-INVERSION

Vid tolkningen av data har 2D-modelleringsprogram använts. För RMT-data användes en modifierad version av inversionsprogrammet Rebocc (Kalscheuer m.fl. 2008, Siripunvaraporn & Egbert 2000) och för ERT-data användes programmet Res2Dinv (Loke 2004). Vid inversion skapas en modell med celler av okänd resistivitet. Programmet anpassar resistiviteten i varje cell så att responsen från modellen överensstämmer med uppmätta data. Resultatet presenteras som djupsektioner över resistiviteten längs den uppmätta profilen.

## RESULTAT

### Profil 1, område 1

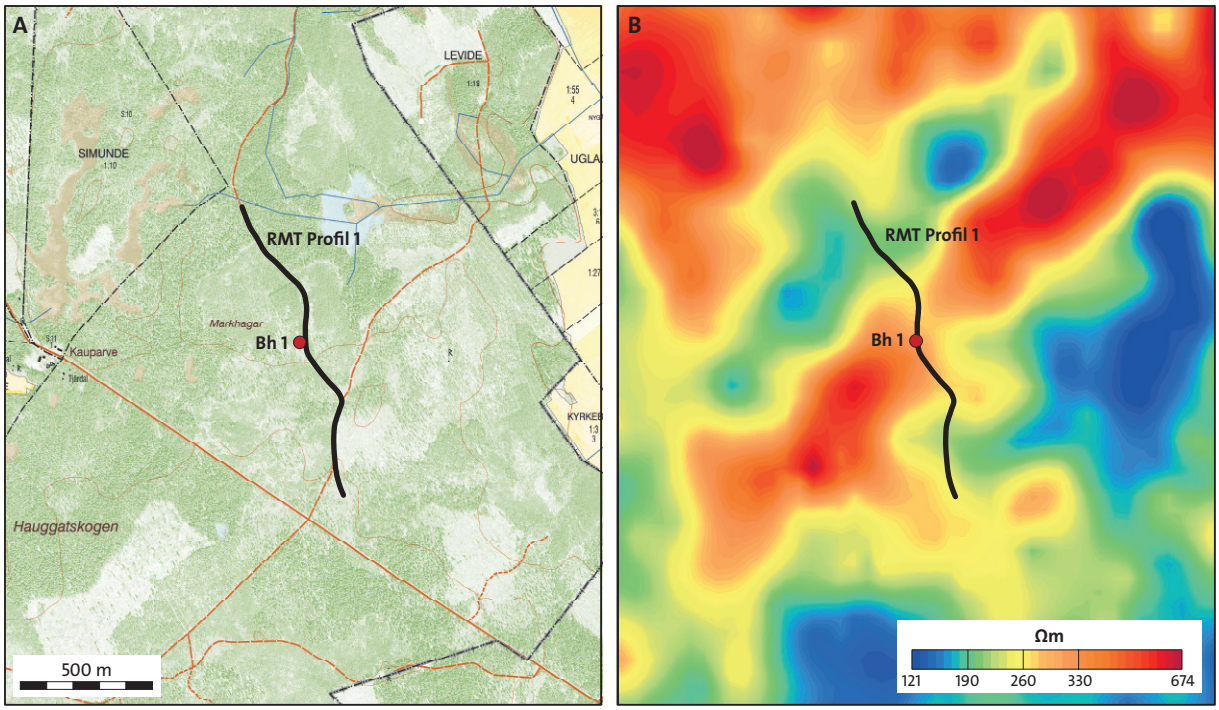
Profil 1 är 1 200 m lång och till största delen mätt längs väg (fig. 1A). Profilen var ursprungligen 90 m längre, men några datapunkter i den norra delen har tagits bort på grund av störningar i data. Syftet med profilen var att kartlägga den högresistiva strukturen i nordostlig riktning som framkommer i SkyTEM-data (fig. 1B). Borrhål 1 ligger längs profilen vid profilkoordinat 600 m.

Figur 2A visar resistivitetsmodellen med tolkningar från RMT-data. I början av profilen (0–400 m) syns tydligt fyra lager med omväxlande hög och låg resistivitet. Det högresistiva lagret i toppen, med undulerande mäktighet, motsvarar revkalksten. Under det ser vi ett lager med lägre resistivitet vilket indikerar en högre märgelinblandning. Detta följs av ytterligare ett högresistivt lager som indikerar kalksten. Detta lager finns även i den södra delen av profilen. Resistiviteten sjunker sedan mot djupet. Vid 600 m ser vi en ökning av mäktigheten av det övre, högresistiva lagret vilket sammanfaller med den högresistiva strukturen i figur 1B.

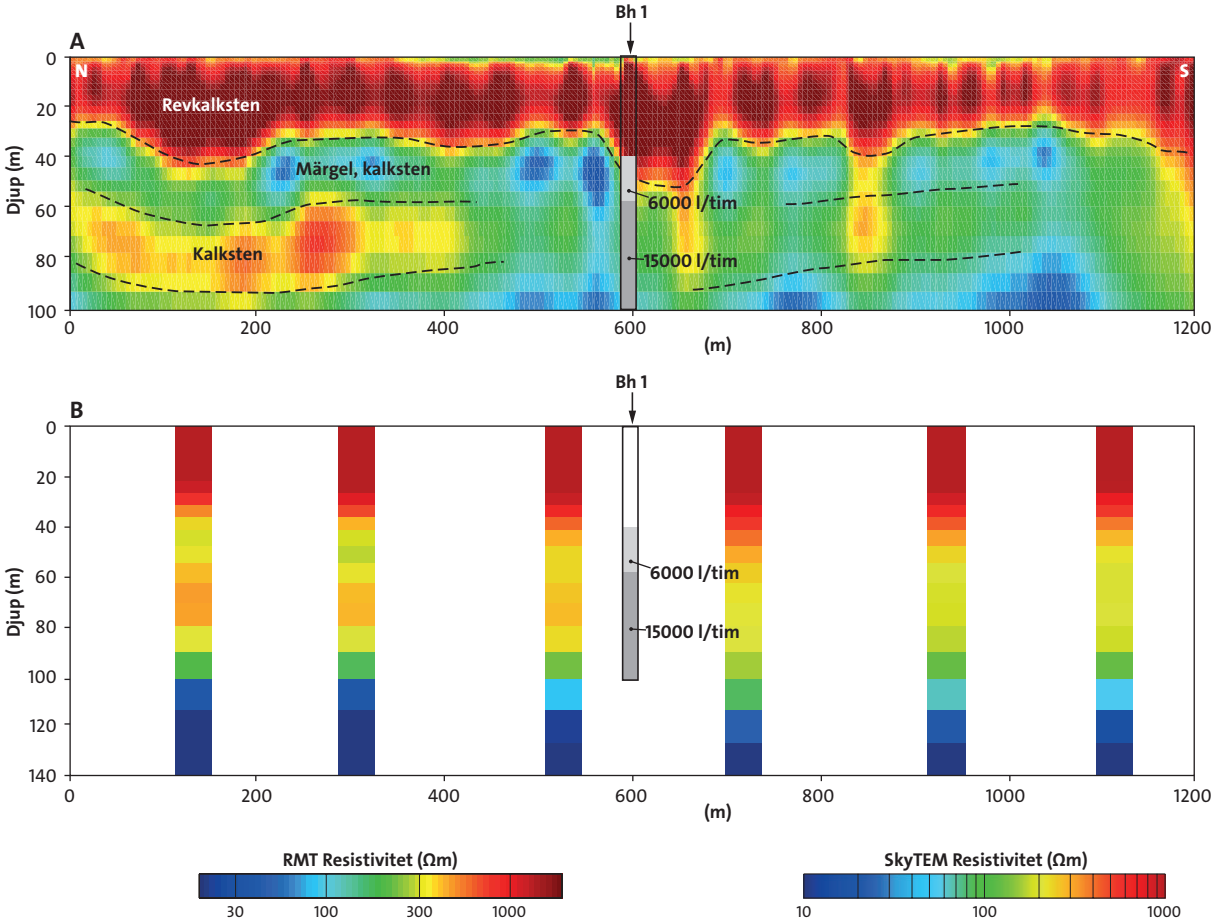
Figur 2B visar som jämförelse resistivitetsmodellen från SkyTEM-data längs samma profil. RMT-profilen går vinkelrätt mot flyglinjerna vilket förklarar det glesa punktavståndet (ca 200 m) i SkyTEM-modellen. Modellerna visar bra överensstämmelse med varandra, även om upplösningen är bättre i den markmätta RMT-profilen. SkyTEM har dock bättre djupkänning och modellen indikerar förekomst av saltvatten på ca 110 m djup (<40 Ωm).

Borrhål 1 ligger vid den högresistiva struktur som indikerats i SkyTEM-data och som även observerats i RMT-modellen (fig. 1 och 2). Vid borrningen erhölls vatten på 41 m djup (6 000 l/h), och vid 57 m djup ökade vattenmängden till 15 000 l/h (bilaga 3). Detta intervall sammanfaller med gränsytan mellan högresistiv revkalksten och underliggande lager med lägre resistivitet (omkring 200 Ωm) i RMT-modellen.

Det högresistiva, undre lagret som tydligast kommer fram i RMT-modellen mellan koordinat 0 och 400 m (fig. 2A) är inte lika tydligt vid läget för borrhålet. Att resistiviteten här är något lägre kan indikera att kalkstenen är uppsprucken, vilket även kan förklara det höga vattenflödet.




Figur 1. **A.** RMT-profil 1. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet 0–10 m ö.h, vilket motsvarar ett djup på ca 40–50 m under markytan.




Figur 2. **A.** Profil 1. Resistivitetsmodell med tolkningar från RMT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Läget för borrhål 1 och uppmätt vattenmängd är markerade i figuren. Observera att färgskalan skiljer sig något åt i de två modellerna, eftersom RMT-metoden, till skillnad från SkyTEM, även kan upplösa resistiviteter högre än 1 000 Ωm.

### Profil 2, område 1

Profil 2 är 1 000 m lång och uppmätt längs en mindre väg (fig. 3A). Profilen går parallellt med ett elstängsel från 0 till ca 700 m och data är delvis störda här, speciellt de högsta frekvenserna. Dessa har tagits bort i inversionen. Syftet med denna profil var att kartlägga en liknande högresistiv struktur som den vid profil 1. Strukturen går i nordostlig riktning och framträder tydligast på större djup, ca –40 m, dvs. ca 100 m under markytan. På detta djup är upplösningen med RMT-metoden mycket dålig och figur 3B visar därför medelresistiviteten på ca 40–50 m djup under markytan. Borrhål 2 ligger ca 500 m söder om profilen.

Figur 4A visar resistivitetsmodellen med tolkningar från RMT-data. I likhet med profil 1 ser vi även här fyra något undulerande lager med omväxlande hög och låg resistivitet. Det högresistiva lagret i toppen motsvarar revkalksten. Under det ser vi ett lager med lägre resistivitet, vilket indikerar en högre märgelinblandning, följt av ytterligare ett högresistivt lager som indikerar kalksten. Resistiviteten sjunker sedan mot djupet. Vid ca 500 m syns en dislokation i modellen som sammanfaller med läget för strukturen som observerats på större djup.

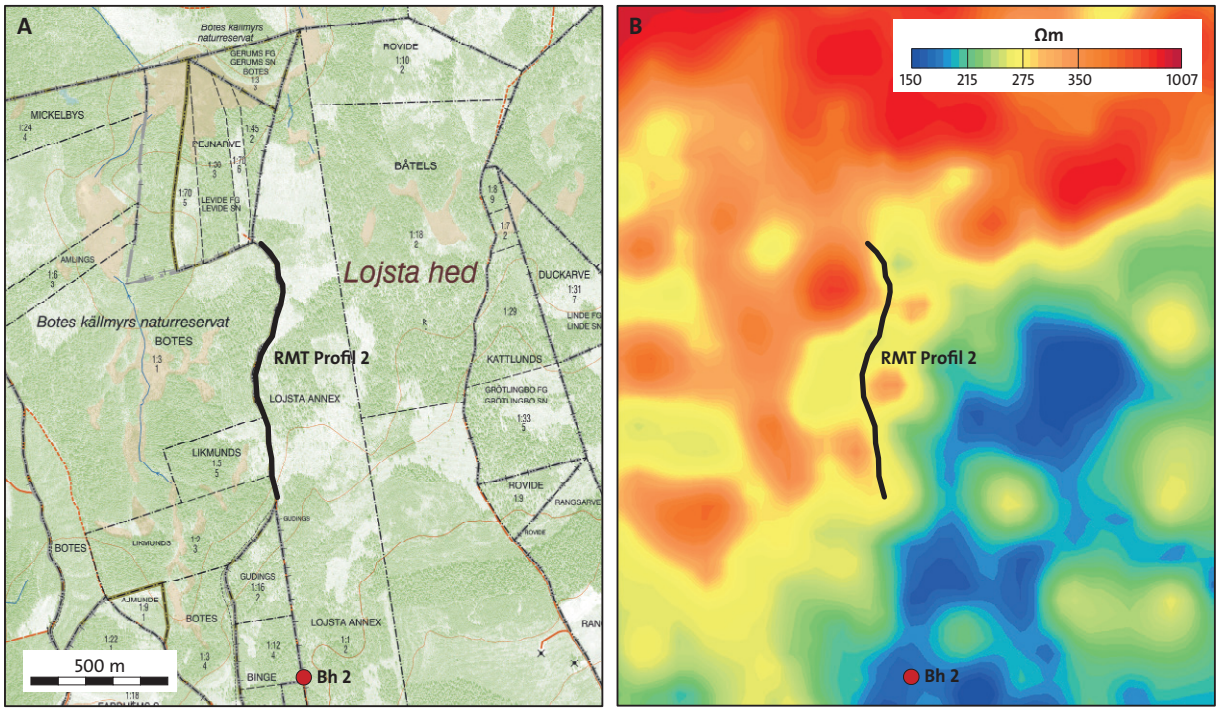
Borrhål 2, som ligger ca 500 m söder om profilen, gav en liten vattenmängd, endast 1 500 l/h på 80 m djup.

### Profil 3, område 2

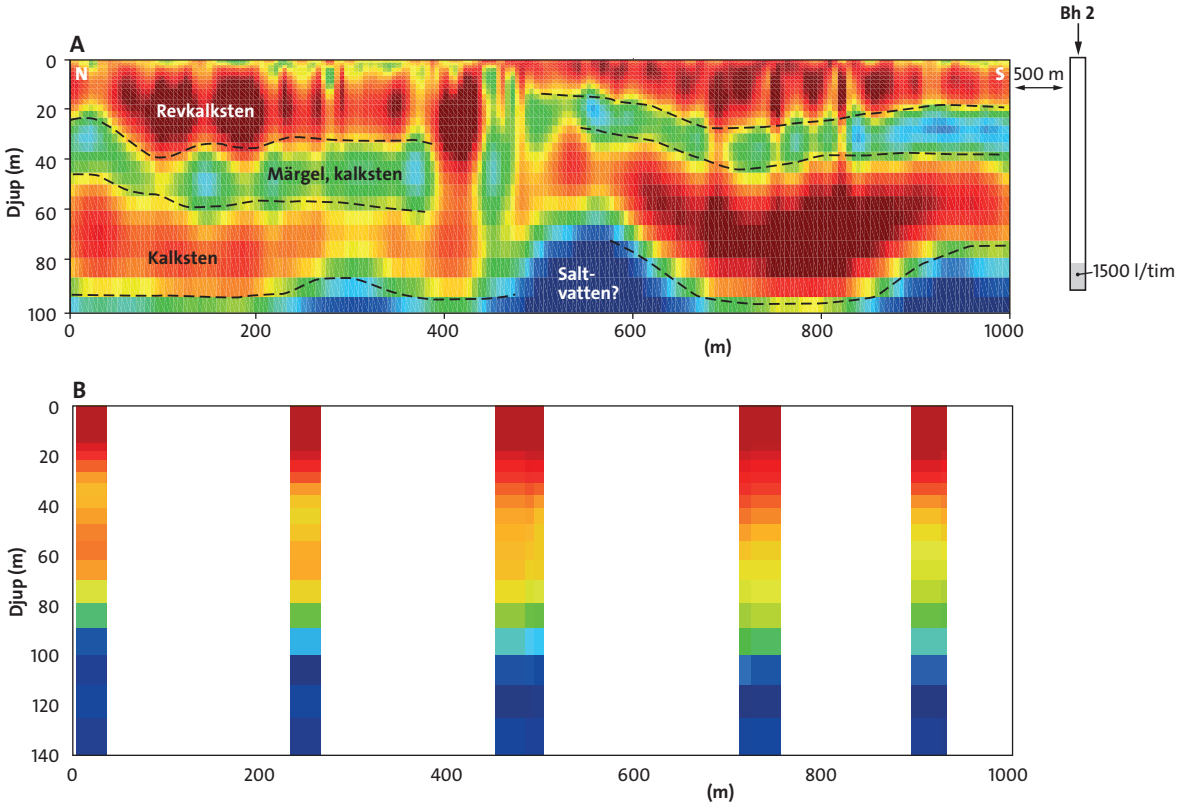
Profil 3 är 700 m lång och den enda profil som mättes med ERT-metoden. Syftet med denna profil var främst att jämföra resistivitetsvariationerna längs profilen med resultat från borrning och borrhålsloggning. Borrhål 3 ligger ca 200 m öster om profilkoordinat 350 m (fig. 5).

Figur 6A visar resistivitetsmodellen med tolkningar från ERT-data ner till ett djup av ca 60 m. Tre lager kan urskiljas i modellen. Överst syns ett lager med låg resistivitet (70–100 Ωm) som motsvaras av jordlagret i ytan samt eventuellt märgel. Under det syns ett ca 20 m mäktigt, homogent lager med något högre resistivitet (300 Ωm). Vid ca 40 m djup sjunker resistiviteten ned till ca 150 Ωm. Resistiviteten är betydligt lägre här jämfört med Profil 1 och 2 (område 1), vilket indikerar att kalkstenen inom detta område har en högre porositet. Resistivitetsmodellen från RMT-data överensstämmer mycket väl med modellen från SkyTEM-data (fig. 6B).

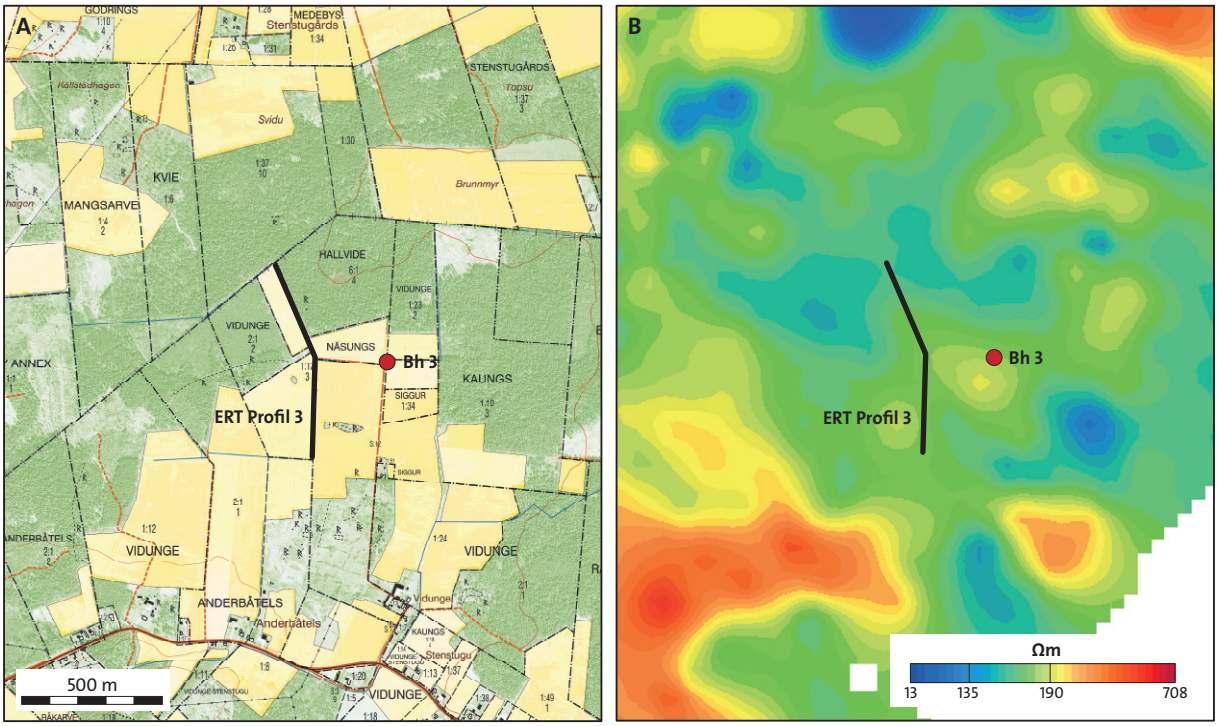
Vid borrningen erhölls vatten på 7 m djup (3 000 l/h) och på 15 m djup ökade vattenmängden till 9 000 l/h. Enligt borrprotokollet är berget mycket uppsprucket ned till 88 m djup, vilket förklarar den relativt låga resistiviteten i kalkstenen. I likhet med profil 1 erhölls höga vattenflöden i resistivitetsintervallet 200 till 300 Ωm.



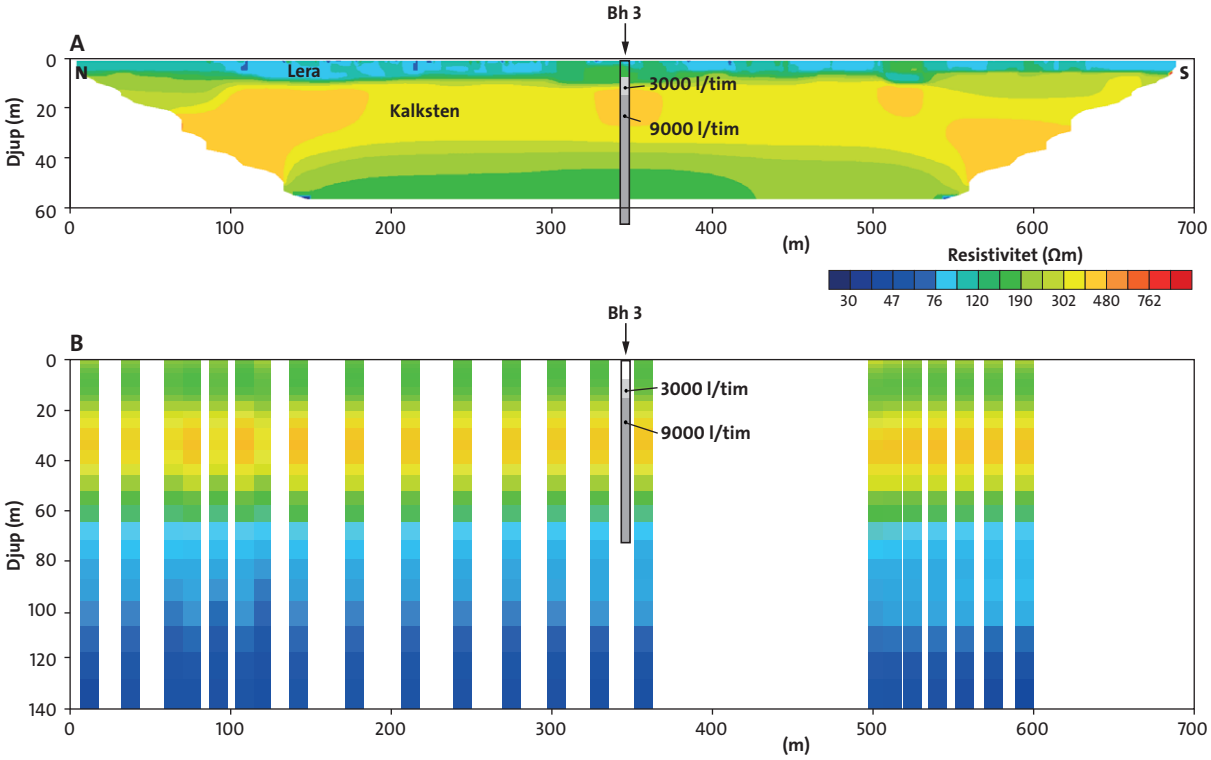

Figur 3. **A.** RMT-profil 2. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet 10–20 m ö.h, vilket motsvarar ett djup på ca 40–50 m under markytan.




Figur 4. **A.** Profil 2. Resistivitetsmodell med tolkningar från RMT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Läget för borrhål 2 och uppmätt vattenmängd är markerade i figuren. Se figur 2 för färgskala.




Figur 5. **A.** ERT-profil 3. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet 0–10 m ö.h., vilket motsvarar ett djup på ca 15–25 m under markytan.




Figur 6. **A.** Profil 3. Resistivitetsmodell från ERT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Läget för borrhål 3 och uppmätt vattenmängd är markerad i figuren. För färgskala för SkyTEM-data. Se figur 2 för färgskala.

### Profil 4, område 3

Profil 4 är 480 m lång och uppmätt på åkermark och längs en mindre väg (fig. 7A). De sista 200 m av profilen går parallellt med ett elstängsel och här är data störda, speciellt de högsta frekvenserna vilka tagits bort i inversionen. Syftet med profilen var att undersöka en tydlig resistivitetskontakt i nordväst–sydostlig riktning som identifierats i SkyTEM-data (fig. 7B) och som troligtvis orsakas av en förkastning. Borrhål 7 ligger vid profilkoordinat 270 m längs profilen.

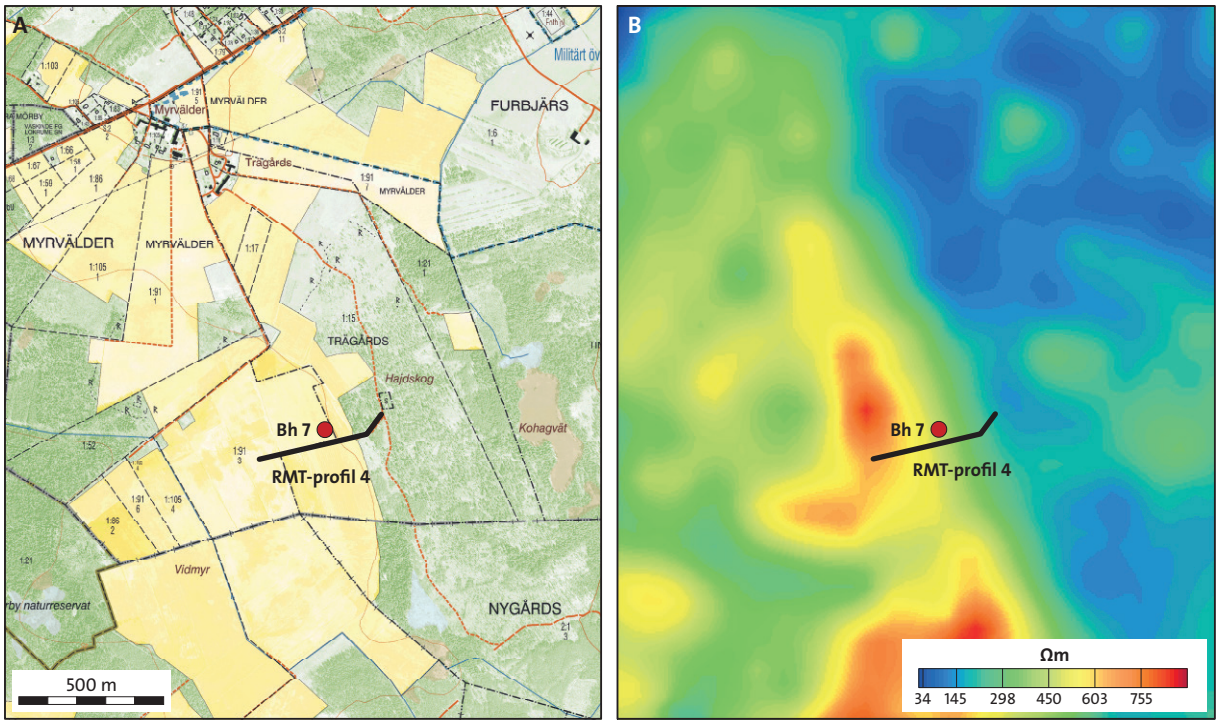
Resistivitetsmodellen från RMT-data (fig. 8A) visar en brantstående, lågresistiv zon i mitten av profilen (270 m) och denna sammanfaller med resistivitetskontakten i fig. 7B. I den västra delen av profilen (0–250 m) visar modellen ett ytligt, tunt, lågresistivt lager som motsvarar jordlagren och lera. Detta följs av ett högresistivt lager med ca 50–60 m mäktighet som motsvarar kalksten. På ca 60 m djup sjunker resistiviteten vilket indikerar att vi kommer ner i ett lager med märgel. De lägsta resistiviteterna på större djup (>80 m) orsakas troligtvis av saltvatten. Den östra delen av profilen visar sämre överensstämmelse med resistivitetsmodellen från SkyTEM-data (fig. 8B). Här är data troligtvis störda och den högresistiva struktur med stort djupgående som framträder i modellen är troligtvis en artefakt. Längs i öster visar modellen ett högresistivt lager med en mäktighet på ca 40 m vilket stämmer bra överens med modellen från SkyTEM-data.

Borrhål 7 ligger mitt på kontakten mellan hög och låg resistivitet och vid borrningen erhölls vatten på 24 m djup (120 l/h) samt ökande vid 33 m djup till 300 l/h. På 87 m djup ökade vattenmängden ytterligare till 1 200 l/h. Vattnet var då salt vilket även indikeras av de låga resistiviteterna i modellen. Detta borrhål har inte undersökts med geofysisk borrhålsloggning.

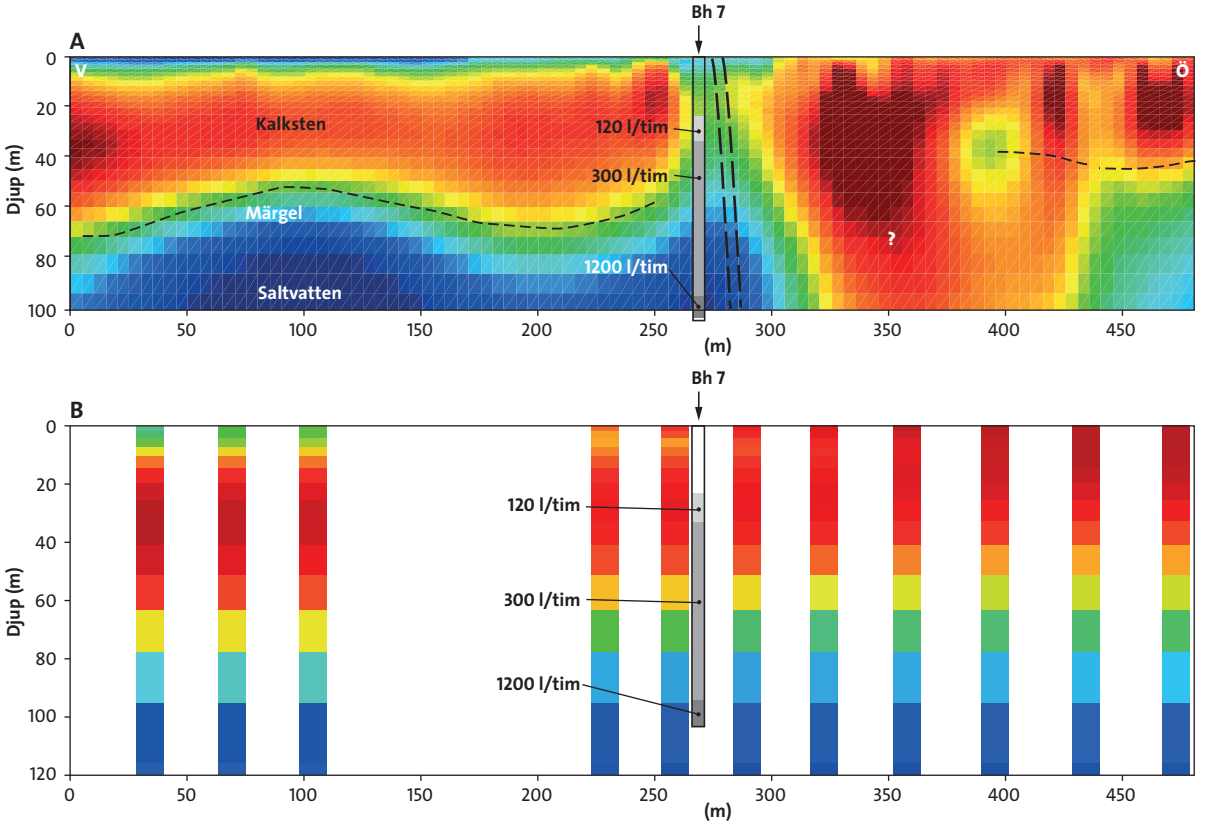
### Profil 5, område 4

Profil 5 är 560 m lång och uppmätt längs en mindre väg (fig. 9A). Syftet med profilen var främst att jämföra resistivitetsvariationerna längs profilen med resultat från borrning och borrhålsloggning. Borrhål 9 ligger vid profilkoordinat 460 m längs profilen.

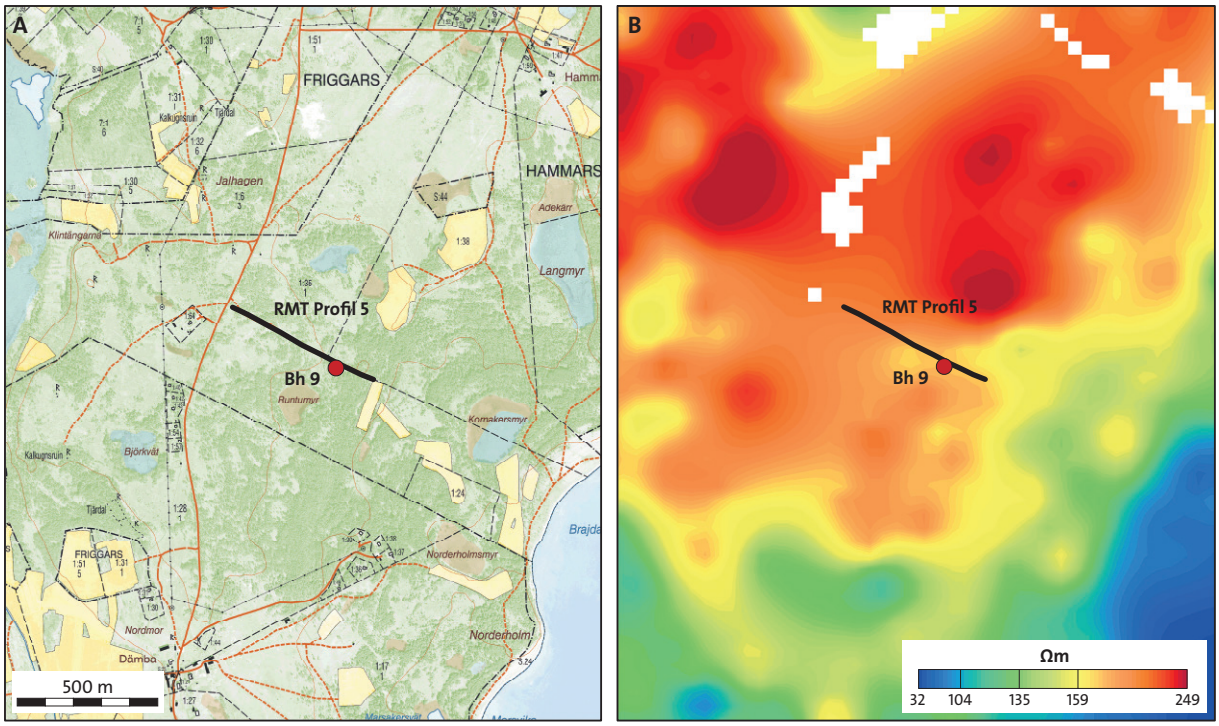
Resistivitetsmodellen från RMT-data (fig. 10A) visar fem lager med omväxlande låg och hög resistivitet. Överst finns ett mycket tunt, lågresistivt lager som motsvarar jordtäcket. Det översta högresistiva kalkstenslagret har en mäktighet på ca 15 m och det undre högresistiva kalkstenslagret har en mäktighet som varierar mellan ca 15 och 25 m. Tjockleken på det undre lagret är troligtvis något överskattad i modellen. Även borrhålsloggningen indikerar ett avsnitt med lägre gammastrålning och högre resistivitet på 42–50 m djup under



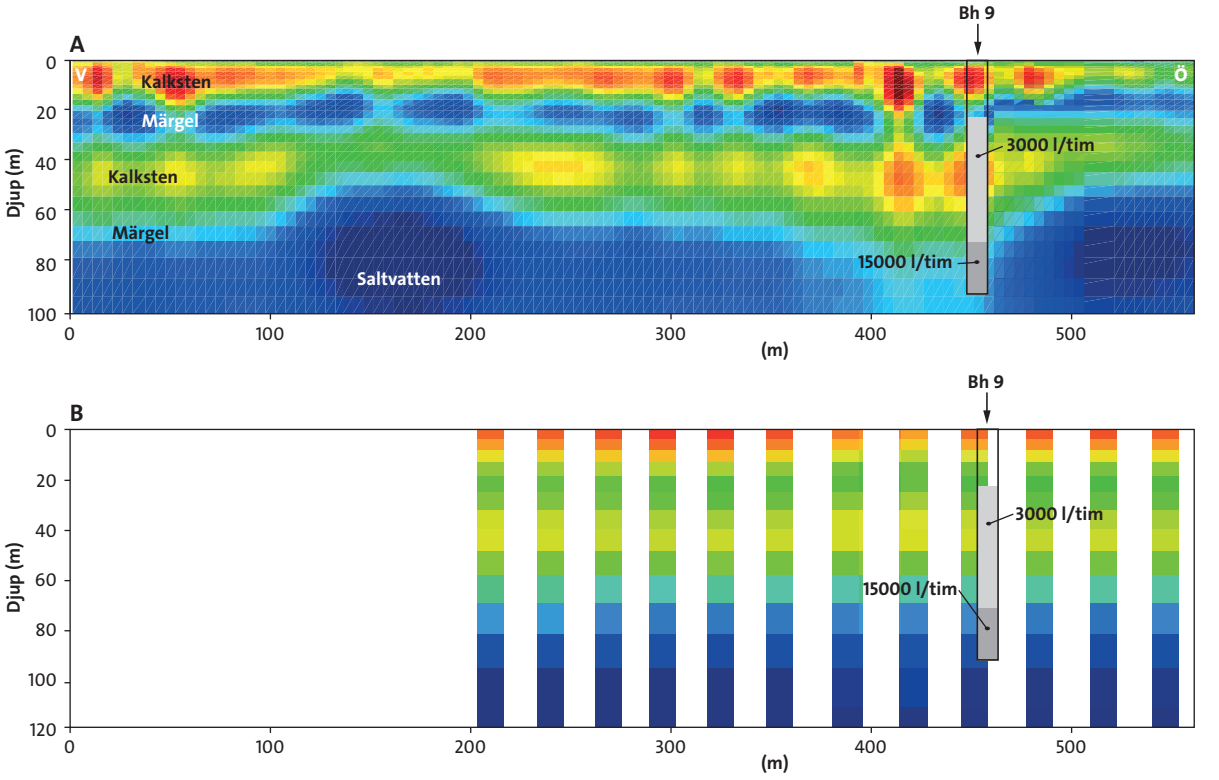

Figur 7. **A.** RMT-profil. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet 0–10 m ö.h, vilket motsvarar ett djup på ca 15–25 m under markytan.




Figur 8. **A.** Profil 4. Resistivitetsmodell med tolkningar från RMT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Läget för borrhål 7 samt uppmätt vattenmängd är markerade i figuren. Se figur 2 för färgskala.




Figur 9. **A.** RMT-profil 5. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet –20 till –30 m ö.h., vilket motsvarar ett djup på ca 35–45 m under markytan.




Figur 10. **A.** Profil 5. Resistivitetsmodell med tolkningar från RMT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Läget för borrhål 9 och uppmätt vattenmängd är markerad i figuren. Se figur 2 för färgskala.

markytan. Resistivitetsmodellen från RMT-data överensstämmer mycket väl med modellen från SkyTEM-data (fig. 10B), även om upplösningen naturligtvis är betydligt bättre i den markmätta RMT-profilen.

Vid borrningen erhölls vatten på 18 m djup (6 l/h) samt ökande vid 23 m djup till 3 000 l/h. På 71 m djup ökade vattenmängden ytterligare till 15 000 l/h. I likhet med profil 1 erhölls vatten i det nedre kalkstenslagret. Resistiviteten här är något högre (ca 400 Ωm) och vattenflödet lägre i jämförelse med profil 1 och borrhål 1.

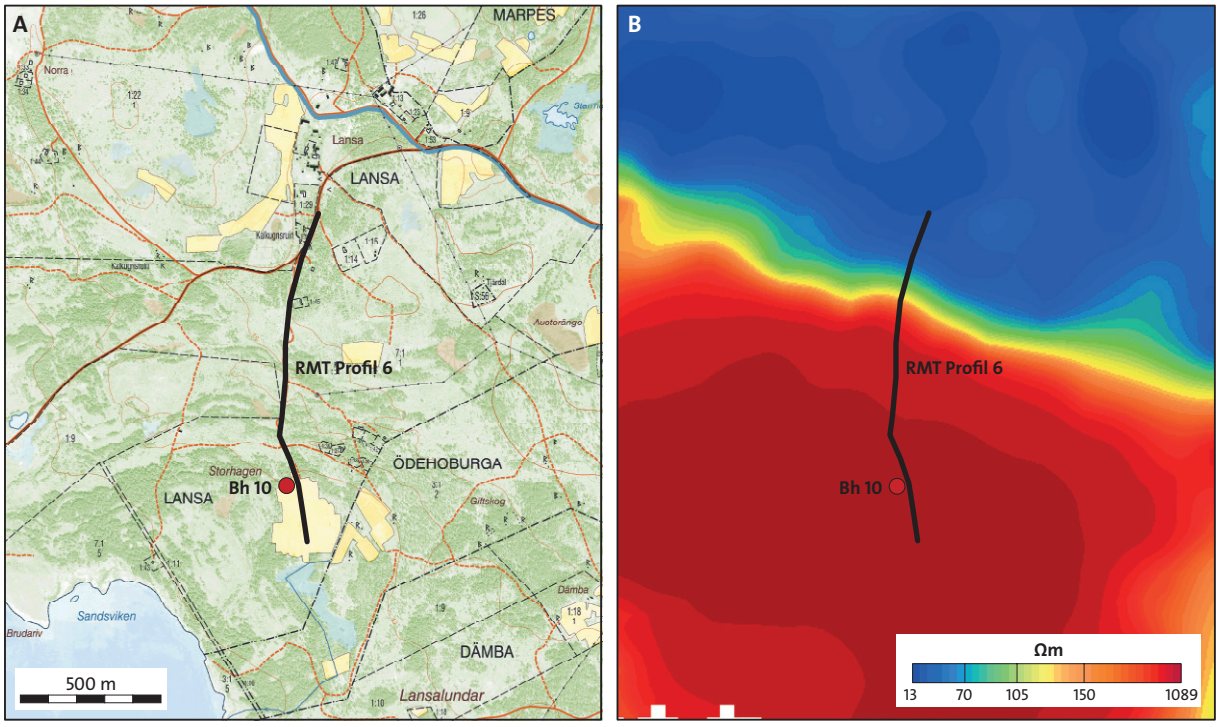
### Profil 6, område 4

Profil 6 är 1 220 m lång och delvis uppmätt längs en mindre väg (fig. 11A). Syftet med profilen var att undersöka den mycket tydliga resistivitetskontakt i öst–västlig riktning som identifierats i SkyTEM-data (fig. 11B). Data är bitvis mycket störda längs denna profil, främst i början av profilen (0–200 m) och vid koordinat 350–450 m där profilen går parallellt med en elledning. Data har plockats bort i detta område. Borrhål 10 ligger längs profilen vid profilkoordinat 1 050 m.

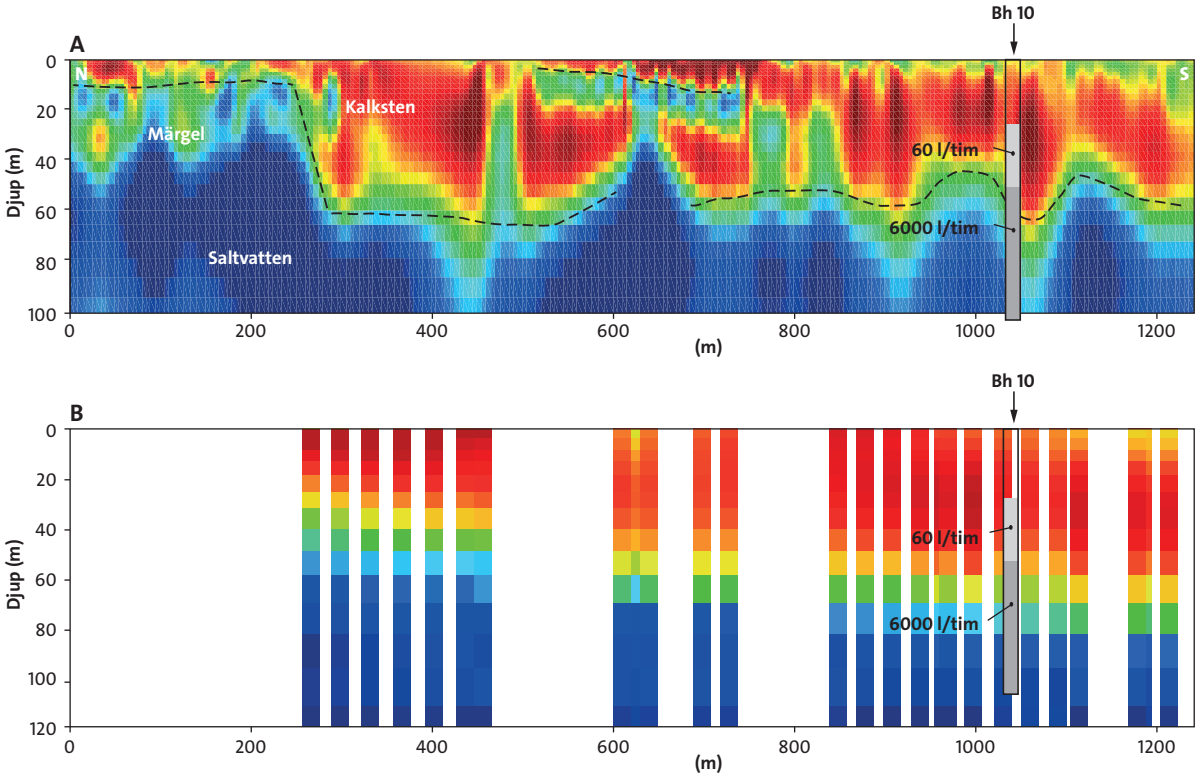
Resistivitetsmodellen från RMT-data (fig. 12B) visar lokalt stora variationer längs profilen vilket till viss del kan bero på att data varit störda. Dock ser vi en tydlig förändring i mäktigheten av det högresistiva kalkstenslagret vid profilkoordinat 250 m som sammanfaller med resistivitetskontakten i figur 11B. I den nordligaste delen av profilen (0–250 m) uppgår mäktigheten på kalkstenlagret till endast cirka 10 m och söder om profilkoordinat 250 m ökar mäktigheten till 50–60 m. Resistivitetsmodellen från RMT-data överensstämmer relativt väl med modellen från SkyTEM-data (fig. 12B). SkyTEM-data saknas delvis längs denna profil (bortplockade på grund av av störningar).

Vid borrningen erhölls mycket små mängder vatten på 25 m djup (60 l/h) men på 54 m djup ökade vattenmängden till 6 000 l/h. Detta område sammanfaller med gränsytan mellan högresistiv kalksten och underliggande lager med lägre resistivitet (märgel). Vattnet var mycket salt enligt brunnsprotokollet.

Inom detta område är det troligtvis små chanser att erhålla större mängder sött vatten. Här förekommer endast ett kalkstenslager med mycket hög resistivitet (dvs. kalkstenen har låg porositet) och saltvattenytan finns antingen inuti denna kalkstensvolym eller sammanfaller med gränsytan mellan kalkstenen och underliggande märgel.




Figur 11. **A.** RMT-profil 6. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet –20 till –30 m ö.h., vilket motsvarar ett djup på ca 35–45 m under markytan.



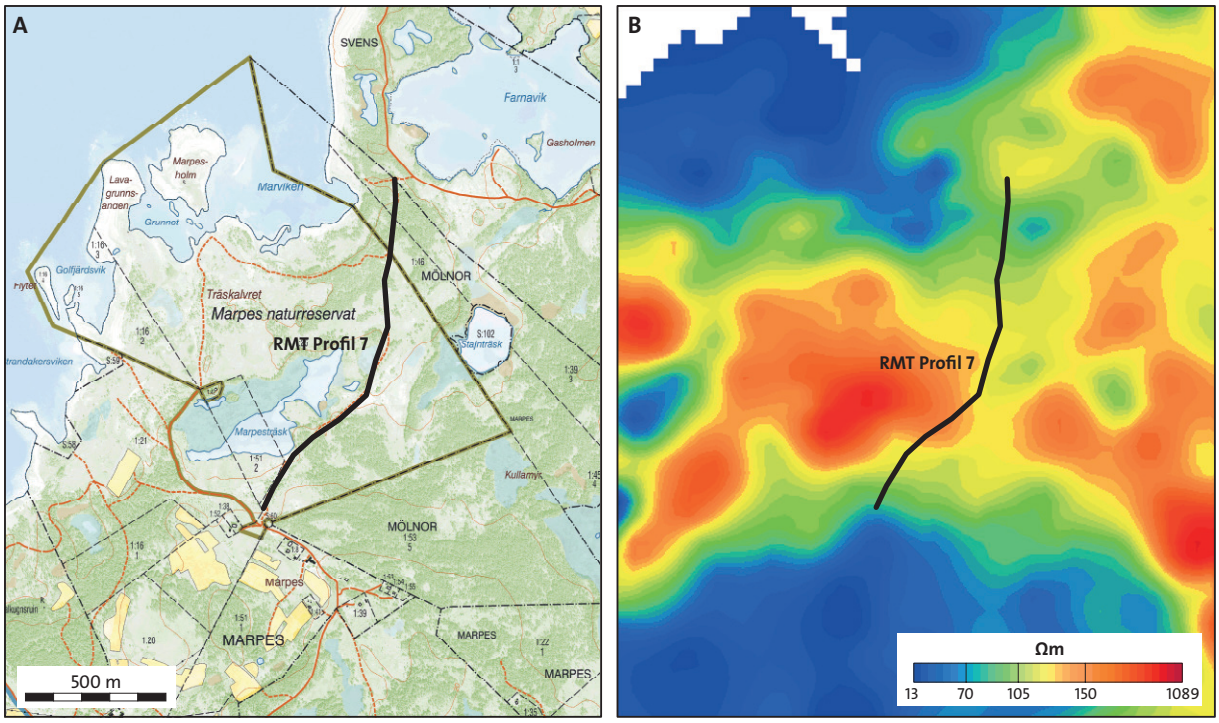

Figur 12. **A.** Profil 6. Resistivitetsmodell med tolkningar från RMT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Läget för borrhål 10 och uppmätt vattenmängd är markerade i figuren. Se figur 2 för färgskala.

### Profil 7, område 4

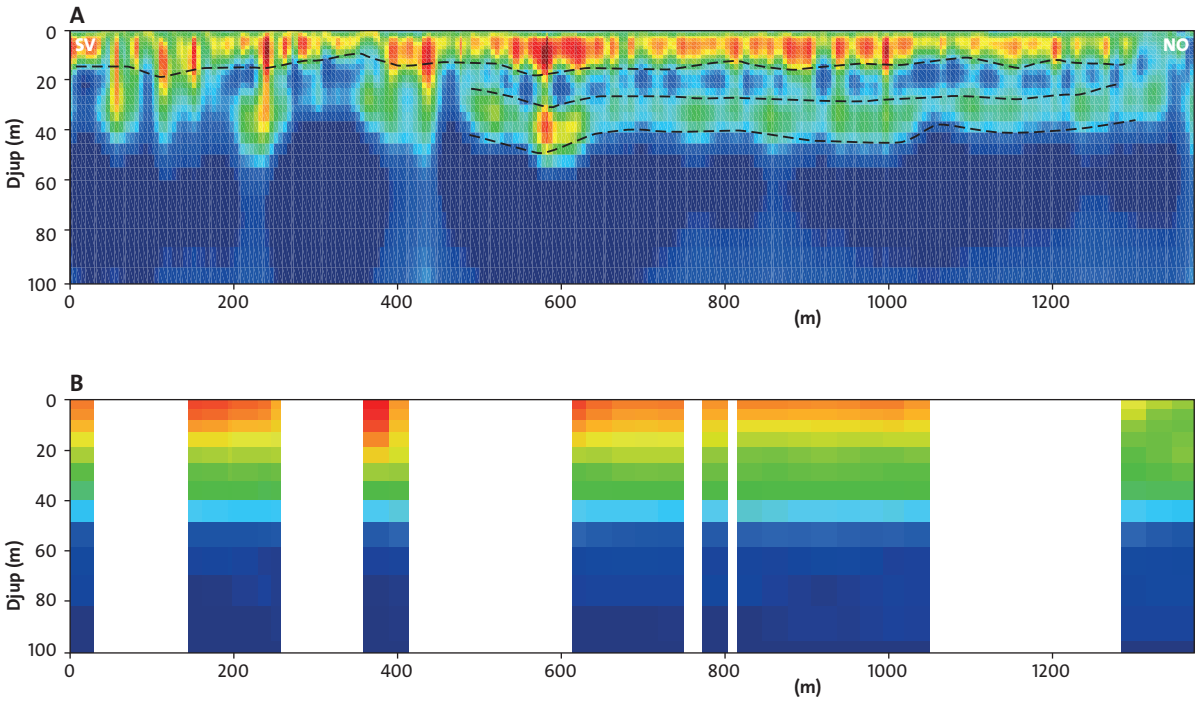
Profil 7 är 1 380 m lång och uppmätt längs en mindre väg (fig. 13A). Syftet med profilen var att undersöka den högresistiva struktur i nordväst–sydostlig riktning som identifierats i SkyTEM-data (fig. 13B). Det finns inget borrhål längs denna profil.

Resistivitetsmodellen från RMT-data (fig. 14A) visar fem lager med omväxlande låg och hög resistivitet. Överst syns ett mycket tunt, lågresistivt lager som motsvarar jordtäcket. Det översta, högresistiva kalkstenslagret har en mäktighet på ca 10–15 m, och det undre högresistiva kalkstenslagret har en mäktighet som varierar mellan ca 10 och 15 m. Saltvattenytan ligger troligtvis på ca 40–50 m djup. Resistivitetsmodellen från RMT-data överensstämmer relativt väl med modellen från SkyTEM-data (fig. 14B), men det undre högresistiva lagret är för tunt för att upplösas i SkyTEM-data. Kalkstenslagren är även något mäktigare i de centrala delarna vilket även indikeras i kartan över medelresistiviteten (fig. 13B).

Resistivitetsmodellen från denna profil är jämförbar med modellen från profil 5, dvs. geologin är likartad med två kalkstenslager och mellanliggande märgellager. Det indikerar även möjligheten att erhålla vatten i det undre kalkstenslagret på ca 30 till 40 m djup. Resistiviteten i detta lager är ca 200 Ωm. Lagret är dock tunnare i jämförelse med profil 5, och saltvattenytan ligger ytligare här.




Figur 13. **A.** RMT-profil 7. **B.** Medelresistiviteten i djupsnittet –20 till –30 m ö.h, vilket motsvarar ett djup på ca 25–35 m under markytan




Figur 14. **A.** Profil 7. Resistivitetsmodell med tolkningar från RMT-data. **B.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data längs samma profil. Se figur 2 för färgskala.

# Bilaga 3. Brunnsprotokoll

SGU diarienr: 914610328

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-09
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| | |
|---|---|
| Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Hejde Lojstahajd 1:1 | Ort: Klintehamn |
| Församling: Hejde | Kommun: Gotland |
| Borrplatsens läge: | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V: N: 6363146 E: 707100 X: 6362892 Y: 1658757 |
| Borrplatsens adress: | Telefon (även riktnummer): |

**Ägare/Beställare**

| | |
|---|---|
| Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU) | Telefon (även riktnummer): 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10 | Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0.1 | Jord | | |
| 0.1 | 130.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | | x | | mm | | — | | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 130.0 m | 0.1 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 130.0 m | 0.5 tim | 15000 liter/tim | [X] före tryckning | — | m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | — | m |

**GV-nivå**

| Stabil grundvattennivå under markytan | Datum vid mätningstillfället | Mätning av grundvattennivån har skett | antal timmar |
|---|---|---|---|
| m | | [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag | |

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:
Annan anmärkning: Borrhål 1 av 10. Vatten på 41 m ca 100 lit/min ökande vid 57 m till ca 250 lit/min ökande vid 105-115 m.

| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 1. Borrprotokoll från borrhål 1.

SGU diarienr: 914610348

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-09
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| | |
|---|---|
| Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Lojsta Annex 1:1 | Ort: Hemse |
| Församling: Lojsta | Kommun: Gotland |
| Borrplatsens läge | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V: N: 6360534 E: 707100 X: 6360279 Y: 1658726 |
| Borrplatsens adress | Telefon (även riktnummer) |

**Ägare/Beställare**

| | |
|---|---|
| Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU) | Telefon (även riktnummer): 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10 | Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 1.6 | Klappersten/grus | | |
| 1.6 | 90.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | | x | | mm | | — | | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 90.0 m | 0.0 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från — till |
|---|---|---|---|---|
| 90.0 m | 0.5 tim | 1500 liter/tim | [X] före tryckning | — m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | — m |

**GV-nivå**

| Stabil grundvattennivå under markytan | Datum vid mätningstillfället | Mätning av grundvattennivån har skett | antal timmar |
|---|---|---|---|
| m | | [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag | |

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:
Annan anmärkning: Borrhål 2 av 10. Fukt på 12 m vattenökning efter 80 m till ca 25 lit/min.

| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 2. Borrprotokoll från borrhål 2.

SGU diarienr: 914610358

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-06
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**
Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Dalhem Näsungs 1:12
Ort: Dalhem
Församling: Dalhem
Kommun: Gotland
Borrplatsens läge:
Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V
N: 6387083 E: 711445 X: 6386780 Y: 1663387
Borrplatsens adress:
Telefon (även riktnummer):

**Ägare/Beställare**
Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU)
Telefon (även riktnummer): 046-311784
Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10
Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 1.1 | Jord | | |
| 1.1 | 3.4 | Lera | | |
| 3.4 | 110.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**
Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

Totaldjup från markytan: 110.0 m
Jorddjup från markytan (djup till berg): 1.1 m
Borrhålets bottendiameter: 115.0 mm

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**
Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 110.0 m | 0.5 tim | 9000 liter/tim | [X] före tryckning | — | m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | — | m |

**GV-nivå**
Stabil grundvattennivå under markytan: m
Datum vid mätningstillfället:
Mätning av grundvattennivån har skett: [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag antal timmar

**Anmärkningar**
Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:
Annan anmärkning: Borrhål 3 av 10. Vatten på 7 m ca 50 lit/min. Mycket trasigt sprickigt berg ner till 88 m. Ökande efter 15 m till ca 150 lit/min.

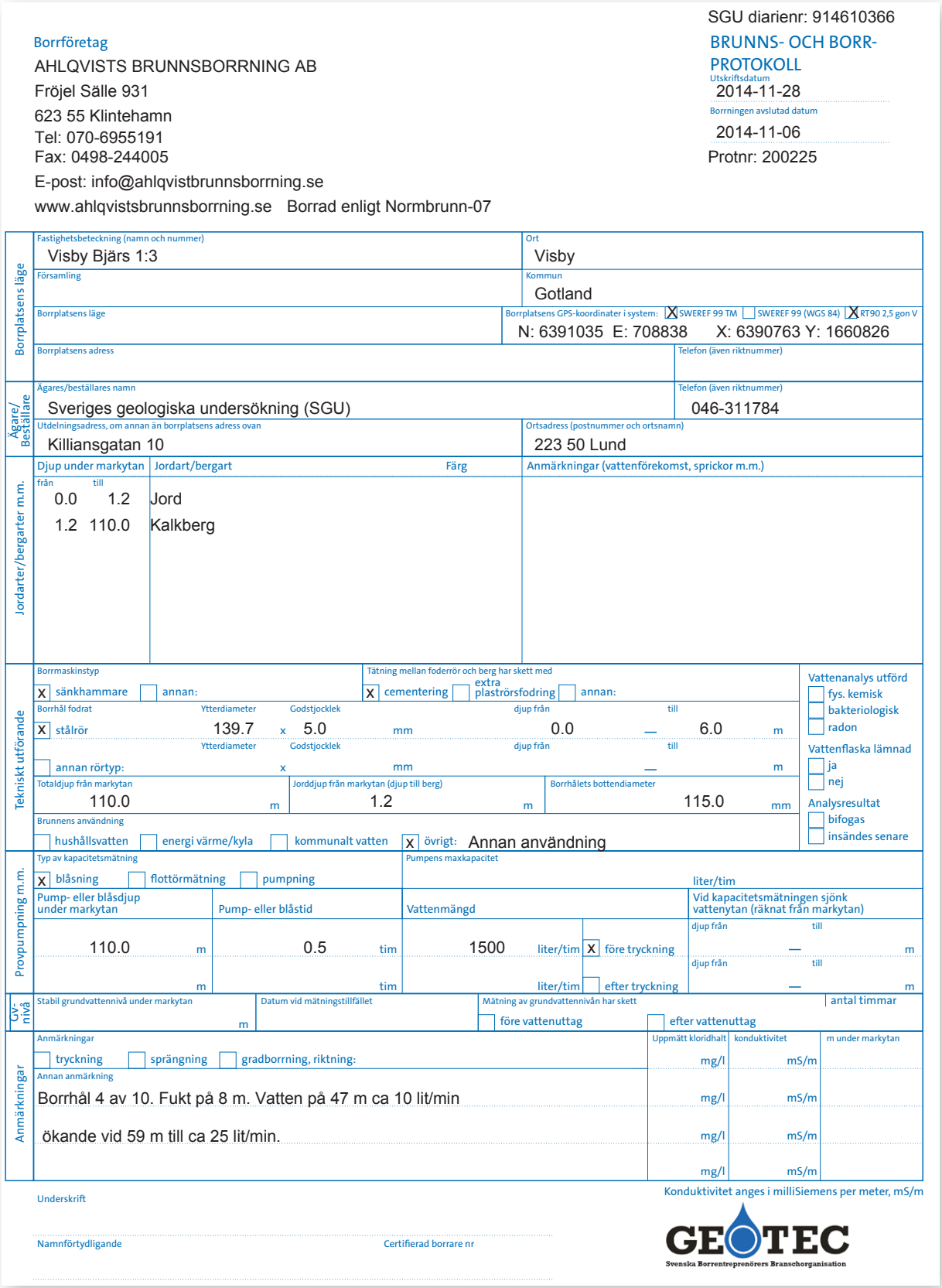
| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift
Namnförtydligande
Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 3. Borrprotokoll från borrhål 3.



SGU diarienr: 914610366

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-06
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**
Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Visby Bjärs 1:3
Ort: Visby
Församling:
Kommun: Gotland
Borrplatsens läge:
Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V
N: 6391035 E: 708838 X: 6390763 Y: 1660826
Borrplatsens adress:
Telefon (även riktnummer):

**Ägare/Beställare**
Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU)
Telefon (även riktnummer): 046-311784
Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10
Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 1.2 | Jord | | |
| 1.2 | 110.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**
Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

Totaldjup från markytan: 110.0 m
Jorddjup från markytan (djup till berg): 1.2 m
Borrhålets bottendiameter: 115.0 mm

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**
Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 110.0 m | 0.5 tim | 1500 liter/tim | [X] före tryckning | djup från — | till m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | djup från — | till m |

**GV-nivå**
Stabil grundvattennivå under markytan: m
Datum vid mätningstillfället:
Mätning av grundvattennivån har skett: [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag
antal timmar

**Anmärkningar**
Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:
Annan anmärkning: Borrhål 4 av 10. Fukt på 8 m. Vatten på 47 m ca 10 lit/min
ökande vid 59 m till ca 25 lit/min.

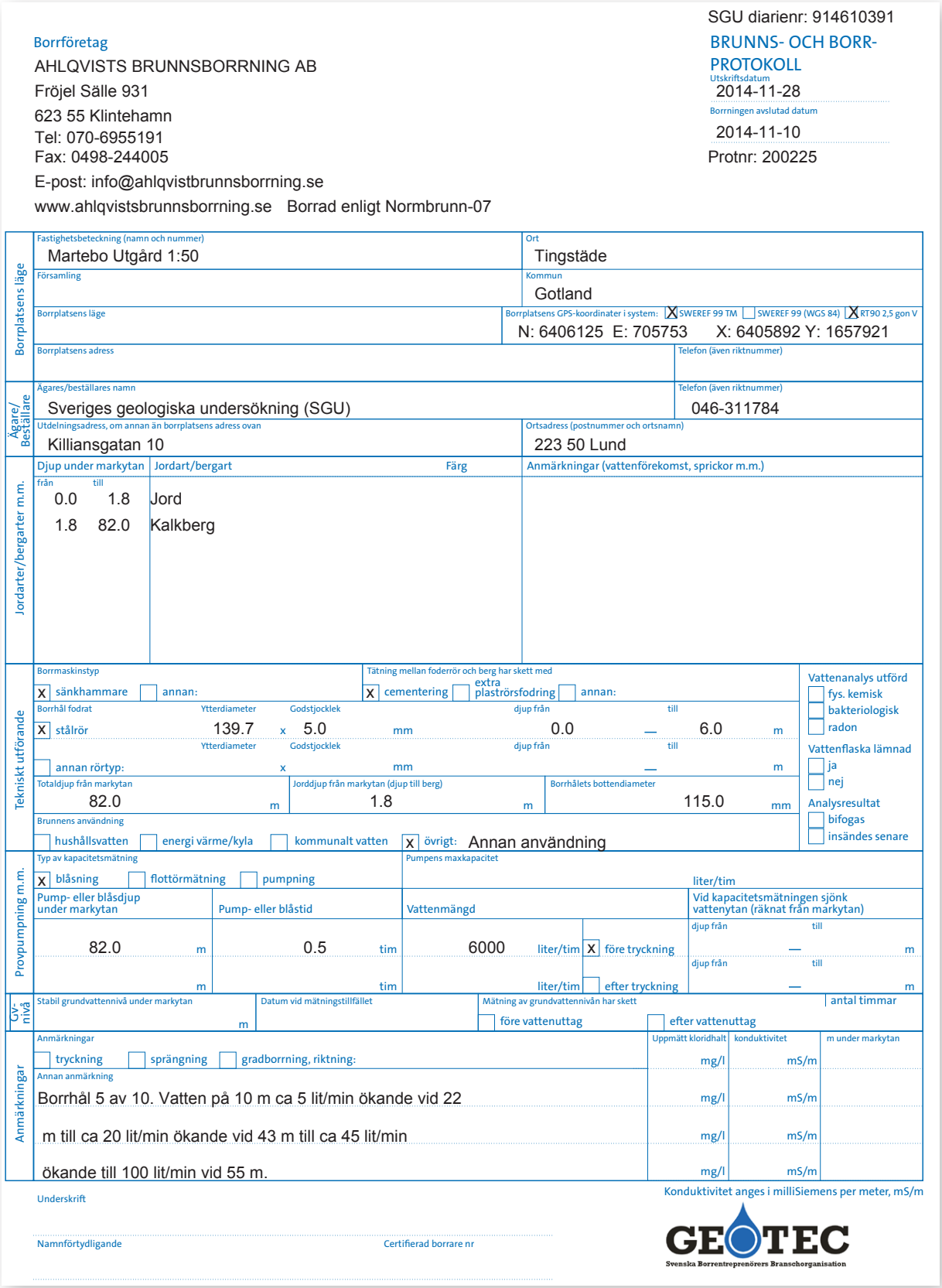
| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift
Namnförtydligande
Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 4. Borrprotokoll från borrhål 4.



SGU diarienr: 914610391

Borrföretag
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL
Utskriftsdatum 2014-11-28
Borrningen avslutad datum 2014-11-10
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**
Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Martebo Utgård 1:50
Ort: Tingstäde
Församling:
Kommun: Gotland
Borrplatsens läge:
Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V
N: 6406125 E: 705753 X: 6405892 Y: 1657921
Borrplatsens adress:
Telefon (även riktnummer):

**Ägare/Beställare**
Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU)
Telefon (även riktnummer): 046-311784
Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10
Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 1.8 | Jord | | |
| 1.8 | 82.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**
Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

Totaldjup från markytan: 82.0 m
Jorddjup från markytan (djup till berg): 1.8 m
Borrhålets bottendiameter: 115.0 mm

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**
Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 82.0 m | 0.5 tim | 6000 liter/tim | [X] före tryckning | djup från — | till m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | djup från — | till m |

**GV-nivå**
Stabil grundvattennivå under markytan: m
Datum vid mätningstillfället:
Mätning av grundvattennivån har skett: [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag antal timmar

**Anmärkningar**
Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:
Annan anmärkning: Borrhål 5 av 10. Vatten på 10 m ca 5 lit/min ökande vid 22 m till ca 20 lit/min ökande vid 43 m till ca 45 lit/min ökande till 100 lit/min vid 55 m.

| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift
Namnförtydligande
Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 5. Borrprotokoll från borrhål 5.

SGU diarienr: 914610402

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-06
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| Fastighetsbeteckning (namn och nummer) | Ort |
|---|---|
| Hejnum Nygårds 2:1 | Tingstäde |
| Församling | Kommun |
| | Gotland |
| Borrplatsens läge | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V |
| | N: 6401729 E: 714709 X: 6401389 Y: 1666825 |
| Borrplatsens adress | Telefon (även riktnummer) |
| | |

**Ägare/Beställare**

| Ägares/beställares namn | Telefon (även riktnummer) |
|---|---|
| Sveriges geologiska undersökning (SGU) | 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan | Ortsadress (postnummer och ortsnamn) |
| Killiansgatan 10 | 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0.1 | Jord | | |
| 0.1 | 130.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 130.0 m | 0.1 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 130.0 m | 0.5 tim | 9000 liter/tim | [X] före tryckning | — | m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | — | m |

**GV-nivå**

| Stabil grundvattennivå under markytan | Datum vid mätningstillfället | Mätning av grundvattennivån har skett | antal timmar |
|---|---|---|---|
| m | | [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag | |

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:

Annan anmärkning:
Borrhål 6 av 10. Sprickor vid 29 m, fukt. Ökande vid 51 m
till ca 50 lit/min ökande vid 66 m till ca 100 lit/min ökande
vid 74 m till ca 150 lit/min.

| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 6. Borrprotokoll från borrhål 6.

SGU diarienr: 914610414

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-07
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| | |
|---|---|
| Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Tingstäde Trägårds 1:15 | Ort: Tingstäde |
| Församling: | Kommun: Gotland |
| Borrplatsens läge: | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V: N: 6402549 E: 713547 X: 6402223 Y: 1665673 |
| Borrplatsens adress: | Telefon (även riktnummer): |

**Ägare/Beställare**

| | |
|---|---|
| Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU) | Telefon (även riktnummer): 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10 | Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 1.1 | Jord | | |
| 1.1 | 115.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 115.0 m | 1.1 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 115.0 m | 0.5 tim | 1200 liter/tim | [X] före tryckning | djup från — | till m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | djup från — | till m |

**GV-nivå**

Stabil grundvattennivå under markytan: m
Datum vid mätningstillfället:
Mätning av grundvattennivån har skett: [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag antal timmar

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:

| Annan anmärkning | Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|---|
| Borrhål 7 av 10. Vatten på 24 m ca 2 lit/min ökande vid 33 | mg/l | mS/m | |
| m till ca 5 lit/min ökande vid 87 m till ca 20 lit/min, salt. | mg/l | mS/m | |
| | mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 7. Borrprotokoll från borrhål 7.

SGU diarienr: 914610426

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-15
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| Fastighetsbeteckning (namn och nummer) | Ort |
|---|---|
| Fårö Hammars 1:10 | Fårö |
| Församling: Fårö | Kommun: Gotland |
| Borrplatsens läge | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V: N: 6432005 E: 754322 X: 6431195 Y: 1706803 |
| Borrplatsens adress | Telefon (även riktnummer) |

**Ägare/Beställare**

| Ägares/beställares namn | Telefon (även riktnummer) |
|---|---|
| Sveriges geologiska undersökning (SGU) | 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10 | Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0.1 | Jord | | |
| 0.1 | 1.8 | Sand | | |
| 1.8 | 2.8 | Grus | | |
| 2.8 | 81.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 81.0 m | 0.1 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 81.0 m | 0.5 tim | 12000 liter/tim | [X] före tryckning | djup från — till | m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | djup från — till | m |

**GV-nivå**

| Stabil grundvattennivå under markytan | Datum vid mätningstillfället | Mätning av grundvattennivån har skett | antal timmar |
|---|---|---|---|
| m | | [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag | |

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:

Annan anmärkning: Borrhål 8 av 10. Vatten på 4 m ca 5 lit/min ökande vid 38 m till ca 80 lit/min ökande vid 51 m till ca 200 lit/min, salt!

| Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |
| mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 8. Borrprotokoll från borrhål 8.

SGU diarienr: 914610436

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-14
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| Fastighetsbeteckning (namn och nummer) | Ort |
|---|---|
| Fårö Hammars 1:35 | Fårö |
| Församling: Fårö | Kommun: Gotland |
| Borrplatsens läge | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V |
| | N: 6423489 E: 745445 X: 6422784 Y: 1697824 |
| Borrplatsens adress | Telefon (även riktnummer) |

**Ägare/Beställare**

| Ägares/beställares namn | Telefon (även riktnummer) |
|---|---|
| Sveriges geologiska undersökning (SGU) | 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10 | Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0.1 | Jord | | |
| 0.1 | 90.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 90.0 m | 0.1 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från — till |
|---|---|---|---|---|
| 90.0 m | 0.5 tim | 15000 liter/tim | [X] före tryckning | m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | m |

**GV-nivå**

| Stabil grundvattennivå under markytan | Datum vid mätningstillfället | Mätning av grundvattennivån har skett | antal timmar |
|---|---|---|---|
| m | | [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag | |

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:

| Annan anmärkning | Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|---|
| Borrhål 9 av 10. Vatten på 18 m ca 1 lit/min ökande vid 23 | mg/l | mS/m | |
| m till ca 50 lit/min, salt och ökande vid 71 m till ca 250 | mg/l | mS/m | |
| lit/min. | mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

Figur 9. Borrprotokoll från borrhål 9.

SGU diarienr: 914610468

**Borrföretag**
AHLQVISTS BRUNNSBORRNING AB
Fröjel Sälle 931
623 55 Klintehamn
Tel: 070-6955191
Fax: 0498-244005
E-post: info@ahlqvistbrunnsborrning.se
www.ahlqvistsbrunnsborrning.se Borrad enligt Normbrunn-07

**BRUNNS- OCH BORR-PROTOKOLL**
Utskriftsdatum: 2014-11-28
Borrningen avslutad datum: 2014-11-15
Protnr: 200225

**Borrplatsens läge**

| | |
|---|---|
| Fastighetsbeteckning (namn och nummer): Fårö Lansa 7:1 | Ort: Fårö |
| Församling: Fårö | Kommun: Gotland |
| Borrplatsens läge | Borrplatsens GPS-koordinater i system: [X] SWEREF 99 TM [ ] SWEREF 99 (WGS 84) [X] RT90 2,5 gon V: N: 6425313 E: 740785 X: 6424664 Y: 1693185 |
| Borrplatsens adress | Telefon (även riktnummer) |

**Ägare/Beställare**

| | |
|---|---|
| Ägares/beställares namn: Sveriges geologiska undersökning (SGU) | Telefon (även riktnummer): 046-311784 |
| Utdelningsadress, om annan än borrplatsens adress ovan: Killiansgatan 10 | Ortsadress (postnummer och ortsnamn): 223 50 Lund |

**Jordarter/bergarter m.m.**

| Djup under markytan från | till | Jordart/bergart | Färg | Anmärkningar (vattenförekomst, sprickor m.m.) |
|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 0.1 | Jord | | |
| 0.1 | 105.0 | Kalkberg | | |

**Tekniskt utförande**

Borrmaskinstyp: [X] sänkhammare [ ] annan:
Tätning mellan foderrör och berg har skett med: [X] cementering [ ] extra plaströrsfodring [ ] annan:

| Borrhål fodrat | Ytterdiameter | | Godstjocklek | | djup från | | till | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [X] stålrör | 139.7 | x | 5.0 | mm | 0.0 | — | 6.0 | m |
| [ ] annan rörtyp: | Ytterdiameter | x | Godstjocklek | mm | djup från | — | till | m |

| Totaldjup från markytan | Jorddjup från markytan (djup till berg) | Borrhålets bottendiameter |
|---|---|---|
| 105.0 m | 0.1 m | 115.0 mm |

Brunnens användning: [ ] hushållsvatten [ ] energi värme/kyla [ ] kommunalt vatten [X] övrigt: Annan användning

Vattenanalys utförd: [ ] fys. kemisk [ ] bakteriologisk [ ] radon
Vattenflaska lämnad: [ ] ja [ ] nej
Analysresultat: [ ] bifogas [ ] insändes senare

**Provpumpning m.m.**

Typ av kapacitetsmätning: [X] blåsning [ ] flottörmätning [ ] pumpning
Pumpens maxkapacitet: liter/tim

| Pump- eller blåsdjup under markytan | Pump- eller blåstid | Vattenmängd | | Vid kapacitetsmätningen sjönk vattenytan (räknat från markytan) djup från | till |
|---|---|---|---|---|---|
| 105.0 m | 0.5 tim | 6000 liter/tim | [X] före tryckning | djup från — | till m |
| m | tim | liter/tim | [ ] efter tryckning | djup från — | till m |

**GV-nivå**

| Stabil grundvattennivå under markytan | Datum vid mätningstillfället | Mätning av grundvattennivån har skett | antal timmar |
|---|---|---|---|
| m | | [ ] före vattenuttag [ ] efter vattenuttag | |

**Anmärkningar**

Anmärkningar: [ ] tryckning [ ] sprängning [ ] gradborrning, riktning:

| Annan anmärkning | Uppmätt kloridhalt | konduktivitet | m under markytan |
|---|---|---|---|
| Borrhål 10 av 10. Vatten på 15 m ca 0,5 lit/min ökande vid | mg/l | mS/m | |
| 25 m till ca 1 lit/min ökande vid 54 m till ca 100 lit/min, | mg/l | mS/m | |
| mycket salt. | mg/l | mS/m | |

Konduktivitet anges i milliSiemens per meter, mS/m

Underskrift

Namnförtydligande

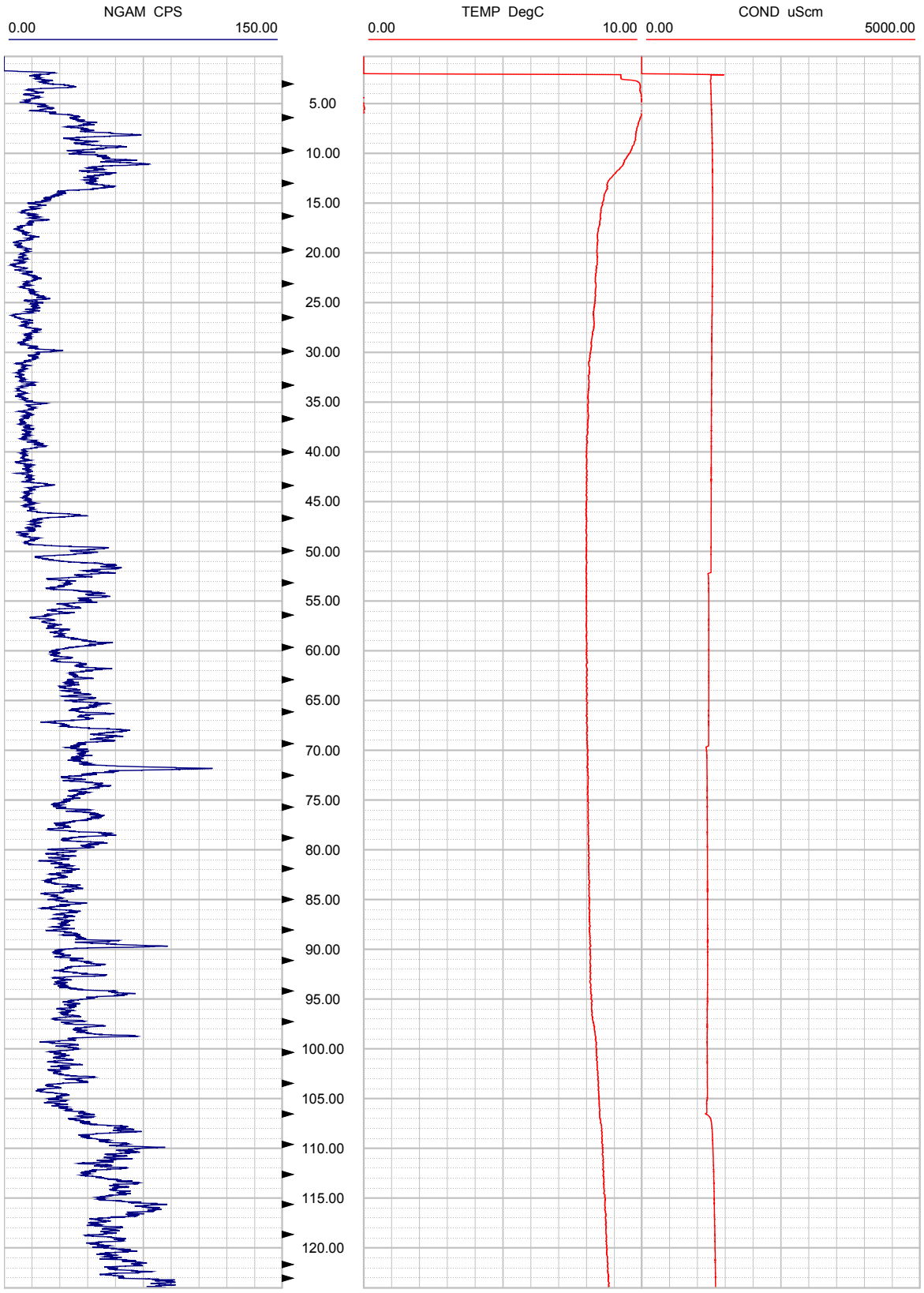
Certifierad borrare nr

GEOTEC
Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation

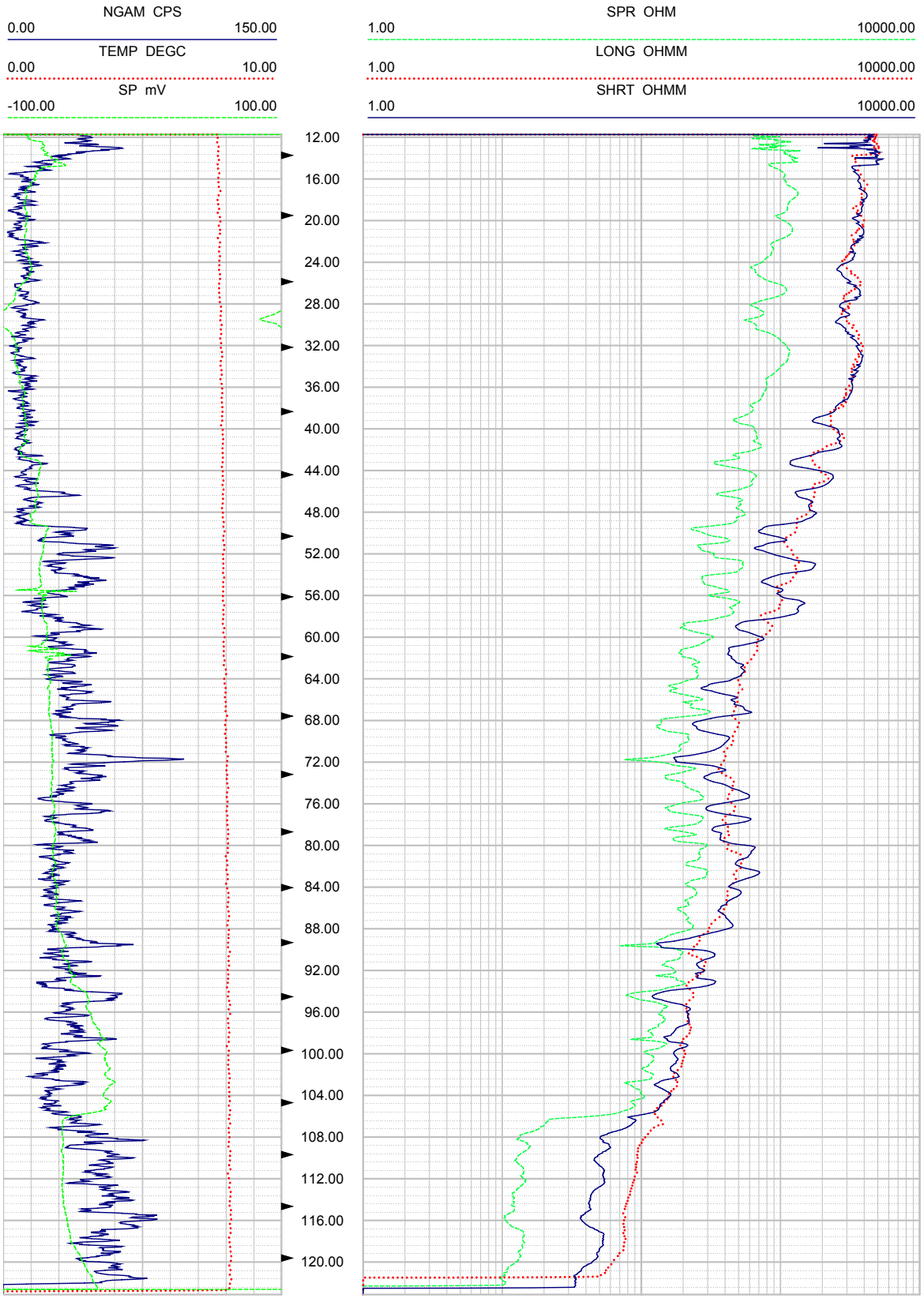
Figur 10. Borrprotokoll från borrhål 10.

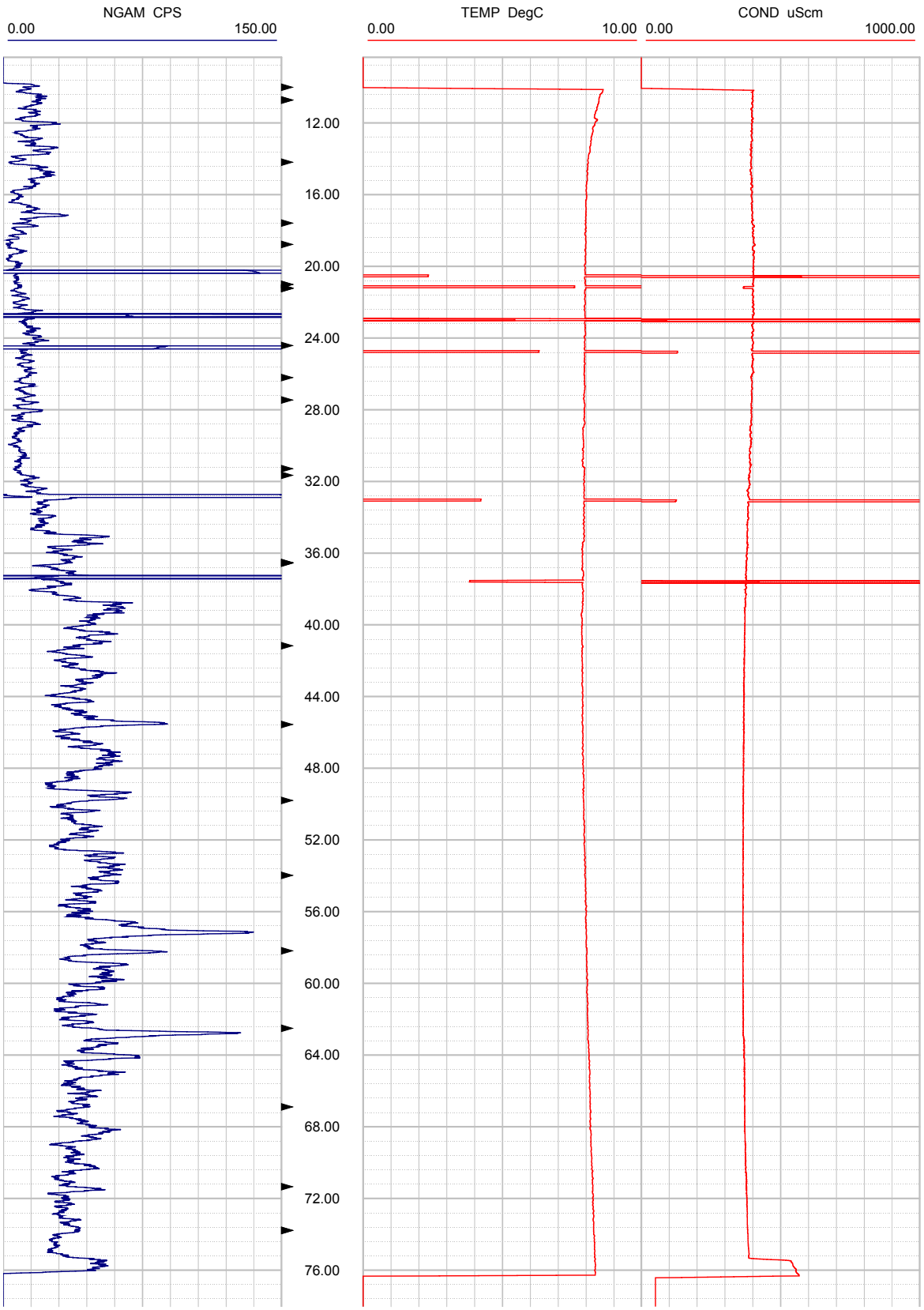
# Bilaga 4. Data från borrhålsloggning

I bilaga 4 presenteras data från borrhålsloggningen för respektive borrhål. Mer information om metodik, tolkningar etc. finns i rapportform (Alm 2014).

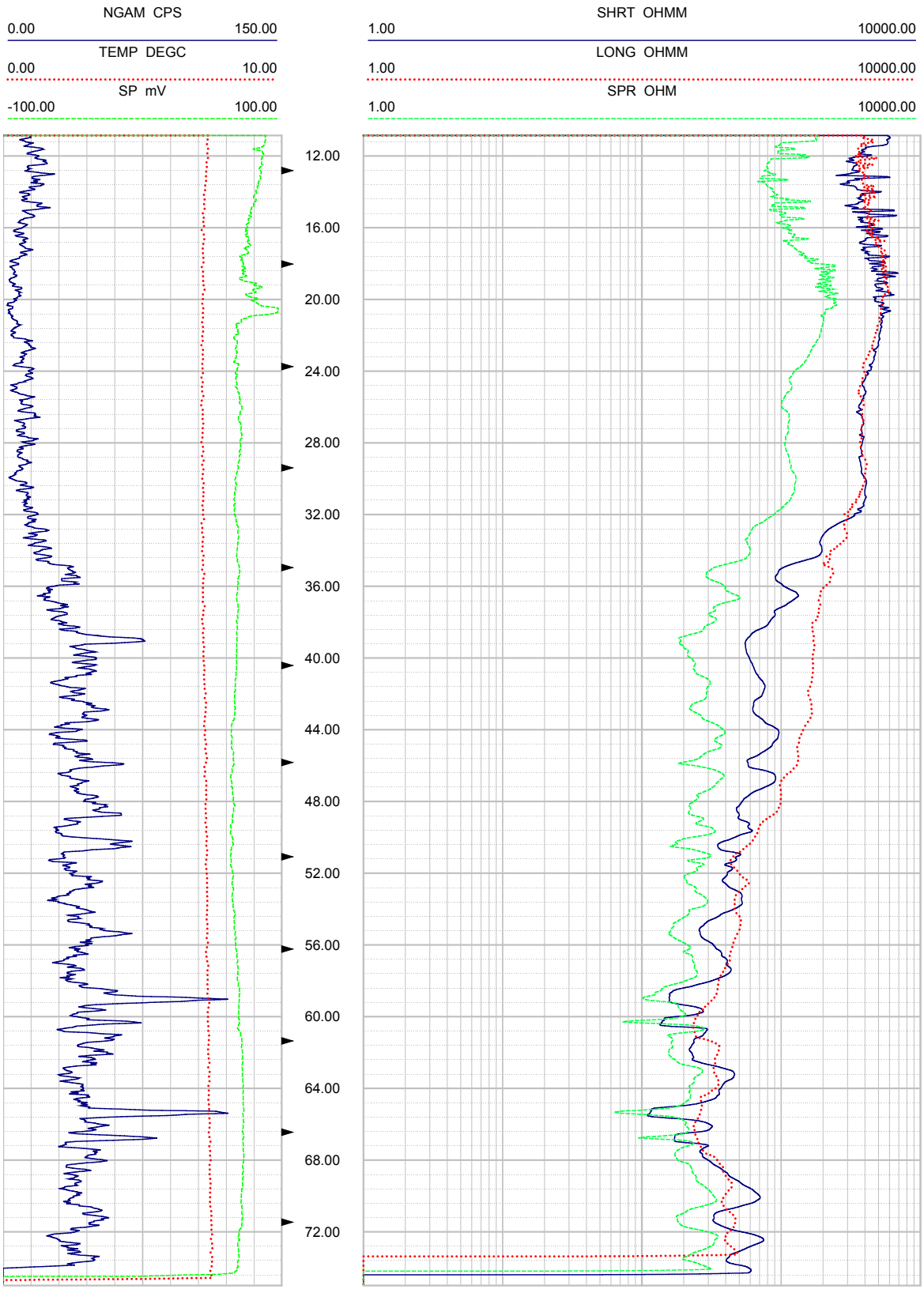


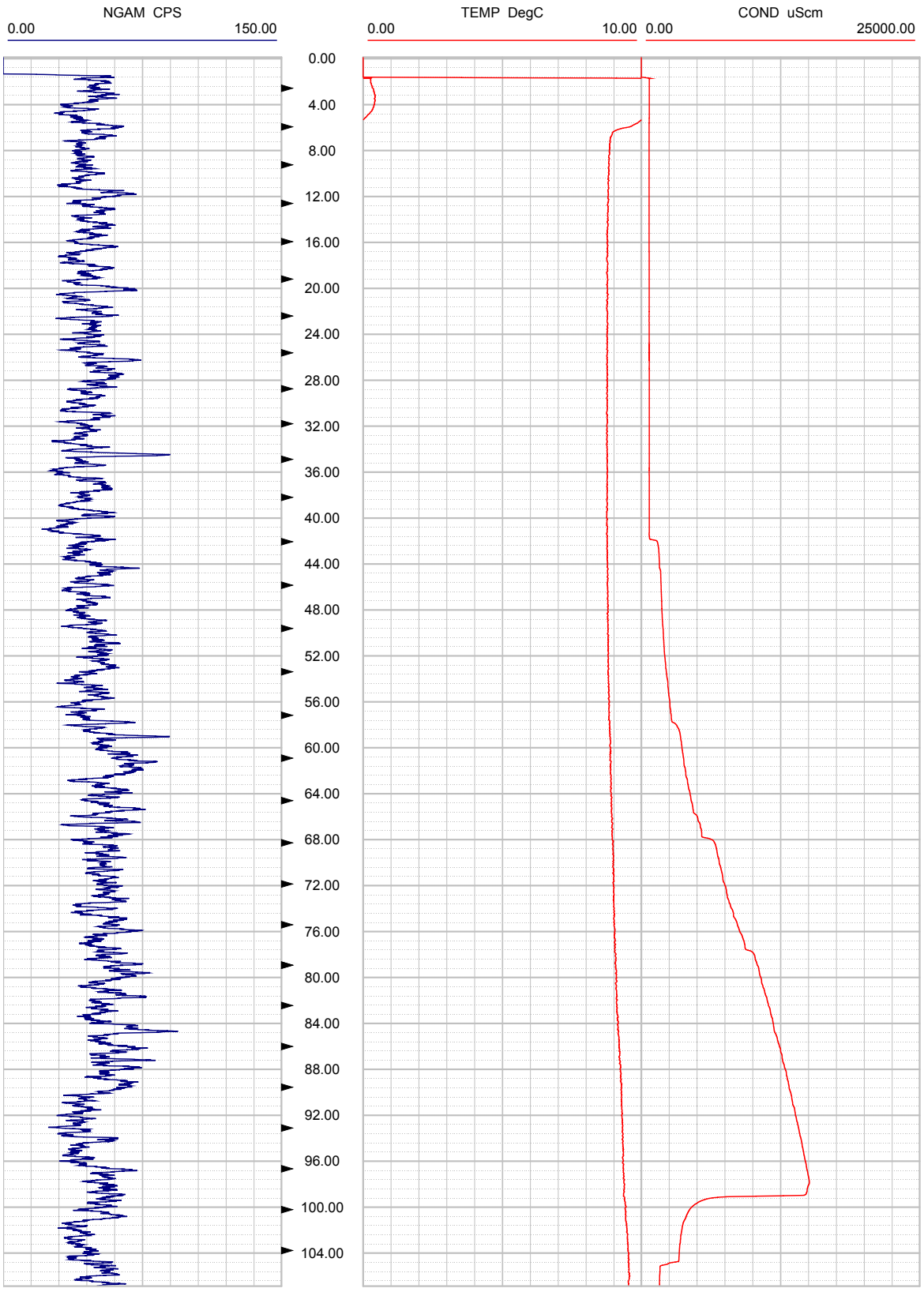

Figur 1. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 1, t.v. E-logg från borrhål 1, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SPR OHM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
12.00
16.00
20.00
24.00
28.00
32.00
36.00
40.00
44.00
48.00
52.00
56.00
60.00
64.00
68.00
72.00
76.00
80.00
84.00
88.00
92.00
96.00
100.00
104.00
108.00
112.00
116.00
120.00

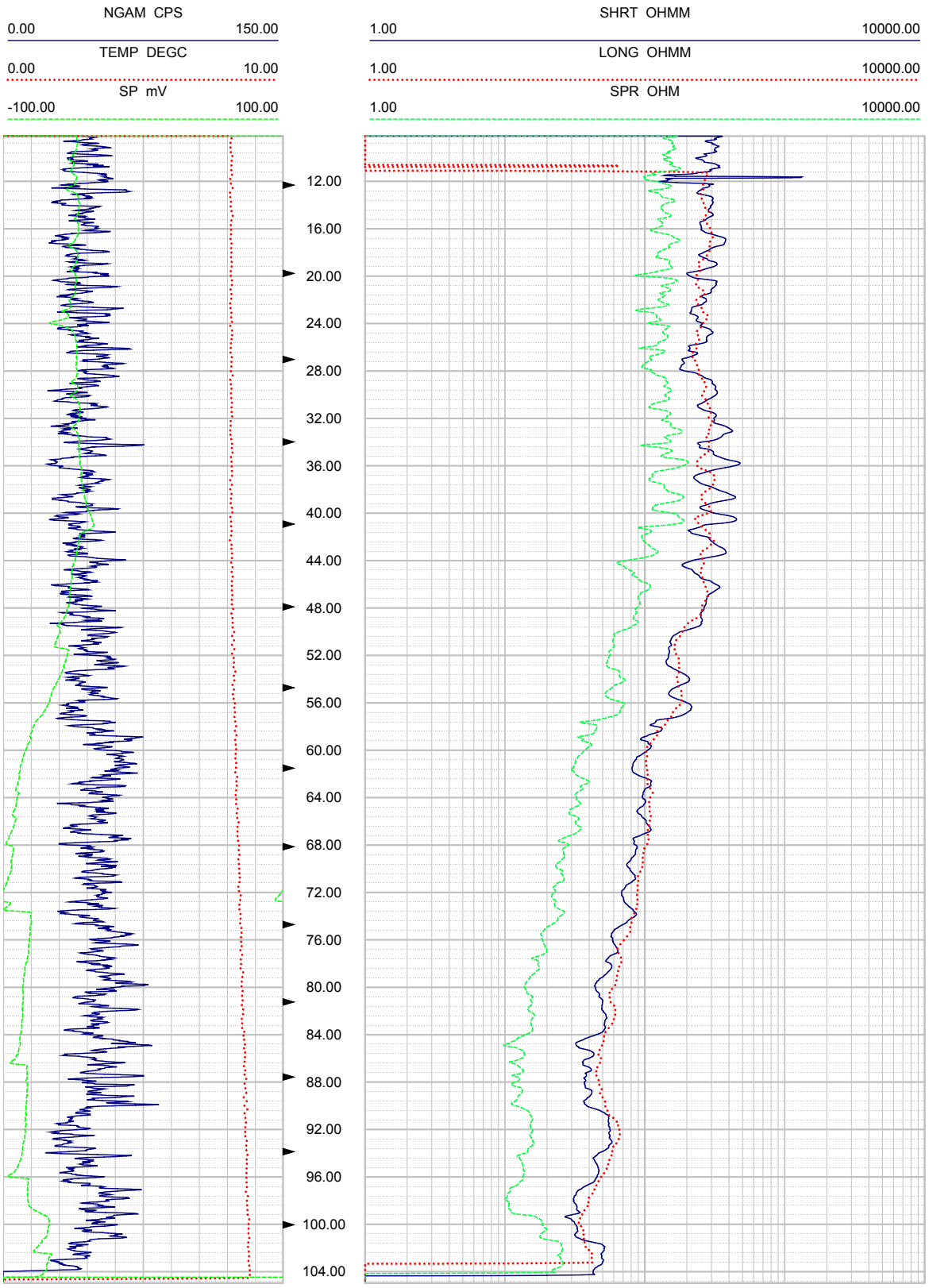


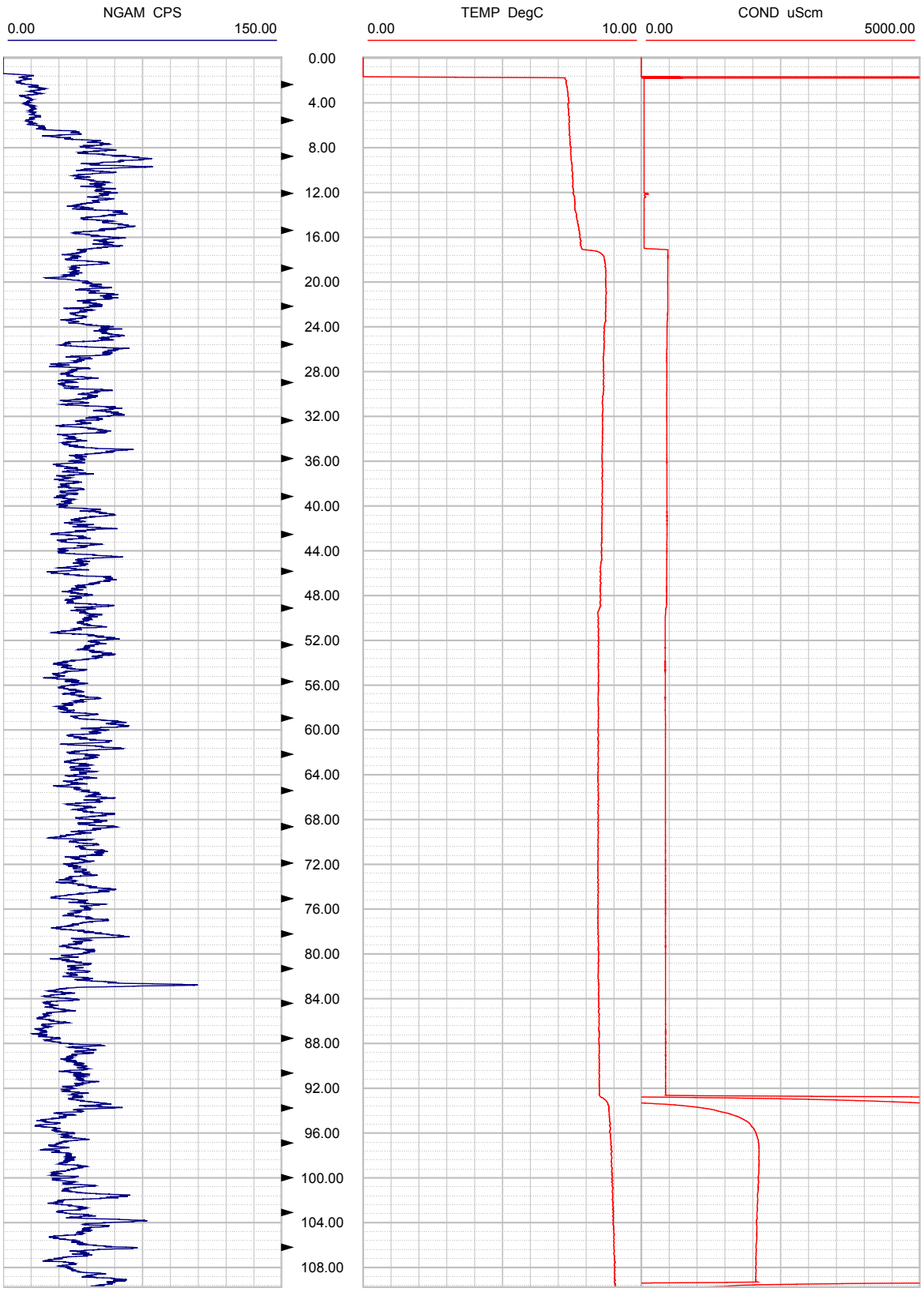

Figur 2. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 2, t.v. E-logg från borrhål 2, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SPR OHM
1.00
10000.00
12.00
16.00
20.00
24.00
28.00
32.00
36.00
40.00
44.00
48.00
52.00
56.00
60.00
64.00
68.00
72.00

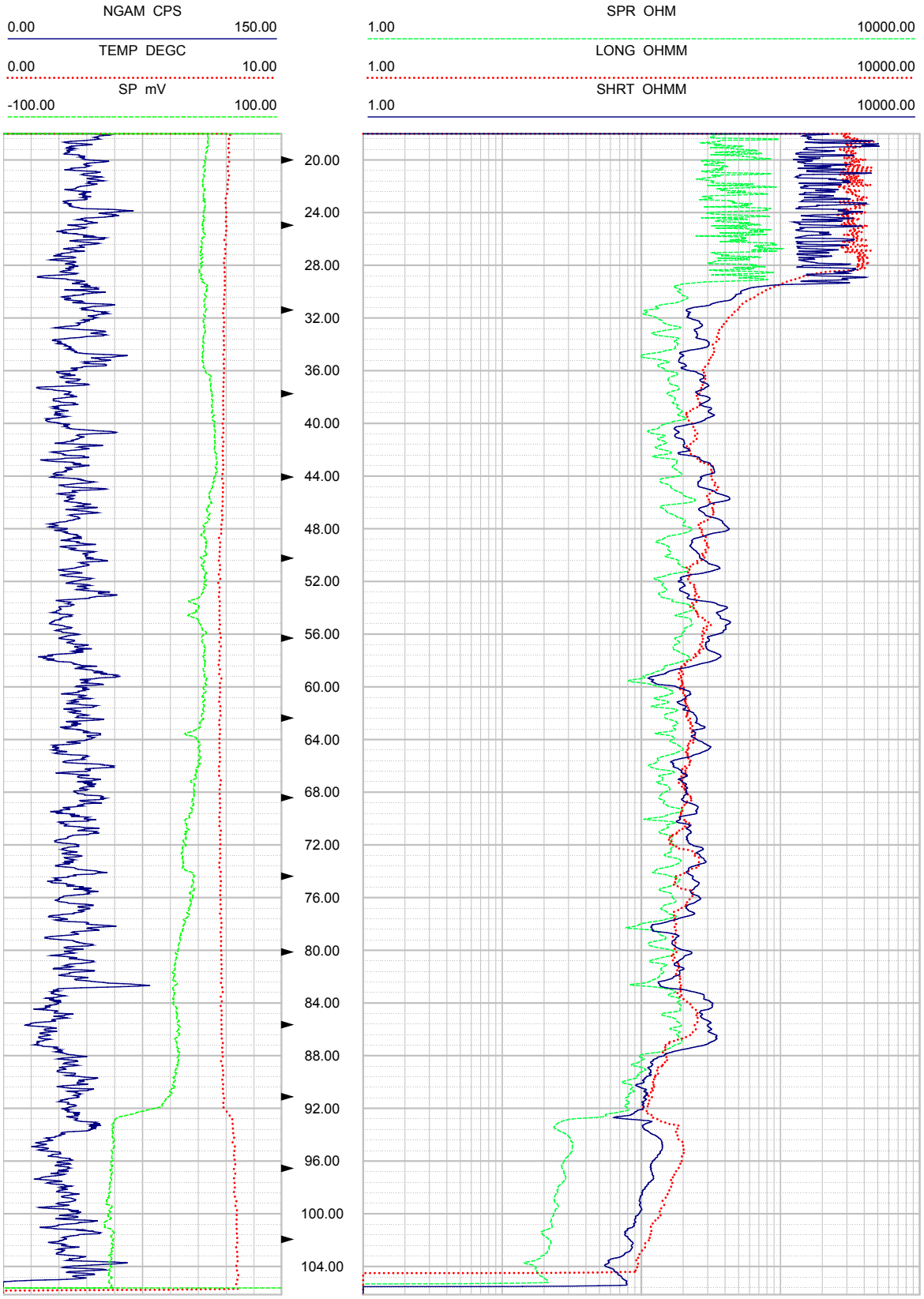


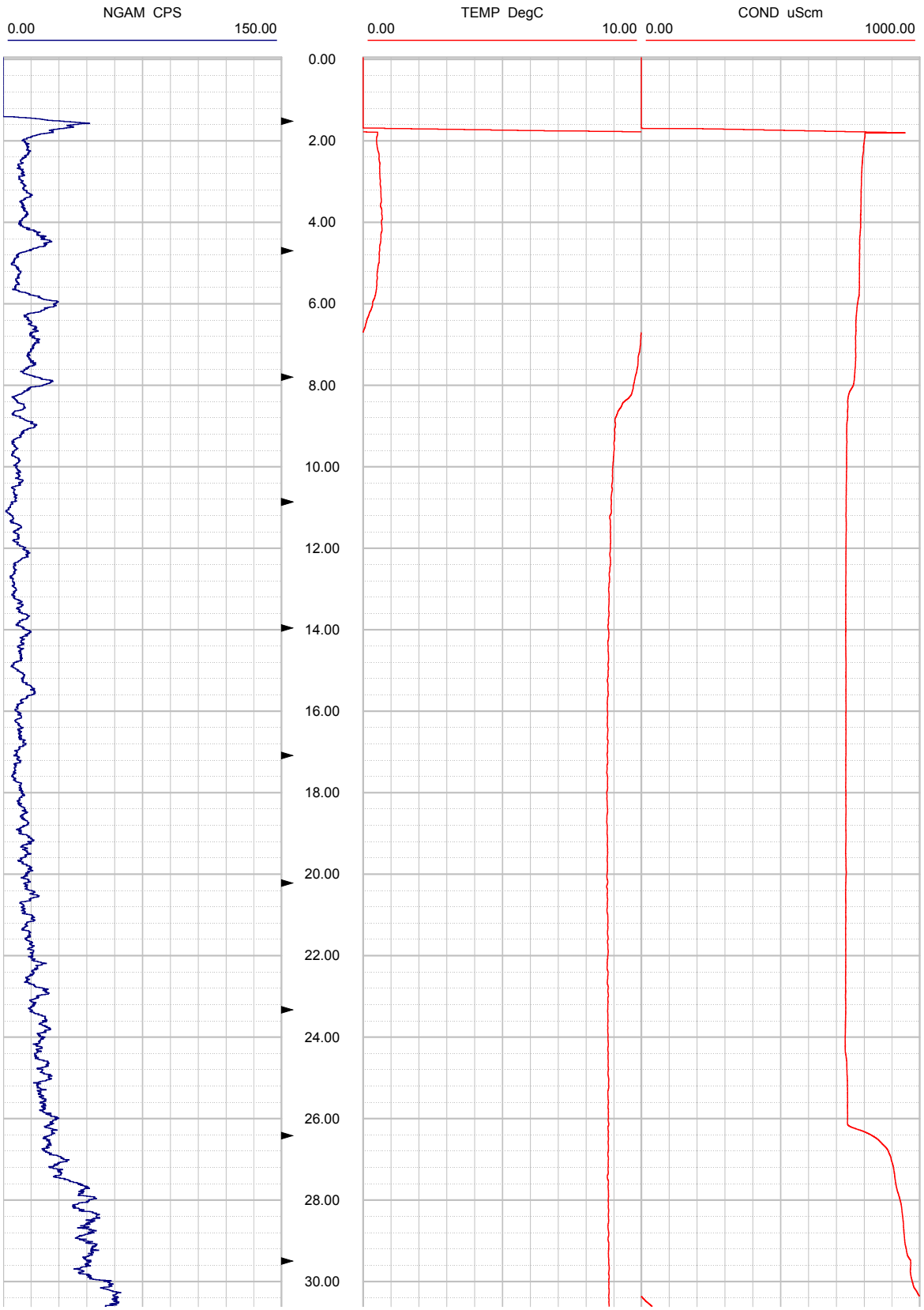

Figur 3. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 3, t.v. E-logg från borrhål 3, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SPR OHM
1.00
10000.00
12.00
16.00
20.00
24.00
28.00
32.00
36.00
40.00
44.00
48.00
52.00
56.00
60.00
64.00
68.00
72.00
76.00
80.00
84.00
88.00
92.00
96.00
100.00
104.00

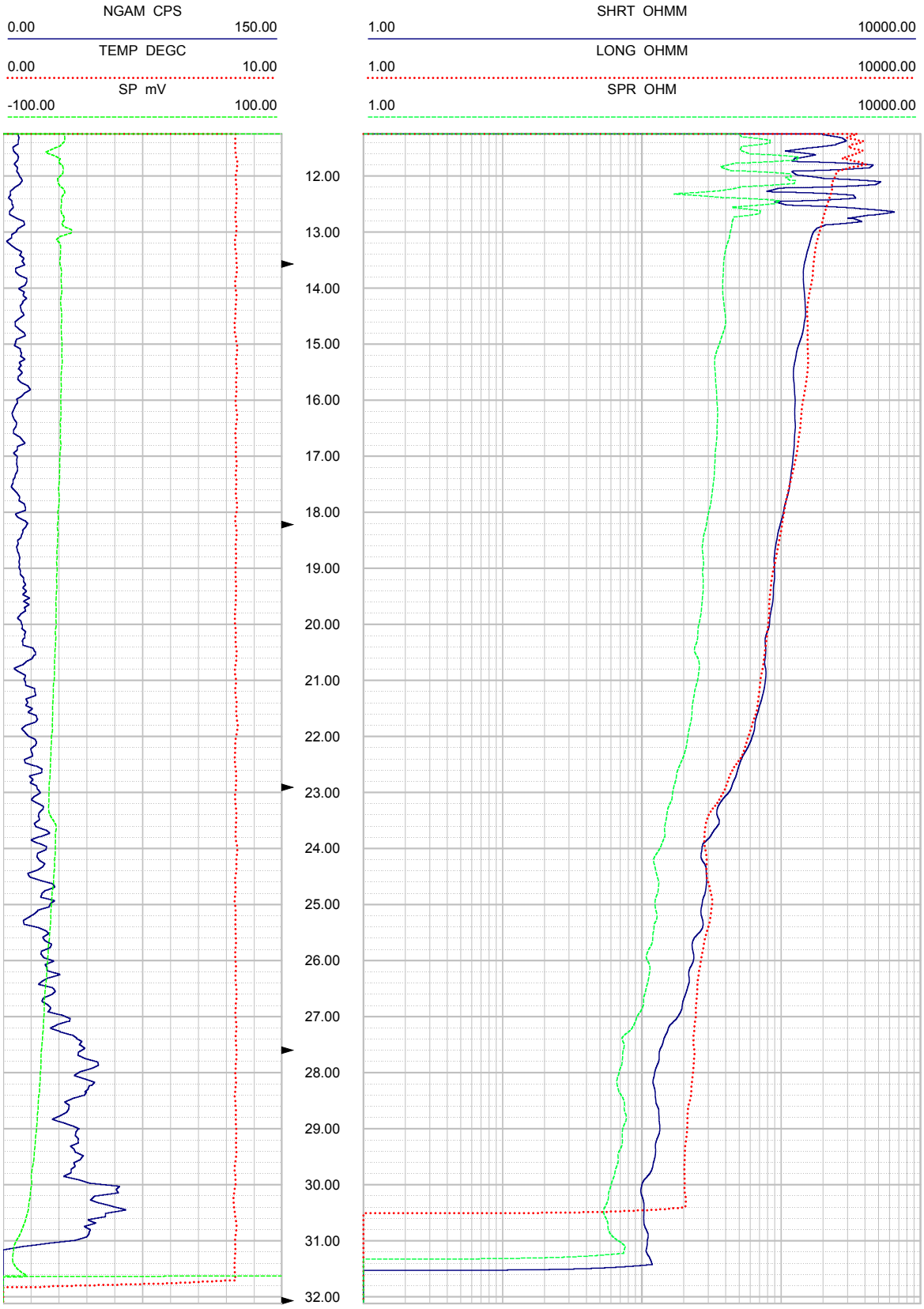


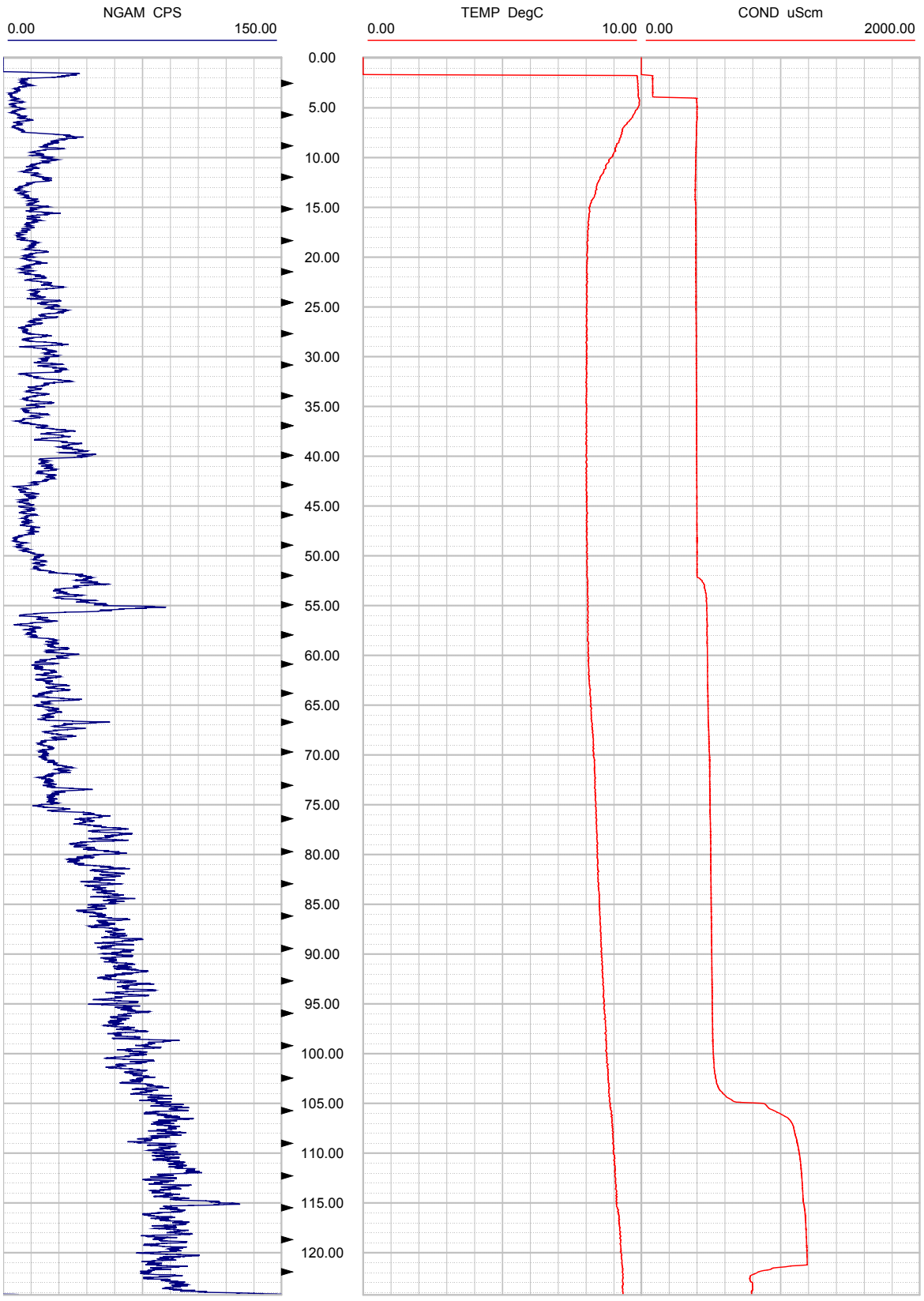

Figur 4. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 4, t.v. E-logg från borrhål 4, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SPR OHM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
20.00
24.00
28.00
32.00
36.00
40.00
44.00
48.00
52.00
56.00
60.00
64.00
68.00
72.00
76.00
80.00
84.00
88.00
92.00
96.00
100.00
104.00

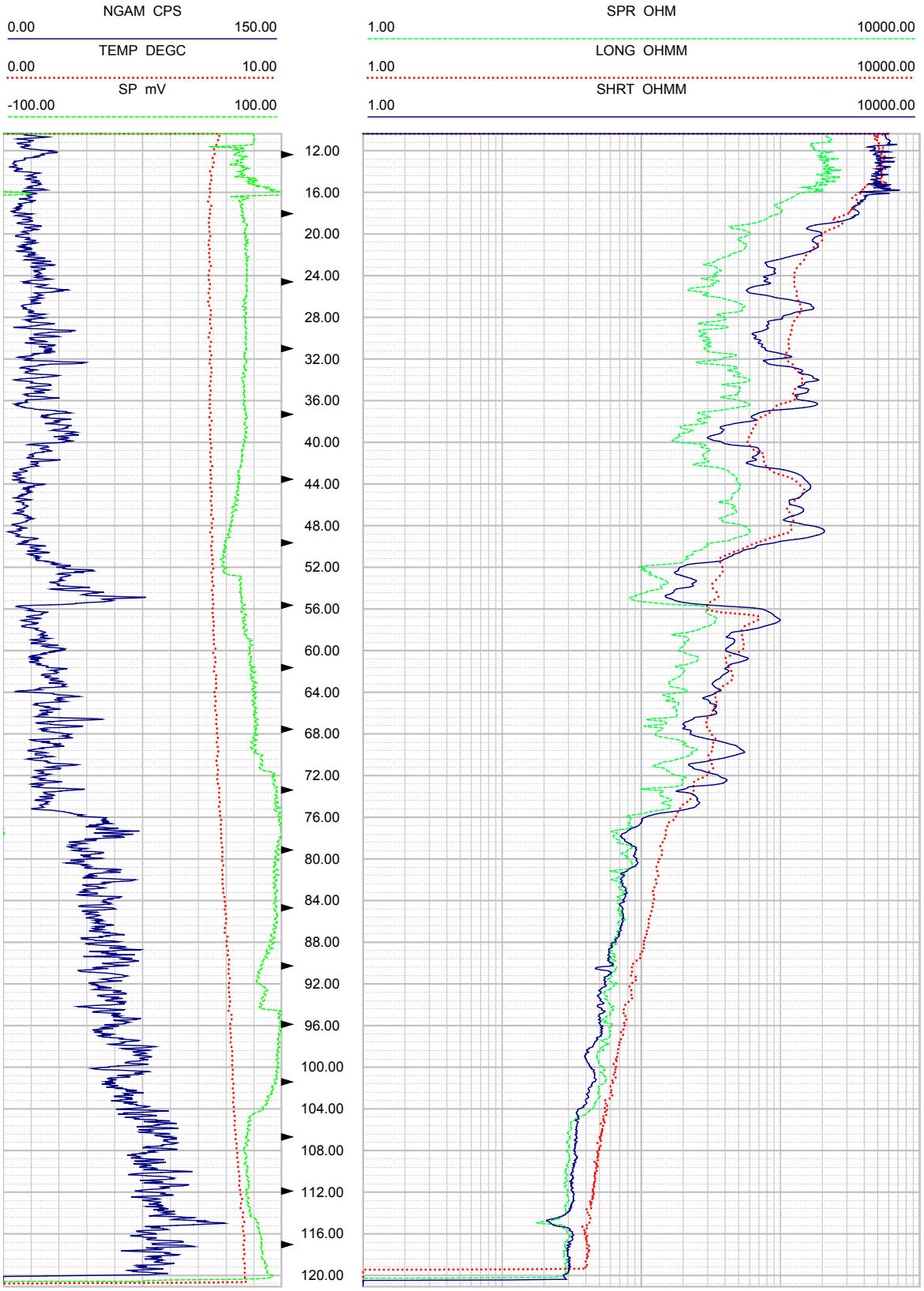


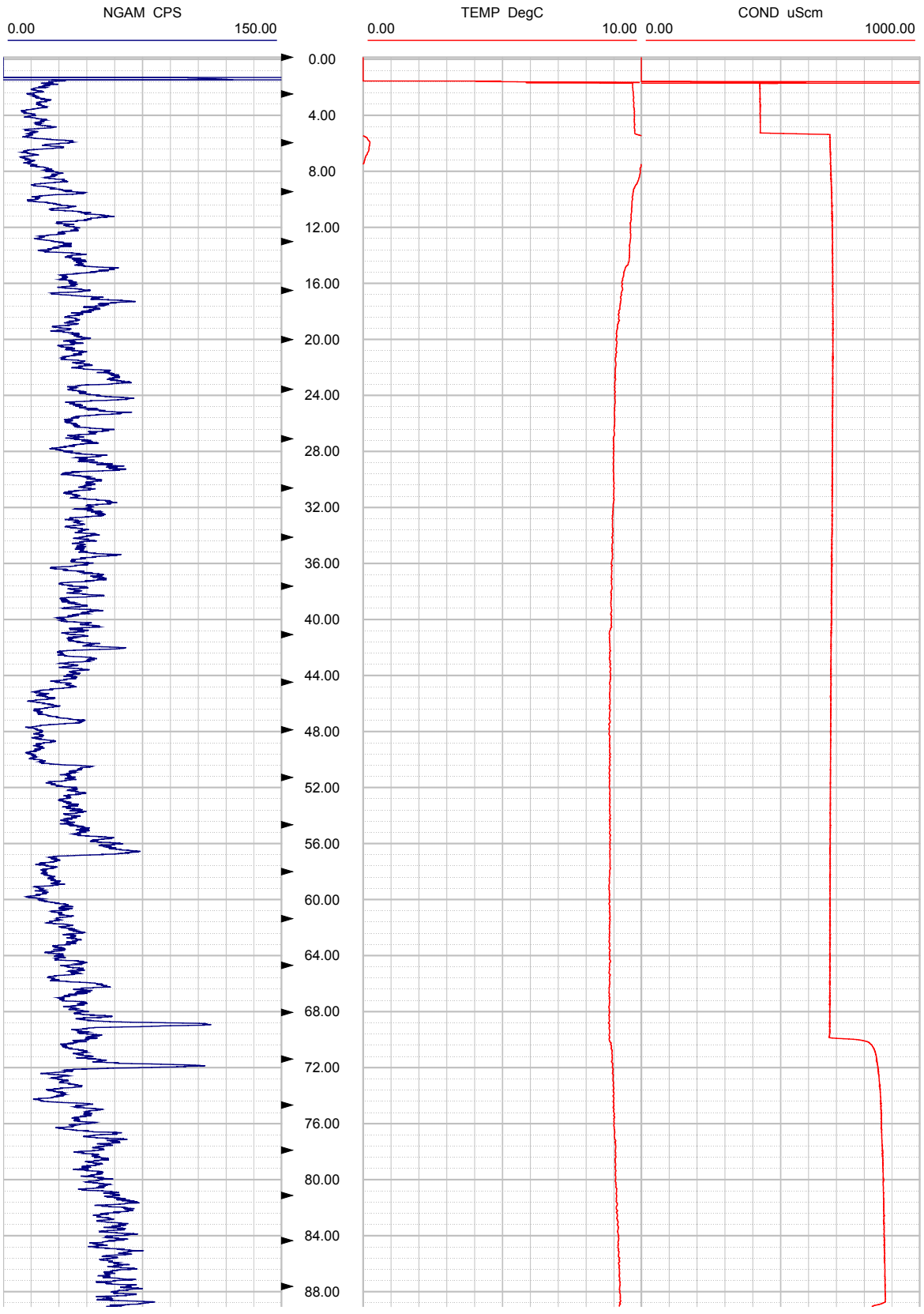

Figur 5. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 5, t.v. E-logg från borrhål 5, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SPR OHM
1.00
10000.00
12.00
13.00
14.00
15.00
16.00
17.00
18.00
19.00
20.00
21.00
22.00
23.00
24.00
25.00
26.00
27.00
28.00
29.00
30.00
31.00
32.00

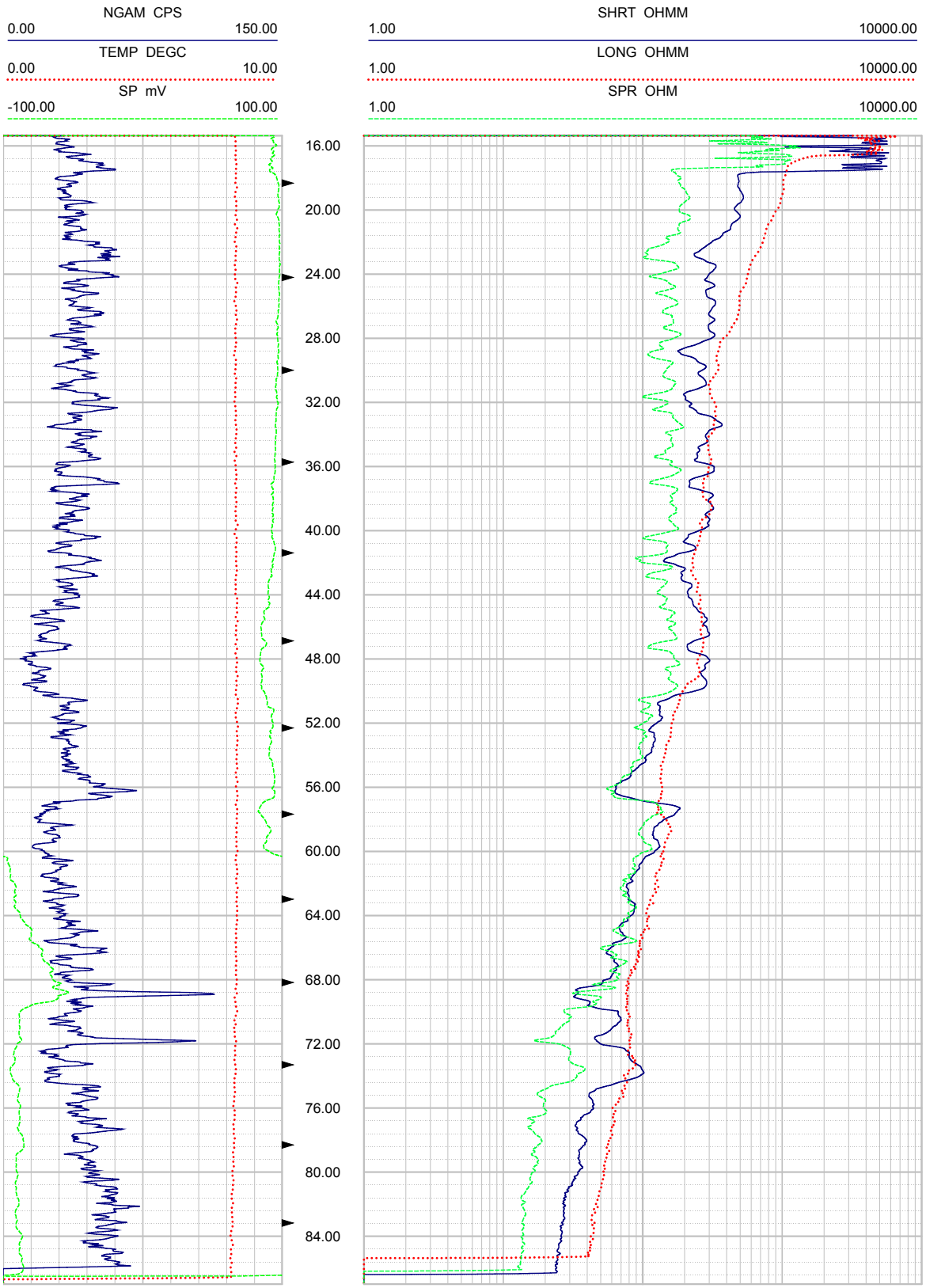



Figur 6. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 6, t.v. E-logg från borrhål 6, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SPR OHM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
12.00
16.00
20.00
24.00
28.00
32.00
36.00
40.00
44.00
48.00
52.00
56.00
60.00
64.00
68.00
72.00
76.00
80.00
84.00
88.00
92.00
96.00
100.00
104.00
108.00
112.00
116.00
120.00




Figur 7. Fluid, temperature & conductivity log från borrhål 9, t.v. E-logg från borrhål 9, t.h.


NGAM CPS
0.00
150.00
TEMP DEGC
0.00
10.00
SP mV
-100.00
100.00
SHRT OHMM
1.00
10000.00
LONG OHMM
1.00
10000.00
SPR OHM
1.00
10000.00
16.00
20.00
24.00
28.00
32.00
36.00
40.00
44.00
48.00
52.00
56.00
60.00
64.00
68.00
72.00
76.00
80.00
84.00

# Bilaga 5. 3D-modeller

I avsnittet Metodik beskrivs hypotesen bakom valet av tröskelvärdet 40 Ωm för den resistivitet som kan indikera att berggrunden innehåller salt grundvatten. Tröskelvärdet bygger på flera antaganden och får betraktas som ungefärligt och något osäkert mot bakgrund av att flera olika faktorer bestämmer dess värde.

I denna bilaga redovisas isoresistivitetsytorna för 40 Ωm för de fyra undersökningsområdena. Kartorna ska tolkas så att resistiviteten är lägre än 40 Ωm i berggrunden som ligger under isoresistivitetsytan. Djupangivelserna är i meter över havet. Inom varje undersökningsområde är isoresistivitetsytan sammanhängande över mer eller mindre hela området. Eventuella mindre utbredda isoresistivitetsytor som ligger grunt är utelämnade eftersom de inte ansetts indikera saltvattenytan. Sådana isolerade ytor torde snarare indikera lokala lågresistiva geologiska enheter kopplade till förekomster av exempelvis märgel.

Isoresistivitetsytorna för 40 Ωm visas i 3D-figurer med färgskala. Lägg märke till att skalan är olika i de olika figurerna. Isoresistivitetsytornas morfologi kommenteras också kort. Det är viktigt att tänka på att även om ytorna presenteras som heltäckande i figurerna nedan så innehåller de luckor i originaldata till följd av störningar från bebyggelse, installationer av olika slag etc. I några fall är det också möjligt att se linjära strukturer i ytorna som eventuellt kan vara tecken på störningar i data.

Förutom de figurer som redovisas i denna bilaga finns också ytorna inlagda i pdf-filer som går att rotera i tre dimensioner. Sådana kan erhållas efter kontakt med SGUs kundtjänst.

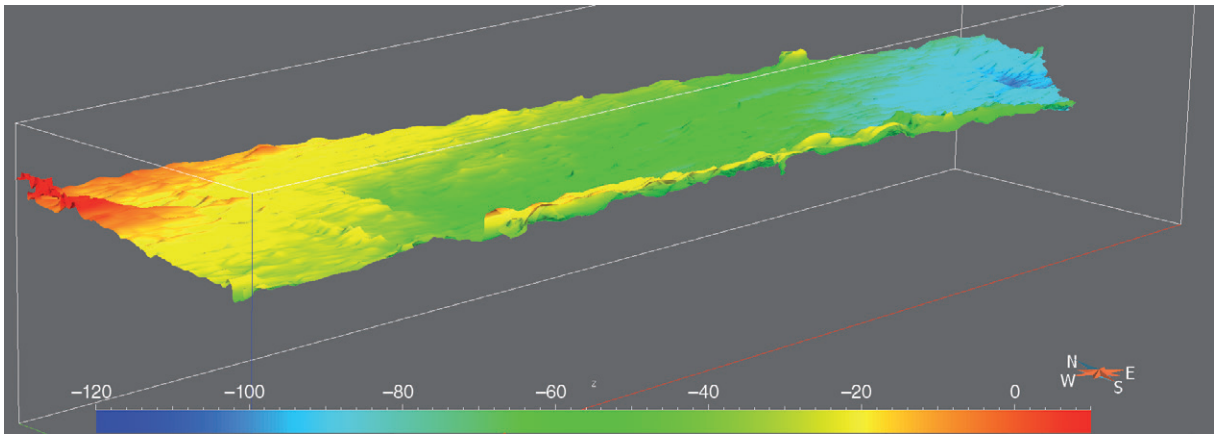
## OMRÅDE 1

Isoresistivitetsytan för 40 Ωm ligger grundare i den västra delen än i den östra delen av området (fig. 1). Det återspeglar terrängen där de östra delarna ligger betydligt högre än de västra och där de senare är kustnära.

I väster ligger isoresistivitetsytan omkring 0–5 m ö.h. I öster ligger den omkring –100 m ö.h. vilket motsvarar ett djup på ca 150 m under markytan som mest. Ytan är relativt jämn med några enstaka, subtila, linjära strukturer. I östra delen finns en relativt linjär struktur som stryker ungefär nord–syd. Öster om strukturen stiger isoresistivitetsytan något. Strukturen är svår att visa i en figur.

## OMRÅDE 2

Isoresistivitetsytan för 40 Ωm ligger vid havsnivå (0 m ö.h.) i de västra delarna, för att därefter sjunka österut där den mestadels ligger inom spannet –40 till –80 m ö.h. (fig. 2). Den markanta gräns som syns mellan det röda området i väst och det grönblå området i öst överdrivs av att bergartsleden skiljer sig åt mellan områdena. Det röda området domineras av en relativt ren kalksten (erosionstålig) och högländ terräng, medan det östra området domineras av märgel (erosionskänslig) och lägre terräng. I område 2 är isoresistivitetsytan för 40 Ωm oregelbunden. Den saknar den relativt konstanta nivå som kan ses i område 1. Orsakerna kan vara flera. En möjlighet är att bergartsleden inom område 2 inte är lika homogena som inom område 1. Inslaget av störningar från olika installationer kan också vara större i område 2 beroende på att bebyggelsen är mer utvecklad här. Exempelvis är den linjära upphöjning som går i

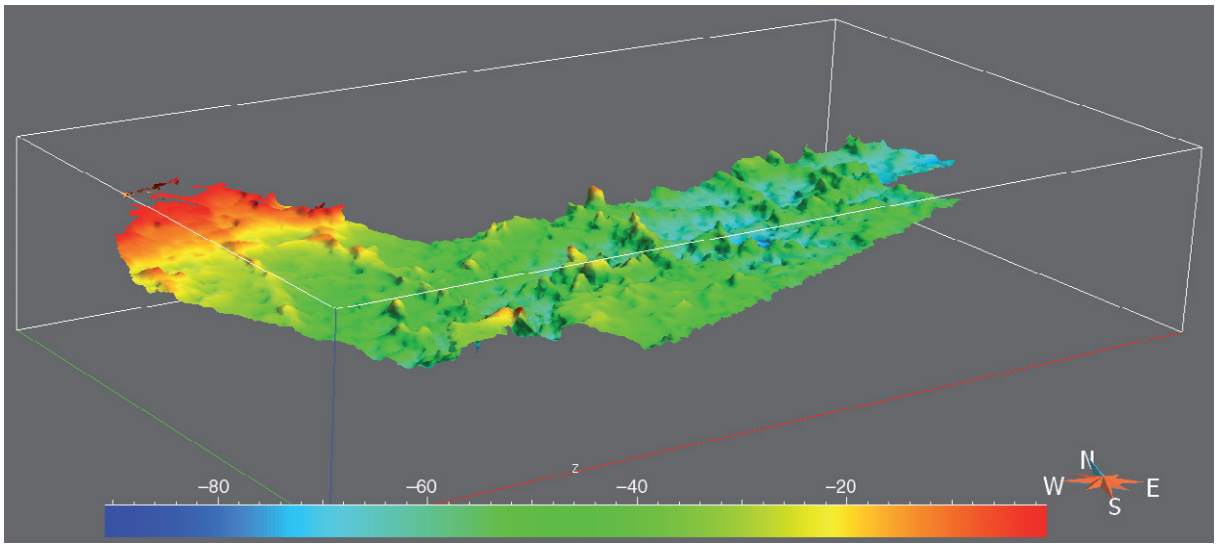



Figur 1. Tredimensionell bild av isoresistivitetsytan 40 Ωm som avser att illustrera morfologin hos en möjlig yta hos det salta grundvattnet inom område 1. Observationspunkten för bilden ligger sydsydväst om område 1. Färgskalan visar djupet i meter över havet.

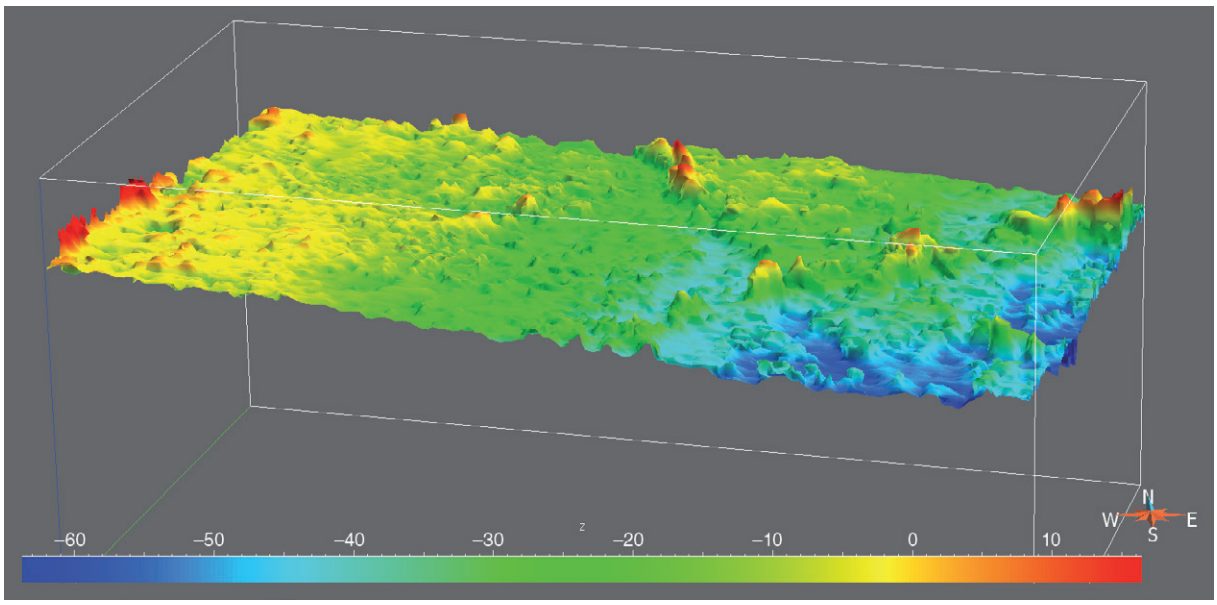
nord–sydlig riktning i de södra delarna en artefakt som beror på en nedgrävd ledning. Ytterligare en anledning till den oregelbundna ytan är att det lokalt sker större grundvattenbildning inom vissa områden, vilket i så fall gör att det salta grundvattnet trängs undan och bildar lokala depressioner i isoresistivitetsytan.

## OMRÅDE 3

I område 3 visar morfologin hos isoresistivitetsytan för 40 Ωm en tydlig ökning av djupet mot öster (fig. 3). Två räta strukturer syns i figuren, båda i den östra halvan av området. Den struktur som går i nordost–sydvästlig riktning diskuteras i huvuddokumentet och är tolkad som en förkastning. Den andra stukturen (nordost–sydväst) skär den första i närheten av Tingstäde. Även denna skulle kunna vara en förkastning, men strukturen ligger delvis längs en väg och mycket data har tagits bort i närområdet varför våra tolkningar är försiktiga. Det är dock mycket intressant att det sydost om denna struktur är betydligt djupare ned till 40 Ωm-gränsen vilket talar för att det är en verklig struktur.



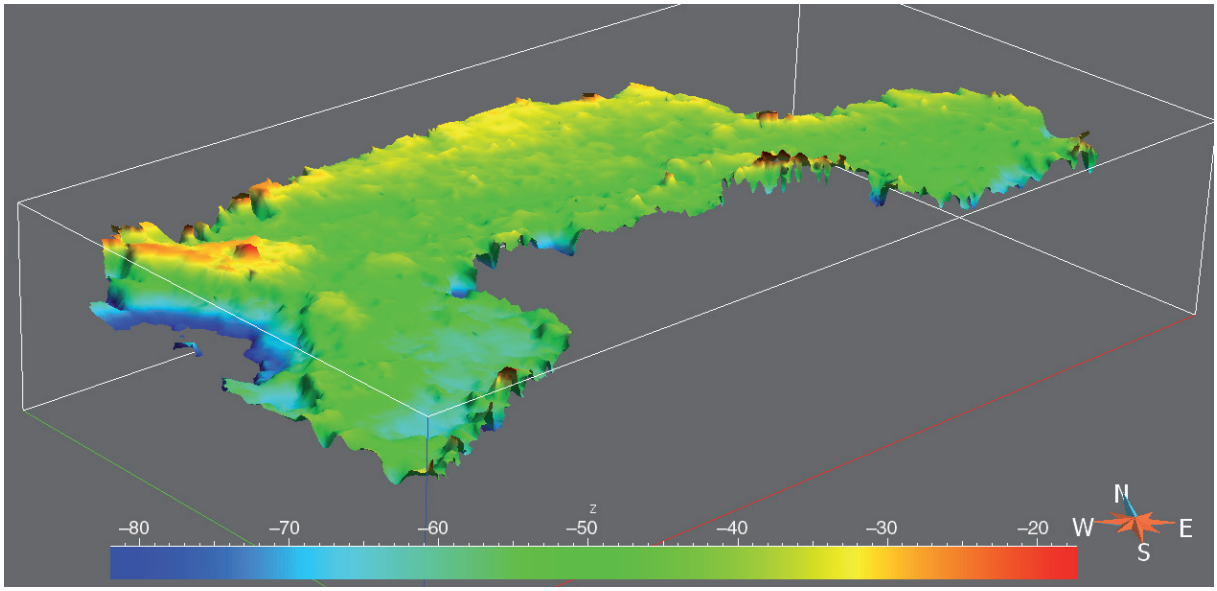

Figur 2. Tredimensionell bild av isoresistivitetsytan 40 Ωm som avser att illustrera morfologin hos en möjlig yta hos det salta grundvattnet inom område 2. Observationspunkten för bilden ligger sydsydväst om område 2. Färgskalan visar djupet i meter över havet.




Figur 3. Tredimensionell bild av isoresistivitetsytan 40 Ωm som avser att illustrera morfologin hos en möjlig yta hos det salta grundvattnet inom område 3. Observationspunkten för bilden ligger sydsydväst om område 3. Färgskalan visar djupet i meter över havet.

## OMRÅDE 4

Översiktligt sett ligger isoresistivitetsytan för 40 Ωm relativt flackt (fig. 4) med en svag lutning från nordnordväst mot sydsydost. I nordnordväst ligger ytan omkring –35 m ö.h. för att sjunka ned mot omkring –60 m.ö.h. i sydsydost. I sydvästra delen av Fårö sjunker dock ytan ytterligare och når nivåer på omkring –100 m ö.h. En rimlig förklaring till denna lokala avvikelse är att lågporösa, sprick- och lerfattiga kalkstenar bildar högresistiva berggrundsvolymer och att resistiviteten i dessa inte sjunker trots att de ligger under ytan hos det salta grundvattnet. Den låga volymandelen salt grundvatten i berggrunden, orsakad av den låga porositeten och sprickfattigdomen, innebär att resistiviteten inte sänks tillräckligt för att nå ned till ca 40 Ωm.




Figur 4. Tredimensionell bild av isoresistivitetsytan 40 Ωm som avser att illustrera morfologin hos en möjlig yta hos det salta grundvattnet inom område 4. Observationspunkten för bilden ligger sydsydväst om område 3. Färgskalan visar djupet i meter över havet.

Geological Survey of Sweden
Box 670
SE-751 28 Uppsala
Phone: +46 18 17 90 00
Fax: +46 18 17 92 10
www.sgu.se

Uppsala 2015
ISSN 0349-2176
ISBN 978-91-7403-270-3
Tryck: Elanders Sverige AB