

P-13-48

Projekt Kärnbränsleförvaret

Resistivitetmätning vid våtmark 16 i Forsmark

Håkan Mattsson, GeoVista AB

December 2013

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1651-4416

SKB P-13-48

ID 1385843

Projekt Kärnbränsleförvaret

Resistivetsmätning vid våtmark 16 i Forsmark

Håkan Mattsson, GeoVista AB

December 2013

Nyckelord: AP SFK-10-057, Geofysiska mätningar, Resistivitet, Våtmark, Glaciallera.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Sammanfattning

GeoVista AB har utfört geofysiska mätningar med resistivitetsmetoden vid en våtmark (våtmark 16) med en göl nära Forsmarks kärnkraftverk. Syftet med de utförda resistivitetsmätningarna i och omkring den aktuella våtmarken var att kartlägga utbredning och tjocklek på det lager av glaciallera som påträffats i anslutning till gölens sydvästra del. Ett annat syfte är att testa metoden i en typ av våtmarksmiljö som är vanlig förekommande i Forsmark, som underlag inför fortsatta undersökningar i området. Vid våtmark 16 mättes sammanlagt åtta stycken resistivitetprofiler å 120–140 m per profil i ett rutnät (20–40 m mellan profilerna, 1 m elektrodavstånd). Längs två av profilerna mättes också IP-effekt (inducerad polarisation). Arbetet har även omfattat utsättning/inmätning av profillinjerna i koordinatsystemen RT90 2,5 gon väst/RH70 samt bearbetning, tolkning och rapportering av resultaten.

Totalt samlades 13 400 mätpunkter in med positiva resistivetsdata. Från dessa data plockades 427 st. mätpunkter (3,2 %) bort pga. höga standardavvikelser, orimligt låg resistivitet eller enstaka ”outliers”. Resistivetsdata är generellt av god kvalitet. Detta indikeras av låga brusnivåer, bra signalstyrka, mjuka naturliga anomalier och få punkter med kraftigt avvikande (”orimlig”) resistivitet. Längs två av de nord-sydliga profilerna (N3 och N4) har dock onormalt låga resistiviteter uppmätts.

De modeller av markens resistivetsfördelning som presenteras i denna rapport har en bra anpassning till uppmätta data och är geologiskt trovärdiga. I huvudsak indikerar modellerna att marken runtomkring gölen är uppbyggd av ett övre 1–2 m mäktigt lager av torr, fast stenbunden morän. Detta material överlagrar en sandig, siltig grusmorän (vattenmättad) med 2–4 m mäktighet och som i sin tur vilar på berg eller bottenmorän.

Kopplingen mellan den geologiska karteringen i inom området liggande borrhål och resistivetsvariationer längs närliggande mätprofiler är bra, t ex längs profil E2. Där ser vi hur avvikande låga resistivetsvärden sammanfaller med karterad förekomst av lera och att underliggande sandig grusmorän framträder med förhöjd resistivitet. Det finns dock ingen absolut entydig koppling mellan ett visst resistivetsintervall och lera (eller t ex gyttja). Borrhålen är dessutom få och relativt grunda, vilket medför viss osäkerhet i hur resistivetsmodellerna ska tolkas, främst mot djupet.

Efter att fältmätningarna genomförts samlade SKB in 6 stycken prover med glaciallera från ett område sydväst om gölen. På dessa prover mätte GeoVista resistivitet och IP-effekt (eng. chargeability). Medelresistiviteten på proverna är 88 ± 7 ohm-m och medel-IP-värdet är 206 ± 52 mV/V. De uppmätta IP-värdena på leran är 10–20 ggr högre än de IP-värden man kan förvänta sig för vatten och ”vanlig” moränjord. Längs de två profiler där vi förutom resistivitet även mätte IP förekommer förhöjda IP-värden främst i torr stenbunden morän men också där resistivetsdata indikerar förekomst av lera. IP-mätningarna är därför svårtolkade och möjligen hade det varit bättre om man mätt IP längs samtliga 8 profiler för att bättre förstå kopplingen mellan IP/resistivitet och lera/gyttja och vatten.

Utifrån resistivetsmodellerna har två möjliga volymer (områden) med glaciallera identifierats. Detta har gjorts genom att i 3D-modellen ansätta tröskelvärden på resistiviteten i enlighet med de resistivetsvärden på leran som erhöles vid laboriemätningarna. Förfaringssättet är förenklat och ger ingalunda någon unik tolkning över lerans utbredning. Utifrån den information som finns tillgänglig är dock denna tolkning rimlig. Söder om gölen, där lera påträffats i borrhål, förekommer ett område som har en ungefärlig utbredning av 40×20 m² och norr om gölen förekommer ett område på ca 20×10 m². Mäktigheten på de indikerade lerområdena är enligt modellerna ca 1 m.

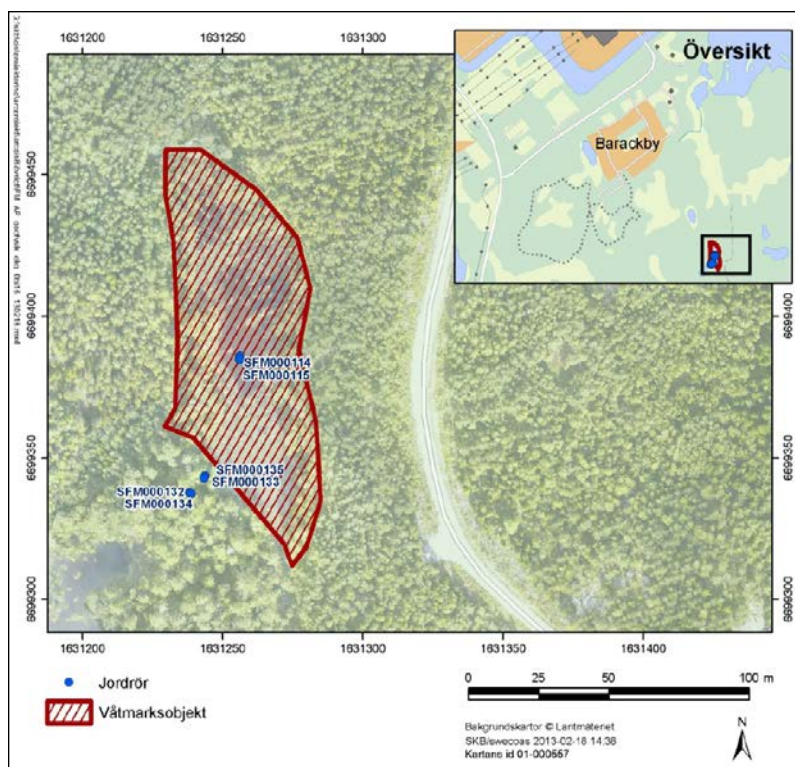
Innehåll

1	Inledning	7
2	Metod	9
3	Utförande	11
3.1	Fältmätning av resistivitet och IP	11
3.2	Laboratoriemätning på glaciallera	13
4	Resultat och tolkningar	15
4.1	Resultat av laboratoriemätningar på glaciallera	15
4.2	Kontroll av fältdata	15
4.3	Tolkning av 2D-inversion: resistivitet	16
4.4	Tolkning av 2D-inversion: IP	22
4.5	Tolkning av 3D-inversion	22
5	Diskussion och slutsatser	27
5.1	Dataleverans	27

1 Inledning

Efter förfrågan från SKB AB har GeoVista AB utfört geofysiska mätningar med resistivitetmetoden vid en våtmark med en göl nära Forsmarks kärnkraftverk (Figur 1-1). Syftet med utförda resistivitetsmätningar i och omkring den aktuella våtmarken var att kartlägga utbredning och tjocklek på det lager av glaciallera som i samband med borrning vid installation av observationsrör (jordrör) påträffats i ett område sydväst om gölen (våtmark 16, se Figur 1-1). Sammanlagt gjordes mätningar längs 8 stycken 120–140 m långa profiler med 1 m elektrodavstånd i ett rutnät (se Figur 3-1 i kapitel 3). Som komplement till resistivitetsmätningarna mättes också IP (inducerad polarisation, eng. chargeability) längs två profiler. Efter att fältmätningarna genomförts samlade SKB in 6 stycken prover med glaciallera från ett område sydväst om gölen. På dessa prover mätte GeoVista resistivitet och IP. Arbetet har även omfattat utsättning/inmätning av profillinjerna i koordinatsystemen RT90 2,5 gon väst/RH70 samt bearbetning, tolkning och rapportering av resultaten.

I och i anslutning till gölen hade man tidigare borrar sex stycken, 1–3 m djupa, observationshål för grundvattenmonitoring (jordrör, Figur 1-1) där man hade karterat jordlagerföljden. Denna information användes som stöd vid tolkningen av resistivitetsdata.



Figur 1-1. Karta med den aktuella våtmarkens läge samt lägen för borrhål. Glaciallera har tidigare påträffats i området vid borrhålen SFM000132–135.

2 Metod

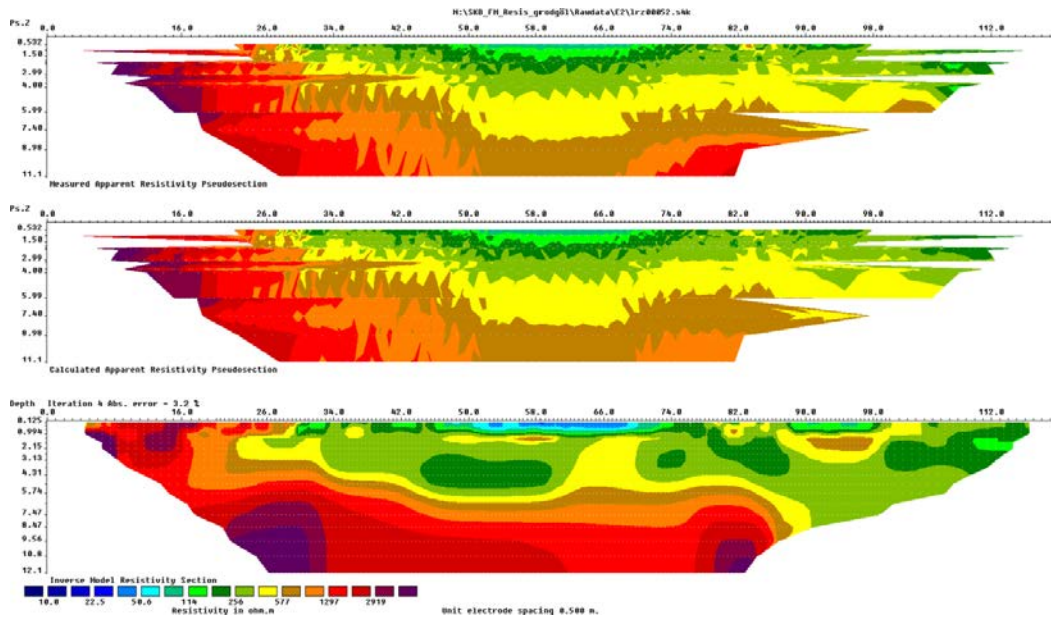
Vid resistivitetsmätningar mäts markgrundens reaktion på en likström som sänds ut via två strömelektroder. Strömmen alstrar ett potentialfält som mäts med två potentialelektroder. Om potentialfältet är högt i förhållande till utsänd ström har markgrunden hög motståndsförmåga (dvs den är dåligt ledande) och vice versa. Geofysiker talar ofta om resistiviteten, vilket är detsamma som motståndet.

Resistivitet mäts i ohm-m. Den elektriska resistiviteten i markgrunden kan variera inom stora intervall och genom att kartlägga variationerna i resistivitet i plan och djup kan man bygga upp en modell av markens strukturer. Med kännedom om olika geologiska materials resistivitet är det då möjligt att utifrån dessa mätningar och modeller göra geologiska tolkningar av undergrunden. I lösa avlagringar är vatteninnehållet en mycket viktig parameter för resistiviteten; ”normalt” vatten har en resistivitet på cirka 50–100 ohm-m, saltvatten kan ha en resistivitet som är < 1 ohm-m och smältvatten i fjällen kan ha resistivitetsvärden som är $\gg 100$ ohm-m. Leror har ofta avvikande låg resistivitet (i intervallet 1–150 ohm-m) medan morän kan ha resistiviteter i intervallet 1 000–3 000 ohm-m. Friskt kristallint berg (till exempel granit) med obetydlig porositet har hög resistivitet ($> 10\,000$ ohm-m). Sand har ofta resistivitet i intervallet 500–1 000 ohm-m. Även sprickzoner, vittrat berg, eller berg med hög halt av lermineral har ofta avvikande låg resistivitet och kan därför identifieras med resistivitetsmetoden.

Insamlade data har modellerats med så kallad inversionsteknik för att skapa både 2D- och 3D-modeller över resistivitetsfördelningen (se Figur 2-1). Modelleringen utfördes med hänsyn till rådande topografi och vi använde s.k. L1-norm (robust inversion) vilken ofta är stabilare och mer geologiskt trovärdig än L2-norm (se *Res2Dinv* och *Res3Dinv* manual). Geofysisk inversion är en process där en fysikalisk modell räknas fram för marken utifrån en uppsättning mätdata. I praktiken måste alltid en förenklad geometri för modellen användas. I modellen delas marken upp i ett stort antal rektangulära celler. Cellernas resistivitet justeras sedan iterativt på ett sådant sätt att modellens teoretiskt beräknade respons stämmer överens med mätdata (Figur 2-1). Slutlösningen är inte unik utan beror på ett antal parametrar som styr algoritmen. För det aktuella arbetet användes programmen *Res2Dinv* och *Res3Dinv* från Geotomo Software.

Inversionsmodellen är inte entydig och upplöser inte alltid det man eftersöker på ett önskat sätt. Olika typer av resistivitetsfördelning i markgrunden kan ge upphov till likartade anomalier i uppmätta data. Endast sådana dominerande strukturer som inte kan tolkas med alternativa geometrier och/eller parametrar kommer att avbildas på ett entydigt sätt. Det är därför nödvändigt att inersionsresultaten värderas utifrån sin geologiska rimlighet och sin fysikaliska entydighet. Det är också mycket viktigt att man, som i det aktuella fallet, har tillgång till stödjande, oberoende information (till exempel borrhålsloggar) i samband med tolkningen av modellerna.

I samband med resistivitetsmätningarna utfördes även IP-mätningar (inducerad polarisation) längs två profiler. IP (som mäts i mV/V) är liksom resistivitetsmätningar en elektrisk mätteknik. Förenklat mäter man med metoden markgrundens förmåga att fungera som en kondensator genom att mäta hur den uppladdade spänningen minskar med tiden efter det att strömmen brutits. Vissa leror har en tydlig IP-effekt och kan därför identifieras även med denna metod.



Figur 2-1. Exempel på tre vertikalsektioner från samma mätprofil som visar mätdata (överst), beräknade mätdata utifrån modellen (mitten) och modellen (nederst). Det är bara den slutliga modellen (nederst) som visas i resultaten i kapitel 4. Absolutfelet (Abs. Error) indikerar hur bra modellen är anpassad till mätdata. Ett absolut fel $< 5\%$ är att betrakta som en mycket god anpassning.

3 Utförande

3.1 Fältmätning av resistivitet och IP

Samtliga resistivitetsmätningar har utförts av GeoVista AB med LUND Imaging System (ABEM), med 1 m elektrodavstånd enligt aktuell uppdragsbeskrivning och i enlighet med SKB:s metodbeskrivning (SKB MD 212.005). Multiledarkabel har lagts ut längs mätprofilen och kopplas till elektroder (totalt 81 stycken elektroder per utlägg) samt till en SAS4000 ABEM Terrameter. En förprogrammerad sekvens i instrumentet (ett så kallat gradientprotokoll) styr hur ström successivt skickas ut mellan olika elektroder och spänning mäts mellan andra elektroder för beräkning av resistiviteten på ett visst djup och läge längs profilen. Under mätningen byggs successivt en bild upp över hur markens elektriska egenskaper varierar, i det aktuella fallet ned till maximalt cirka 10 m djup. Mätning skedde enligt ”roll-along” för att täcka in hela sträckan på 120–140 m per profil. För två av profilerna (E1 och N2; se Figur 3-1) utfördes även mätningen med IP (inducerad polarisation). Totalt mättes 8 stycken profiler med avseende på resistivitet, tre väst-östliga och fem nord-sydliga (Figur 3-1). Eftersom mätning delvis gjorts över öppet vatten har särskilda flytetyg specialtillverkats för att hålla kabeluttagen ovanför vattenytan och elektroderna i rätt position (Figur 3-2). Mätningen krävde även tillgång till en mindre båt och vadarstövlar.

RTK-GPS, typ Topcon GRS-1, har använts för utsättning/inmätning av start- och slutpunkter på mätprofilerna och mellanliggande stödpunkter (se Tabell 3-1).



Figur 3-1. Karta som visar de åtta mätprofilernas geografiska läge (vita heldragna linjer) samt positionen på de sex borrhål som användes som stöd vid tolkningen av resistivitetsdata.



Figur 3-2. Två foton som visar mätningarnas utförande.

Tabell 3-1. Start- och slutkoordinater för profiler i syd-nordlig (N) och väst-östlig riktning (E) i RT90 2,5 gon V.

Linje	Start Norr [m]	Start Öst [m]	Slut Norr [m]	Slut Öst [m]
N1	6699304	1631217	6699444	1631217
N2	6699304	1631237	6699444	1631237
N3	6699304	1631257	6699444	1631257
N4	6699324	1631277	6699444	1631277
N5	6699324	1631297	6699444	1631297
E1	6699344	1631197	6699344	1631317
E2	6699387	1631197	6699387	1631317
E3	6699424	1631197	6699424	1631317

3.2 Labororiemätning på glaciallera

För stöd till tolkningen av fältmätningarna samlades in 6 stycken prover med glaciallera från ett område sydväst om gölen av SKB och skickades till GeoVista i tätslutande förpackningar. Inför mätningen packades leran från respektive prov in i plaströr (100 mm längd och 36 mm diameter). Lerans resistivitet och IP mättes med en så kallad "sample core IP tester" från GDD Instrumentation. Mätningarna gjordes i tidsdomän (2 sekunder) precis som fältmätningarna. Varje mätning innefattar egentligen en serie om 20 stycken mätningar, vilket ger viss kontroll på repeterbarheten i mätningen och stabiliteten hos de uppmätta parametrarna.

4 Resultat och tolkningar

4.1 Resultat av laboratoriemätningar på glaciallera

Data från mätningarna på 6 stycken lerprover presenteras i Tabell 4-1. Medelresistiviteten från mätningar på olika proverna är 88 ± 7 ohm-m och medel-IP är 206 ± 52 mV/V. De uppmätta IP-värdena på glacialleran är fullt rimliga och 10–20 gånger högre än de IP-värden man kan förvänta sig för vatten och ”vanlig” moränjord (inklusive sand och grus). Leran bör alltså ge upphov till kraftiga anomalier (avvikelser) i data från fältmätningarna.

Även resistivitetsvärdena på glacialleran ligger inom förväntat intervall. Mätningar av elektrisk konduktivitet på gölvatten (utförda av SKB den 20 maj 2013) indikerar att vattnets resistivitet är cirka 40 ohm-m. Det är således en viss skillnad i resistivitet mellan glacialleran och vattnet, men skillnaden är sannolikt för liten för att kunna skilja glaciallera från vatten i resistivitetsdata från fältmätningarna.

4.2 Kontroll av fältdata

Vid fältmätningen skapas en binär rådatafil med samtliga data, oavsett kvalitet. När binärfilen läses över från instrumentet till en dator görs en konvertering av filen till en läsbar ascii-fil. I samband med detta filtreras samtliga negativa resistivitetsvärden bort, eftersom dessa kan anses vara fysikaliskt orimliga med det aktuella mätprotokollet. Totalt samlades under fältkampanjen i maj 2013 13 400 mätpunkter in med positiva resistivitetsdata från de 8 mätprofilerna. Från dessa data plockades 427 stycken (3,2 %) bort på grund av höga standardavvikelser, orimligt låg resistivitet eller enstaka ”outliers”.

Resistivitetsdata är generellt av god kvalitet. Detta indikeras av låga brusnivåer, bra signalstyrka, mjuka naturliga anomalier och få punkter med kraftigt avvikande ”orimlig” resistivitet. Längs två av profilerna (N3 och N4) har dock onormalt låga resistiviteter uppmätts. Ett större antal mätpunkter har här värden < 1 ohm-m, vilket inte anses vara fysikaliskt rimligt i den aktuella miljön. Så låga resistiviteter kan till exempel uppträda i saltvatten eller i lakvatten från gruvdammar. I vårt fall är de extremt låga värdena dessutom ofta blandade med betydligt högre, mer ”normala” data, vilket antyder att de är orsakade av någon typ av mätfel. En möjlig orsak till det misstänkta felet är att det kommit in fukt i den kabelskarv (kopplingsbox) som under mätningen satt nära det område där onormalt låga resistiviteter uppmätts. Samtliga resistivitetsvärden < 1 ohm-m plockades därför bort direkt ur datafilerna för dessa två profiler. I samband med modelleringen har data dessutom ”trimmats”, vilket innebär att avvikande mätpunkter där modellen är svårangepassad till data plockas bort. Flertalet mätdata längs profil N3 med resistivitet < 10 ohm-m har tagits bort i samband med trimningsproceduren.

För IP-data är kvaliteten också bra, även om den inte är lika bra som för resistivitetsdata. 74 (4,8 %) respektive 104 datapunkter (5,3 %), de flesta negativa IP-värden, plockades bort från profil E1 respektive N2.

Tabell 4-1. Resistivitet- och IP-data för de 6 lerproverna från gölen.

Prov Nr	Resistivitet [ohm-m]	IP chargeability [mV/V]
1	82	157
2	93	230
3	95	306
4	79	196
5	84	195
6	96	152

Figur 4-1 visar fördelningen av ”sann” (modellerad) resistivitet för 3D-modellen. I diagrammet har vi, efter erfarenhet, lagt in intervall som indikerar vilka resistivitetsvärden som svarar mot de geologiska material som förekommer i mätområdet.

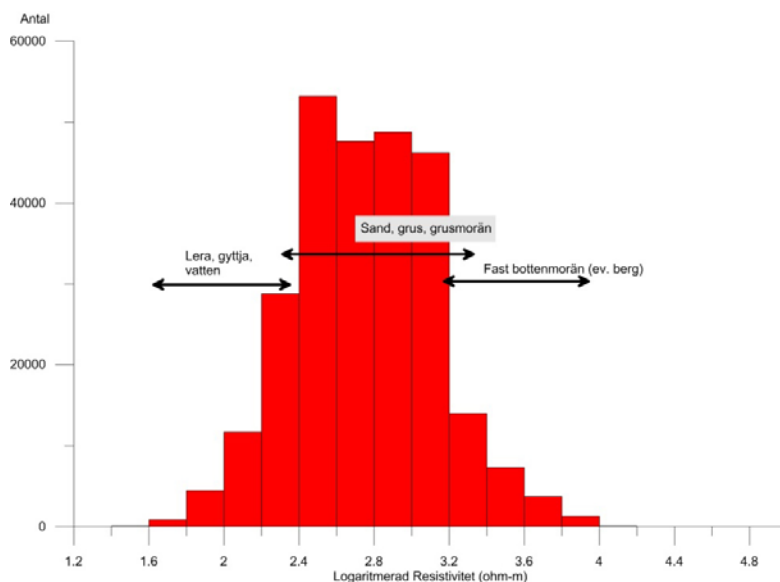
4.3 Tolkning av 2D-inversion: resistivitet

De åtta resistivitetsmodellerna (E1–E3 och N1–N5) presenteras nedan tillsammans med en kortfattad beskrivning och tolkning. Alla de nord-sydliga profilerna presenteras från söder mot norr och de väst-östliga profilerna presenteras från väster mot öster.

Profil E1 korsar en del av området med tillgång till stödjande data i form av borrhål. I Figur 4-2 visas modellen som en färgad konturkarta (logaritmisk färgskala) och borrhålet SFM000133 med tillhörande kartering ses också i bilden (borrhålet SFM000135 ligger nära och har en likartad geologisk kartering). Kombinationen av resistivitetsdata och geologisk borrhålsinformation är mycket viktig för att kunna koppla uppmätta resistiviteter till olika geologiska material. Tyvärr är samtliga karterade borrhål ganska korta, 1–3 m vilket lämnar en del osäkerheter mot djupet.

I Figur 4-2 finns en ganska tydlig indikation att resistivitet i intervallet 10–200 ohm-m kan kopplas till ”brungrå rostfläckig lera med siltskikt” och att ”grå sandig siltig grusmorän” har resistivitet i intervallet 200–1 000 ohm-m. Mot djupet i sektionen (6–8 m under marknivå) finns ett tydligt avgränsat lager med resistivitet i huvudsak i intervallet 1 000–3 000 (5 000) ohm-m, vilket sannolikt svarar mot antingen bottenmorän eller berg.

Den indikerade glacialeran har en utbredning längs profil E1 från cirka 43 m profilängd till cirka 83 m profilängd, med en mäktighet på omkring 1 m. Eftersom elektrodavståndet är 1 m är dock mäktigheter mindre än 1–2 m osäkra, det vill säga lerlagret kan vara tunnare än 1 m. De topografiskt något högre belägna områdena har ett 1–2 m mäktigt högresistivt lager närmast ytan som kan kopplas till den stenbundna morän som enligt fältpersonalens observationer förekommer i stor utsträckning i området runt gölen. Inom höjdintervallet (avseende markytans nivå) 2 m till –2 m förekommer i huvudsak resistivitetsvärden i intervallet 200–1 000 ohm-m som tolkas indikera förekomst av sandig, siltig grusmorän.



Figur 4-1. Histogram över logarimerade resistivitetsdata (”sann” resistivitet från 3D_modellen) från våtmarken. I figuren visas dessutom resistivitetsintervall som beskriver koppling mellan resistivitetsdata och aktuella geologiska material.

Resistivetsmodellerna för profilerna E2 (Figur 4-3) och E3 (Figur 4-4) påminner i stora drag om profil E1. Längs profil E2 är den tolkade leran något tunnare än längs E1, med en mäktighet på 0,5–1 m. Det förekommer även indikationer på glaciallera längre ut mot östra kanten, i området kring profillängden 90–100 m. Profil E3 korsar gölen längs 40–80 m profillängd. Från cirka 58 m till 82 m profillängd förekommer avvikande låga resistiviteter ner till omkring 4 m under marknivå. Även längs 40–50 m profillängd förekommer indikationer på förekomst av glaciallera.

Pilarna i Figurerna 4-3 och 4-4 pekar på områden med resistivitet i intervallet 200–250 ohm-m. Områdena ligger innesluta i volymer med resistivitet som indikerar sandig/grusig morän men det kan inte uteslutas att det förekommer inslag av glaciallera som sänker resistiviteten. I botten av modellerna för profilerna E2 och E3 förekommer resistivetsvärden kring 5 000 ohm-m eller mer, vilket tyder på berg (alternativt hård bottenmorän).

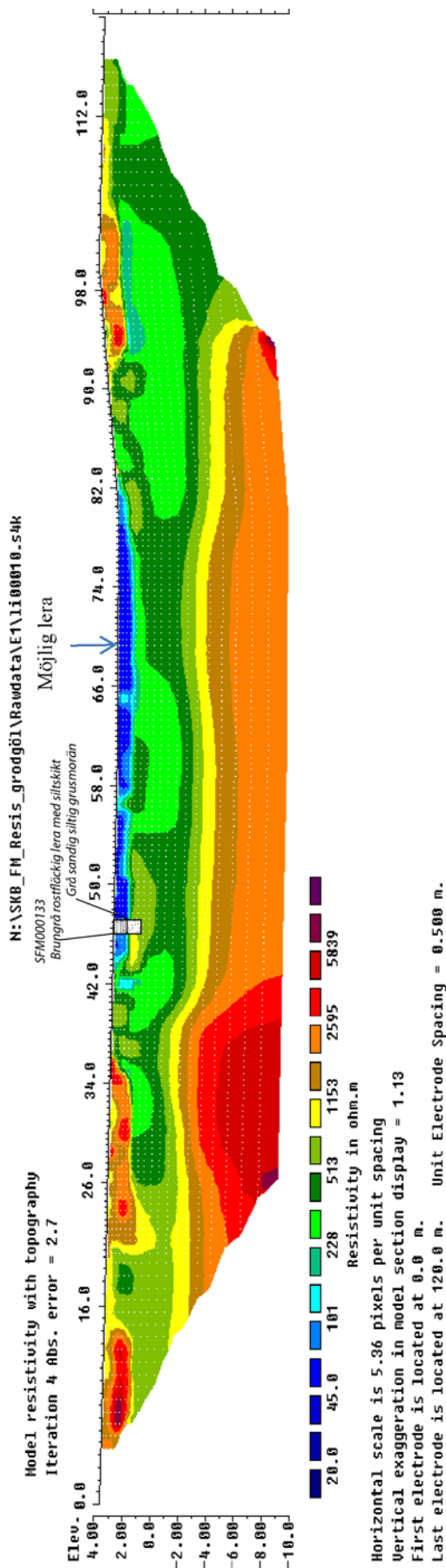
Profil N1 (Figur 4-5) är den nord-sydliga profil som går längs ut mot väster. Det översta lagret domineras av höga resistiviteter som kan kopplas till torr/fast stenbunden morän. De första cirka 30 m av profilen har dock lägre resistivetsvärden nära ytan, vilket troligen indikerar ett fuktigt ytskikt med sandig/grusig morän, eventuellt med inslag av silt. Under det ytligaste lagret förekommer resistivetsvärden som indikerar sandig/grusig morän längs i stort sett hela profilen. Detta lager underlagras i sin tur troligtvis av berg (alternativt hård bottenmorän) med resistivitet > 4 000–5 000 ohm-m.

Profil N2 (Figur 4-6) löper nära den västra kanten av gölen. Vid cirka 34 m profillängd passerar profilen nära borrhål SFM000132 (visas i figuren) och SFM000134. I SFM000132 har ingen lera observerats (jordlagerföljden i borrhålet domineras av sandig/siltig grusmorän). I det närbelägna borrhålet SFM000134 förekommer ett 0,4 m mäktigt lager med glaciallera som överlagrar sandig/siltig grusmorän. Resistivetsvärden i området nära borrhålet ligger inom intervallet 300–800 ohm-m, vilket överensstämmer med data från profil E1. Längs profilen finns indikationer på tunna lager glaciallera nära markytan vid ungefärlig profillängd 45–55 m respektive 100–110 m. Vid cirka 70 m profillängd förekommer en lågresistiv anomali på ungefär 2,5 m djup, sannolikt en artefakt (felaktighet) kopplad till de avvikande höga resistivetsvärden som ligger ovanför anomalin, närmare ytan. Det är ganska vanligt att den aktuella typen av modelleringsprogram försöker ”kompensera” för en volym med avvikande hög resistivitet genom att lägga in en närliggande volym med avvikande låg resistivitet.

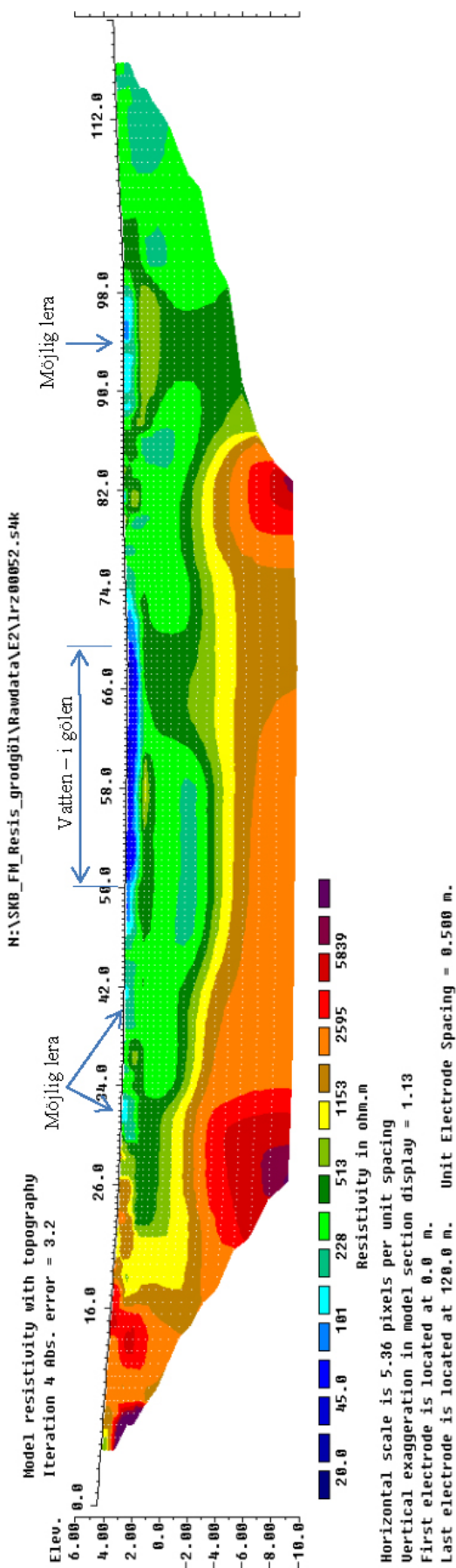
Profil N3 löper rakt över hela gölen (Figur 4-7). Som nämnts tidigare är datakvaliteten delvis nedsatt längs den första fjärdedelen av profil N3. Profilen domineras av ett relativt jämntjockt (cirka 1 m) lågresistivt lager närmast ytan (vatten/lera/gyttja), som överlagrar ett 3–4 m mäktigt lager med resistivitet i intervallet 300–800 ohm-m och som tolkas som sandig, siltig grusmorän. Vid ungefär 40 m profillängd förekommer en brant uppbuktning av bottenytan (berg alternativt bottenmorän), markerad med en streckad ring i figuren. Detta är med all sannolikhet en artefakt orsakad av brister i datakvalitet. Jämför vi med modellen för profil E1 som korsar just detta område vid cirka 60 m profillängd, och som inte har några brister i datakvalitet, så finns inga indikationer på någon uppbuktning av bottenytan.

Profil N4 löper från syd mot nord längs med den östliga kanten av gölen (Figur 4-8). De översta 6–7 m domineras av resistiviteter som i huvudsak indikerar förekomst av sandig, siltig grusmorän. Precis som för profil N1 så har de första cirka 30 m av profilen lägre resistivetsvärden nära ytan, vilket troligen indikerar ett fuktigt ytskikt med sandig/grusig morän, eventuellt med inslag av silt. Från cirka 86 m till 102 m profillängd finns indikationer på ett tunt lager glaciallera. En möjlig, mindre förekomst av glaciallera finns även nära ytan kring 31 m profillängd, men denna är mycket osäker. I botten förekommer ett lager med resistivitet > 3 000 ohm-m vilket troligen kan kopplas till berg (alternativt hård bottenmorän).

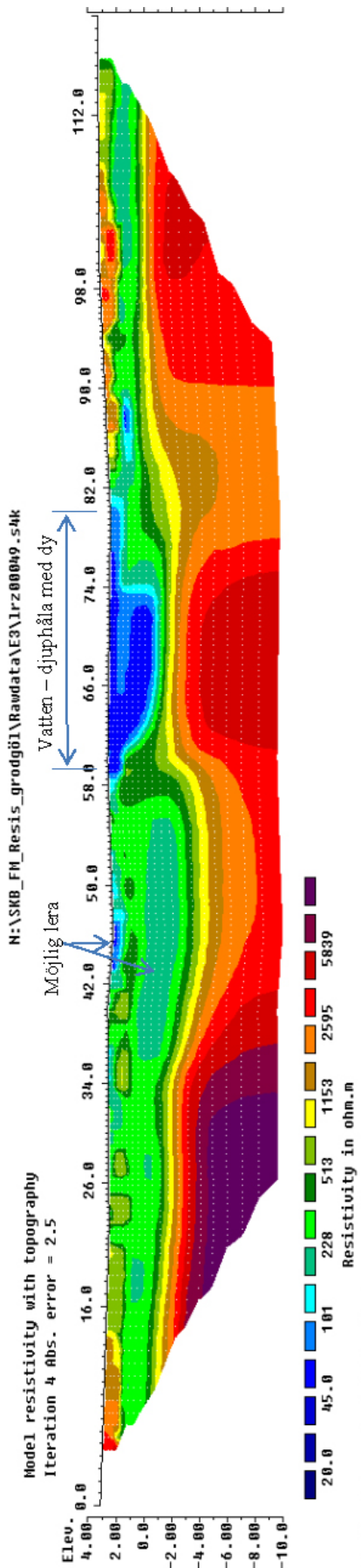
Profil N5 (Figur 4-9) är den nord-sydliga profil som går längs ut mot öster. Det översta lagret domineras av höga resistiviteter som kan kopplas till torr/fast stenbunden morän. Från cirka 35 m till 70 m profillängd förekommer lägre resistivetsvärden nära ytan, vilket indikerar på ett ytskikt med sandig/grusig morän, eventuellt med inslag av silt. Enligt observationer under mätningarna dominerar torr, stenbunden morän jordarterna på ytan längs hela profilen. Under det ytligaste lagret förekommer resistivetsnivåer som indikerar sandig/grusig morän längs i stort sett hela profilen. Detta lager ligger i sin tur på en botten med resistivitet > 2 000 ohm-m vilket troligen kan kopplas till berg alternativt hård bottenmorän.



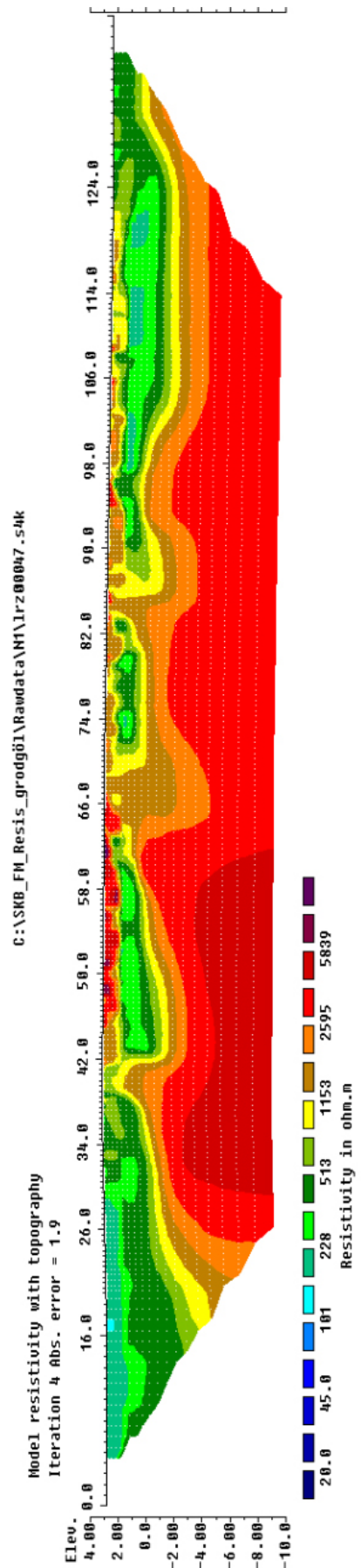
Figur 4-2. Resistivitetsmodell för profil E1 samt karterade jordarter i borrhålet SFM000133.



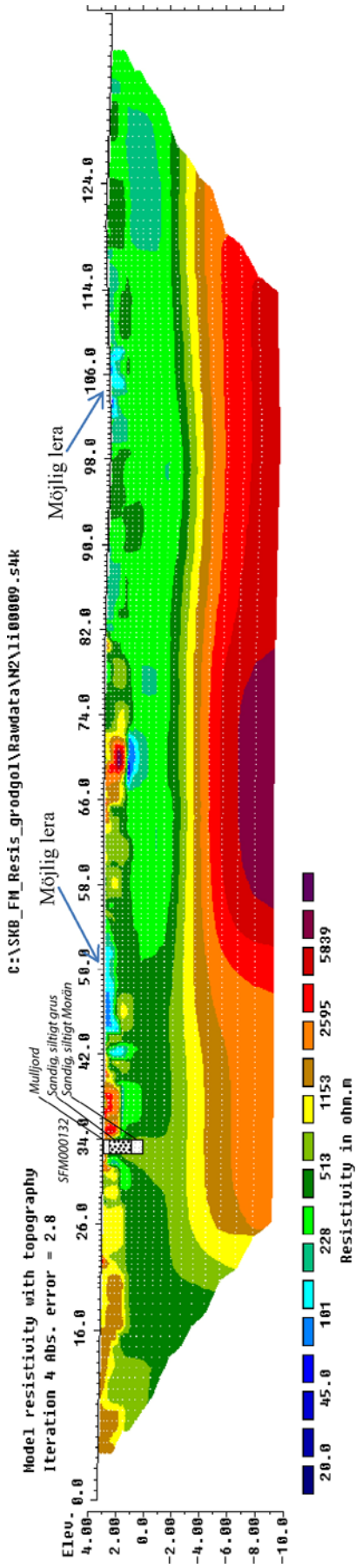
Figur 4-3. Resistivitetsmodell för profil E2.



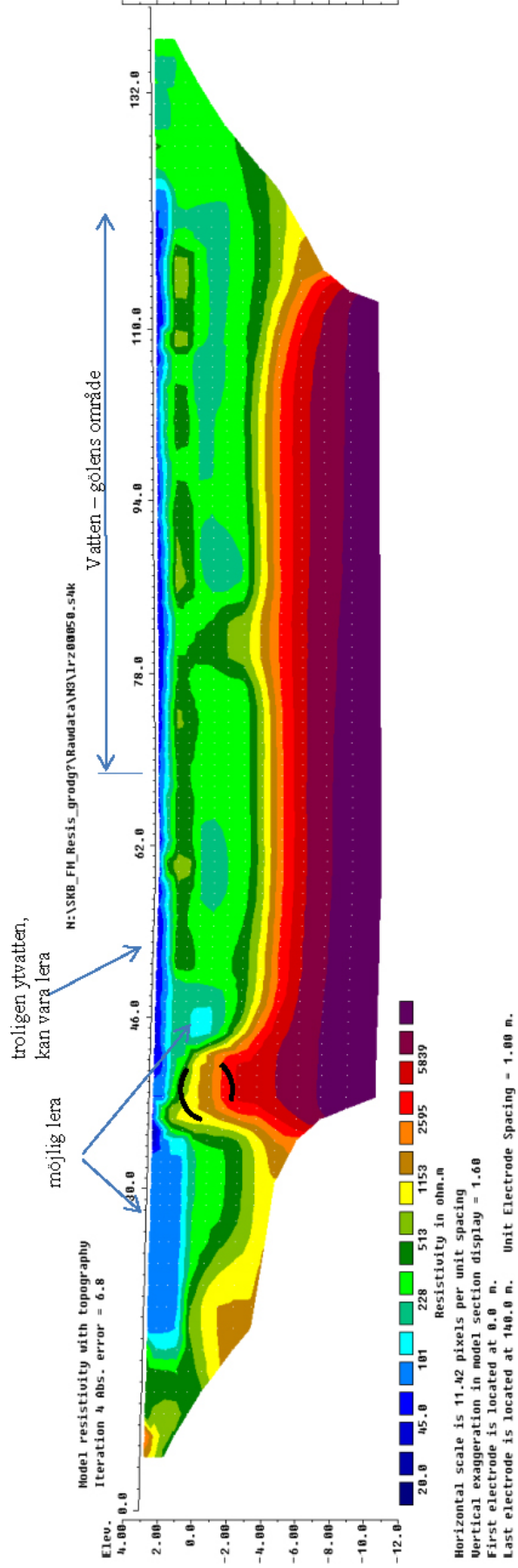
Figur 4-4. Resistivetsmodell för profil E3.



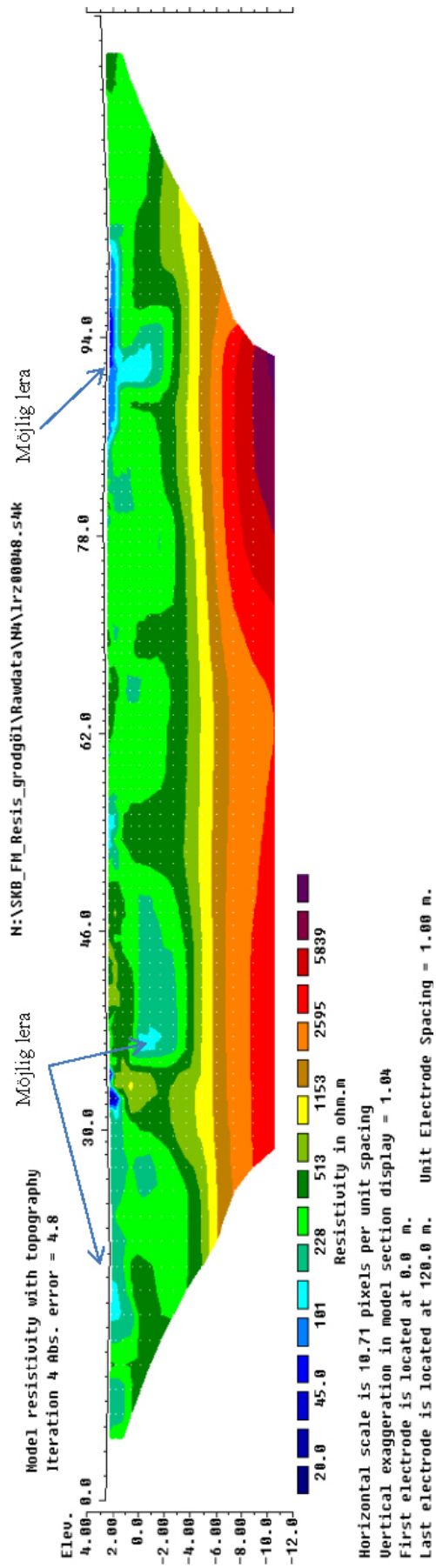
Figur 4-5. Resistivetsmodell för profil N1.



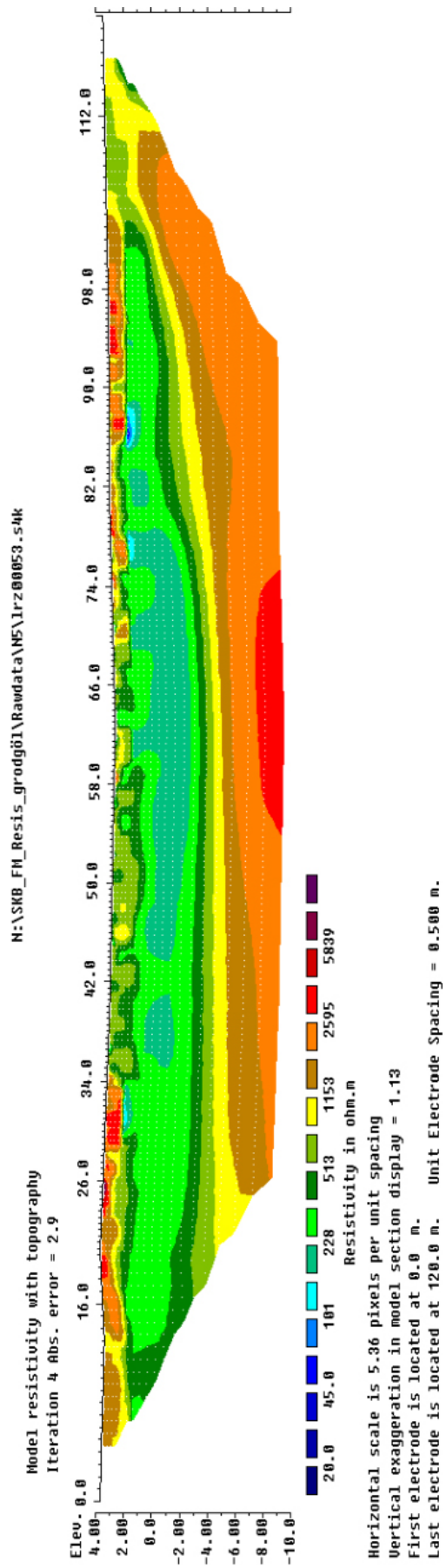
Figur 4-6. Resistiviteitsmodell för profil N2 samt karterade jordarter i borrhålet SFM000132.



Figur 4-7. Resistiviteitsmodell för profil N3.



Figur 4-8. Resistivetsmodell för profil N4.



Figur 4-9. Resistivetsmodell för profil N5.

4.4 Tolkning av 2D-inversion: IP

Som nämnts tidigare gjordes förutom resistivitetsmätning även IP-mätning längs profilerna E1 och N2. Inversionsmodellerna för respektive profil presenteras i Figur 4-10. Båda modellerna har ett likartat utseende. Det översta 1,5–2,0 m mäktiga lagret har bitvis förhöjda IP-värden i intervallet 8–15 mV/V. Mot djupet är IP-signalen mycket låg och det förekommer inga signifikanta variationer i uppmätt IP-effekt från cirka 2 m under marknivån och djupare.

De områden med kraftigast IP-effekt har också förhöjd resistivitet, vilket är en indikation på att dessa volymer inte utgörs av glaciallera utan stenbunden morän. De områden som i resistivitetsmätningarna tolkas som glaciallera (resistivitetsintervallet 80–140 ohm-m) har också förhöjd IP-effekt. Detta ger ett visst stöd till resistivitetsstolkningen. Det finns dock ingen entydig koppling mellan variationer i IP-effekt och områden där resistivitetsmodellerna indikerar på förekomst av glaciallera. Med tanke på laboratorieresultaten, som ju visar att glacialleran har en tydligt förhöjd IP-effekt, är den svaga kopplingen mellan IP, resistivitet och borrhålsobservationer något förvånande. En tänkbar förklaring är dock att glacialleran endast förekommer i begränsad utsträckning och att delar av moränen innehåller lera.

4.5 Tolkning av 3D-inversion

På grund av begränsningar i mjukvaran kunde 3D-modelleringen av resistivitetsdata inte utföras på hela mängden insamlade data (13 400 mätvärden). De yttersta cirka 20 m skars därför bort från varje profil, vilket resulterade i en datamängd på 9 862 punkter. 3D-modellen täcker således en något mindre yta än 2D-modellerna gör sammantaget. Modellens anpassning till mätdata är mycket god, med ett slutligt absolutfel på 5,3 %. Modelleringen är gjord med hänsyn tagen till gällande topografi. Cellstorleken sattes till 1 m, motsvarande elektrodavståndet vid mätningarna.

Det är viktigt att påpeka att trots att det i en 3D-modell finns resistivitetsvärden mellan de olika profilerna, så kommer huvuddelen av information från området under eller mycket nära själva profilen, framförallt ju närmare ytan man betraktar modellen. Huvudorsaken till att göra en 3D-modell är att det alltid finns objekt/lager eller avvikande material som kan ligga bredvid en mätprofil, vars påverkan inte modelleras korrekt i 2D. Genom att modellera i 3D kan man till viss del kompensera för sådana effekter, särskilt i områden där profiler korsar varandra brukar 3D-modellen kunna bidra med viktig information.

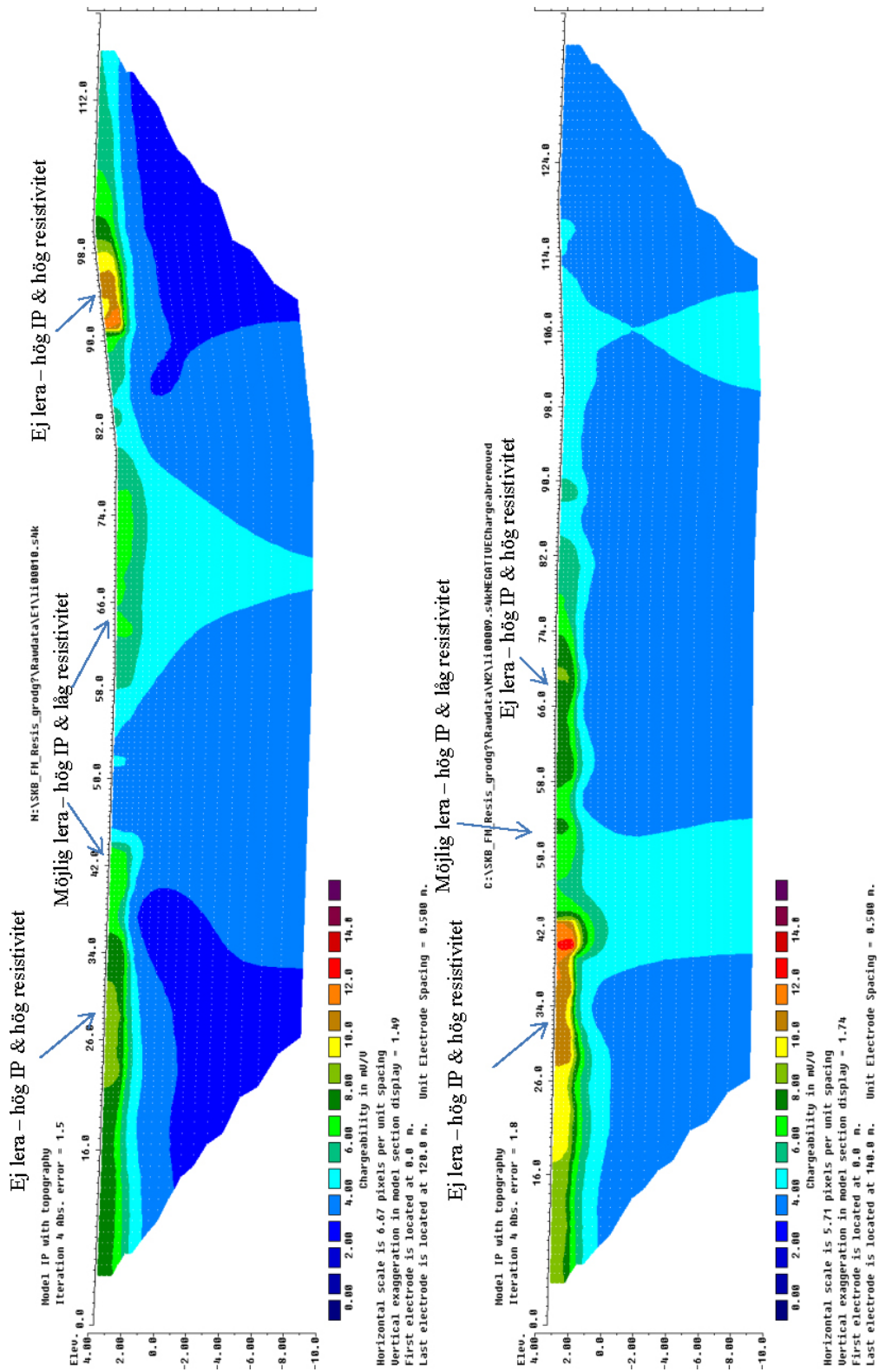
Figur 4-11 visar en översiktlig vy över 3D-resistivitetsmodellen över våtmarken. Bilden ses mot nordväst och de åtta mätprofilerna ses som rödstreckade linjer. Figuren visar höga resistiviteter vid ytan längs profilerna N1, N2 och N5 där det enligt gjorda observationer i fält i huvudsak förekommer torr, stenbunden morän.

Områdets centrala del, där gölen ligger, domineras av en lågresistiv volym som är orienterad i nord-syd. På den östra långsidan av modellen sjunker resistiviteten under det högresistiva ytskiktet, för att därunder stiga mot förhöjda värden ner mot berg/bottenmorän.

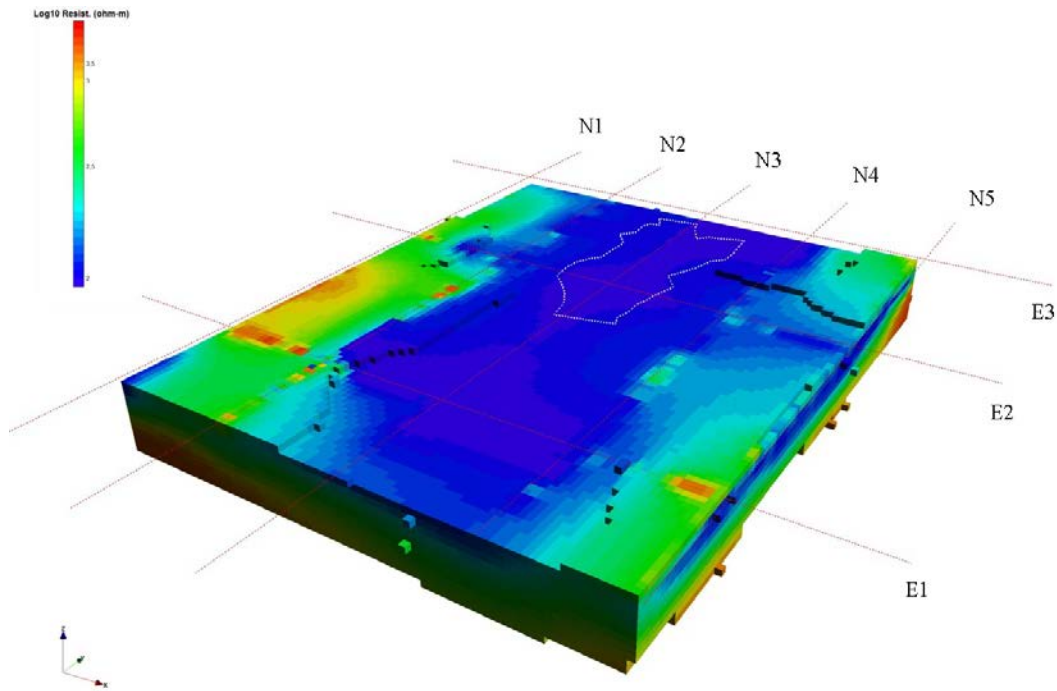
Figur 4-12 visar ett vertikalsnitt i 3D-modellen tvärs borrhålen. Blå områden (resistivitet <150 ohm-m) kan kopplas till förekomst av glaciallera i söder och vatten/gyttja i norr. Gölen finns längs sektionen och det är som nämnts tidigare inte möjligt att i resistivitetsdata skilja glaciallera från vatten/gyttja. Vi ser dock att det lågresistiva lagret ligger nära markytan och är relativt tunt.

I Figur 4-13 visas 3D-modellen sedd rakt uppifrån och det blåa området visar utbredningen av resistivitetsvärden i intervallet 80–140 ohm-m. Intervallet är baserat på de resistivitetsvärden för glacialleran som mättes upp i laboratoriet. Eftersom inget i modeller eller data tyder på att det förekommer glaciallera under gölens botten, som enligt fältpersonalen utgörs av hård/stenig morän, är det rimligt att räkna bort den lågresistiva yta som sammanfaller med själva gölen (som innehåller ytvatten). Två områden blir då kvar och dessa är inringade i Figur 4-13. Området söder om gölen innefattar de borrhål där man påträffat glaciallera. I området norr om gölen förekommer, trots den indikerade strandlinjen, vatten och en fördjupning i botten som saknar bärighet, troligen på grund av gyttja/dy men förekomst av glaciallera kan inte uteslutas.

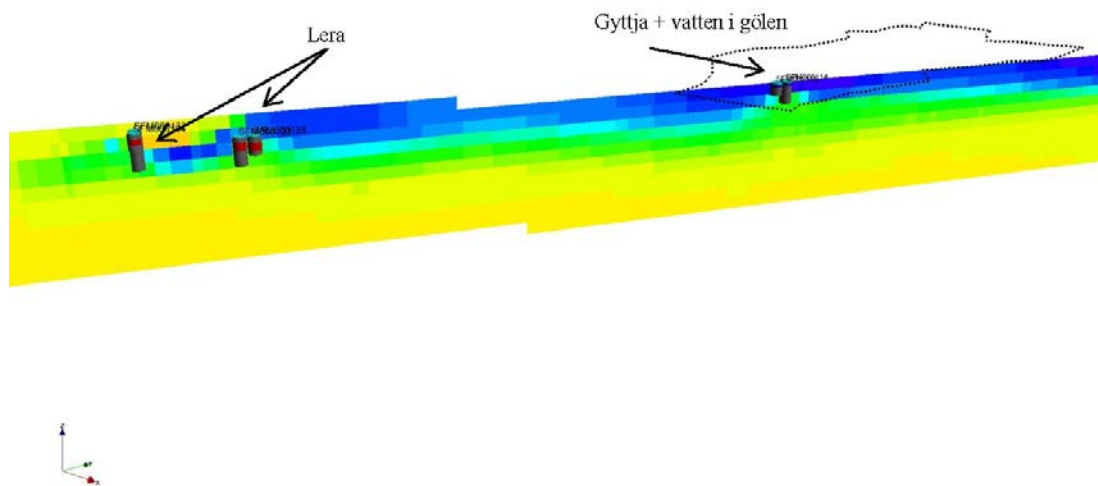
Det södra inringade området har en ungefärlig utbredning på 40·20 m² och det norra inringade området cirka 20·10 m². Mäktigheten på glacialleran är enligt modellen cirka 1 m, men som nämnts tidigare är elektrodavståndet för mätningarna 1 m, vilket innebär att mäktigheten på lager tunnare än någon meter är osäkert bestämda.



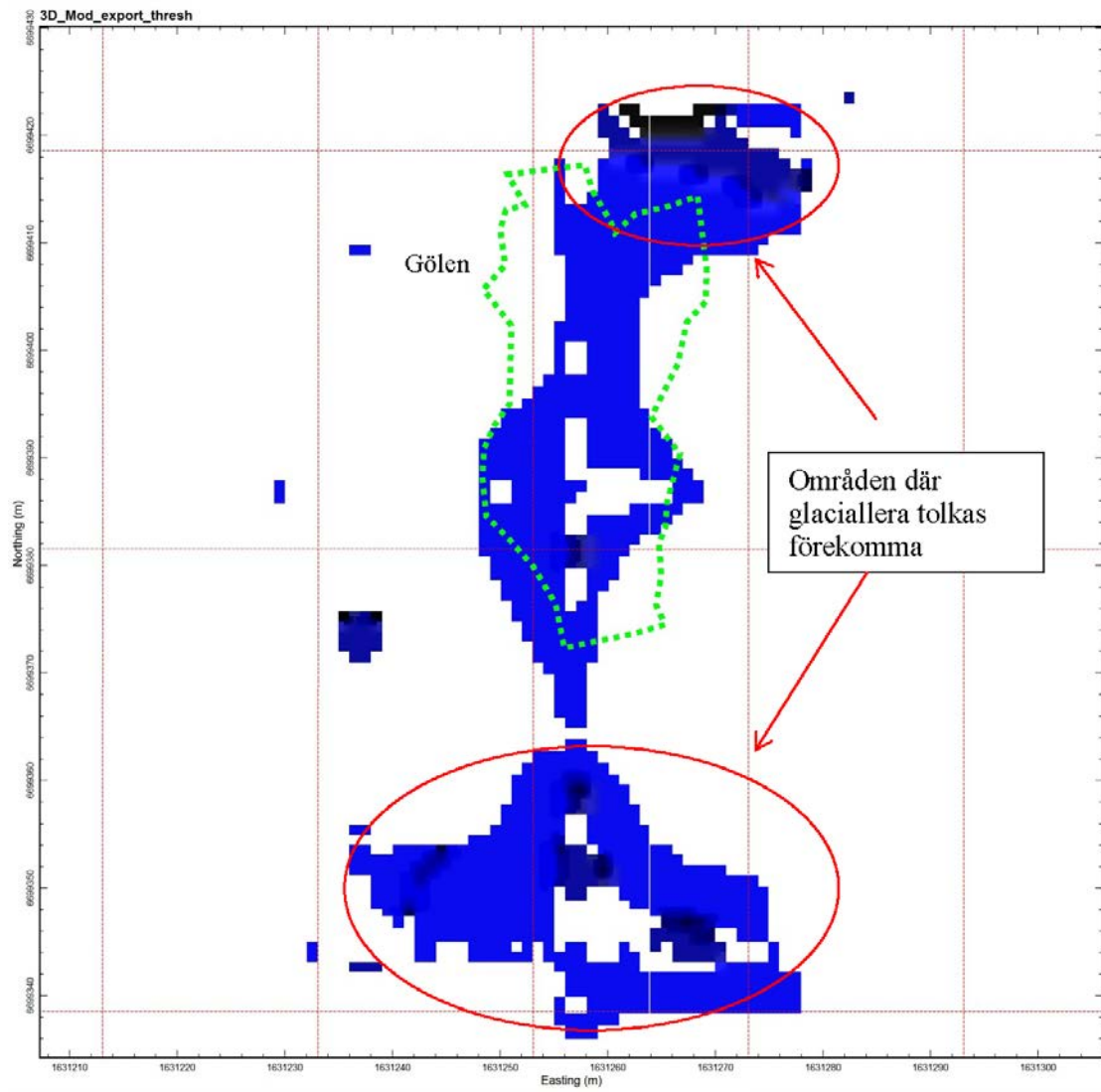
Figur 4-10. IP-modeller för profil E1 (överst) och profil N2 (nederst).



Figur 4-11. 3D-modellen sedd snett uppifrån i riktning mot nordväst. Gökens ungefärliga strandlinje är inmätt av SKB och indikeras av en vit-prickad linje. Vid resistivitetmätningarna var vattenståndet något högre och området under vatten därför något större. De åtta mätprofilerna ses som röstreckade linjer.



Figur 4-12. Vertikalsnitt genom 3D-modellen som passerar samtliga sex borrhål. Karterad glaciallera i borrhålen visas med röd färg längs hålet. Bilden ses mot väst-nordväst. Gökens ungefärliga utbredning är inmätt av SKB och indikeras av en svart-prickad linje.



Figur 4-13. 3D-vy sedd rakt uppifrån som enbart visar resistivitetsvärden i intervallet 80–140 ohm-m.

5 Diskussion och slutsatser

De modeller av markgrundens resistivitetsfördelning som presenteras i denna rapport har bra anpassning till uppmätta data och är geologisk trovärdiga. I huvudsak indikerar modellerna att marken kring gölen är uppbyggd av ett övre 1–2 m mäktigt lager av torr, fast stenbunden morän. Detta material överlagrar en sandig, siltig grusmorän (vattenmättad) som är 2–4 m mäktig och som i sin tur vilar på berg eller bottenmorän.

Kopplingen mellan den geologiska karteringen i borrhålen och resistivetsvariationer längs närliggande mätprofiler är bra, till exempel längs profil E2. Längs denna profil sammanfaller avvikande låga resistivetsvärden med observerad förekomst av glaciallera och underliggande sandig grusmorän framträder med förhöjd resistivitet. Det finns dock ingen absolut entydig koppling mellan ett visst resistivetsintervall och lera (eller till exempel gyttja). Borrhålen är dessutom få och relativt grunda, vilket medför viss osäkerhet i hur resistivetsmodellerna ska tolkas, främst mot djupet.

De laboriemätningar som utfördes på 6 stycken prover med glaciallera visar att glacialleran kring gölen har en signifikant IP-effekt och därför borde framträda tydligt i mätningarna med IP längs profilerna E1 och N2. Så är dock inte fallet. De högsta IP-värdena längs de två profilerna kan häröras till torr stenbunden morän. Förhöjda IP-värden förekommer dock även där resistiviteten är låg (inom intervallet för lera) samt där det de facto har observerats glaciallera i samband med borring. IP är ett delvis svårförklarligt fysikaliskt fenomen vars orsaker och samband inte är fullt kända. Torr morän utan, eller med väldigt litet, innehåll av lerpartiklar eller metalliska mineral ska per definition inte kunna ha förhöjd IP-effekt. En möjlig orsak till de erhållna resultaten är att moränen ställvis innehåller lera, vilket inte är orimligt eftersom den förekommer i direkt anslutning till lera. De höga resistivetsvärdena skulle då kunna förklaras av att moränen är torr.

Utifrån resistivetsmodellerna har två möjliga volymer (områden) med lera identifierats (se Figur 4-13). Detta har gjorts genom att i 3D-modellen ansätta tröskelvärden på resistiviteten i enlighet med de resistivetsvärden på glaciallera som erhöles vid laboriemätningarna. Förfaringssättet är förenklat och ger ingalunda någon unik tolkning över glaciallerans utbredning. Utifrån den information som finns tillgänglig är dock denna tolkning rimlig. Söder om gölen, där glaciallera påträffats i borrhål, förekommer ett möjligt område (cirka 40·20 m²) med glaciallera och norr om gölen förekommer ett annat område med en storlek på cirka 20·10 m². Mäktigheten på de indikerade lerområdena är enligt modellerna ungefär 1 m.

5.1 Dataleverans

Förutom denna rapport ingår följande dataleveranser till SKB:

- Inmätta koordinater med RTK-GPS (x,y,z) i RT90/RH70.
- Rådata resistivitet (*.s4k filer).
- Konverterade rådata resistivitet (*.dat filer).
- Konverterade och rensade filer resistivitet (*.data filer).
- Modellfiler resistivitet (*.inv).
- Exporterad 3D-modell för resistivitet (*.xyz).
- IP- och resistivetsdata från laboriemätningarna.