

Rapport
P-20-09
Januari 2020



Geofysiska mätningar med resistivitet och inducerad polarisation (IP) vid våtmarkerna 7, 14 och 18 i Forsmark

Håkan Mattsson

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1651-4416

SKB P-20-09

ID 1717257

Januari 2020

Geofysiska mätningar med resistivitet och inducerad polarisation (IP) vid våtmarkerna 7, 14 och 18 i Forsmark

Håkan Mattsson

GeoVista AB

Nyckelord: Geofysik, Resistivitet, Lera, Våtmark, AP SFK-19-005.

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

Data i SKB:s databas kan ändras av olika skäl. Mindre ändringar i SKB:s databas kommer inte nödvändigtvis att resultera i en reviderad rapport. Revideringar av data kan även presenteras som supplement, tillgängliga på www.skb.se.

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

© 2020 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

GeoVista AB har utfört geofysiska mätningar med resistivitets- och IP-metoden vid de tre våtmarkerna nr. 7, 14 och 18 söder om Forsmarks kärnkraftverk. Syftet med utförda mätningar var att kartlägga utbredning och tjocklek på det lager av gyttja/lera/lergyttja/gyttjelera som påträffats i anslutning till våtmarkerna. Sammanlagt gjordes mätningar längs 6 st profiler med vardera 80 m längd och med 1,0 m elektrodavstånd. Två parallella profiler med ett inbördes avstånd av 15–20 m mättes vid respektive våtmark. Arbetet har även omfattat utsättning/inmätning av mätprofiler i koordinatsystemen SWEREF 99 TM/RH 2000 samt bearbetning, tolkning och rapportering av resultaten.

Insamlade mätdata är av god kvalitet, vilket indikeras av hög utgående strömstyrka och låga standardavvikelser i enskilda mätpunkter. Täckningen av data längs mätprofilerna är också god, med ett snitt på 1 340 datapunkter per mätprofil. De modeller av markens resistivitetsfördelning som presenteras i denna rapport har en god anpassning till mätdata. De framtagna IP-modellerna har dock i regel dålig anpassning till mätdata, med absolutfel i intervallet 20–30 %. IP-modellerna ska därför i första hand betraktas övergripande och med försiktighet.

Resistivetsmodellerna vid de tre våtmarkerna är fysikaliskt och geologiskt rimliga. De ger med stor sannolikhet en god bild över variationer i markens elektriska egenskaper. Modellerna indikerar en tydlig gräns mellan vattenmättad och dränerad jord, det vill säga av grundvattenytans läge. Det föreligger tydliga skillnader i resistivitet mellan tolkad morän (stenig, grusig, blockig) och tolkad lera. Modellerna indikerar att det förekommer lera nära markytan vid alla tre våtmarkerna. Detta bekräftas också av preliminära resultat från jordartskartering som utförts av SGU under 2019. Det går dock inte att göra en entydig gränsdragning mellan vattenmättad torv, lera, gyttja och lerig morän. Vid våtmarkerna 14 och 18 når mätningarna ner till och i berg. Övergången mellan jord och berg är här tydlig och väldefinierad. Jorddjupet vid våtmark 14 bedöms i snitt vara 4–8 m och 3–6 m vid våtmark 18. Vid våtmark 7 når mätningarna inte ner till berg, vilket innebär att bergytan är belägen minst 15 m under marknivån.

IP-data är av god kvalitet men modellerna är dåligt anpassade. Det är därför osäkert i vilken grad modellerna tillför någon avgörande information till tolkningen. IP-modellerna över våtmark 7 indikerar hög IP-effekt som bitvis korrelerar bra med lera tolkad från resistivetsmodellerna. För våtmarkerna 14 och 18 finns dock ingen bra korrelation mellan avvikande låg resistivitet och förhöjd IP-effekt. Möjliga förklaringar är att de låga resistivetsvärdena vid våtmarkerna 14 och 18 inte orsakas av lera, eller så har leran här inte någon tydlig IP-effekt. För att ta reda på orsaken bör man borra eller gräva och ta prover i dessa områden.

Summary

GeoVista AB has carried out surveys with the techniques DC electric resistivity and induced polarisation (IP) at three wetlands denoted by SKB by numbers 7, 14 and 18, located south of the nuclear power plant at Forsmark. The aim of the investigations was to map the spatial distribution and thickness of regolith at the wetlands. The survey includes a total of six survey lines, 80 m long and with 1.0 m minimum electrode separation. Two parallel lines with 15–20 m separation were surveyed at each wetland. The work included line surveying (RTK-GPS, coordinate systems SWEREF 99 TM/RH 2000), geophysical field survey, data processing, inversion modelling, interpretation and reporting.

The quality of the collected data is high, which is indicated by strong output current and low standard deviation. The data coverage in average includes 1,340 data points per survey lines. The six resistivity models are geologically reliable and have a good fit to the collected data. However, the IP models show a poor fit with absolute errors in the range of 20–30 %. The IP models should therefore be evaluated with caution.

The resistivity models give a well-defined picture of the electrical properties of the soil. There is generally a distinct difference between saturated and unsaturated soil, which gives a good indication of the groundwater level. There are also significant differences in the electric properties between the moraine (with gravels and boulders) and the more conductive clay, peat and clayey moraine. Occurrences of clay is confirmed by soil mapping (SGU). However, it is not possible to make a clear distinction between clay, gyttja and peat based on the resistivity models. At the wetland No. 14 and 18 the models reach the solid bedrock and there is a distinct contrast between the soft soil and the bedrock. Depth to bedrock is 4–8 m at No. 14 and it is 3–6 m at No. 18. At No. 7 the measurements don't reach the bedrock, which indicates that the minimum depth to the top of bedrock is ca 15 m.

Despite the high quality of the collected IP data the poor fit of the estimated models to the data makes the interpretation uncertain. At the wetland No. 7 sections (volumes) with increased IP effect correlate fairly well with low resistivity, which supports the interpretation of a clay. At the other two wetlands, No. 14 and 18, there is no clear correlation. This could either indicate that the low resistivity sections that are identified, are not related to clay, or that the clay at these two sites doesn't have an IP effect. Digging of test pits or sample collection with drilling is suggested in order to increase the understanding of the geophysical models.

Innehåll

1	Introduktion	7
2	Metod	9
2.1	Petrofysiska egenskaper på lera	9
3	Utförande	11
3.1	Fältmätning av resistivitet och IP	11
4	Resultat och tolkningar	13
4.1	Inmätning av profiler	13
4.2	Kontroll av mätdata från fält	13
4.3	Våtmark 7 - tolkning av modeller	13
4.4	Våtmark 14 - tolkning av modeller	17
4.5	Våtmark 18 - tolkning av modeller	20
5	Diskussion och slutsatser	23
6	Dataleverans	25
	Referenser	27

1 Introduktion

GeoVista AB har utfört geofysiska mätningar med resistivitets- och IP-metoden (Parasnis 1997) vid tre våtmarker söder om Forsmarks kärnkraftverk (figur 1-1). Fältarbetet utfördes 8–10 april, 2019. Syftet med mätningarna är att kartlägga utbredning, jordlagerföljd och djup till bergvid våtmarkerna. Sammanlagt gjordes mätningar längs sex profiler med vardera 80 m längd och med 1,0 m elektrodavstånd. Två parallella profiler med ett inbördes avstånd av 15–20 m mättes söder om respektive våtmark, se figurerna 3-1 till 3-3 för detaljerade lägen. Arbetet har även omfattat utsättning/inmätning av profillinjerna i koordinatsystemen SWEREF99 TM/RH 2000 samt bearbetning, tolkning och rapportering av resultaten. Arbetena som rapporteras i denna rapport följer i stort samma mönster som de mätningar GeoVista utförde år 2013 vid våtmark med SKB-nummer 16 (Mattsson 2013), med den skillnad att föreliggande mätningar i huvudsak utförts på sidan om själva våtmarkerna med tillhörande gölar, inte tvärs över som vid mätningarna 2013.

Se tabell 1 för aktuell aktivitetsplan och metodbeskrivningar.



Figur 1-1. Karta med de aktuella våtmarkernas lägen och SKB-nummer. Streckade linjer indikerar lägena för profiler för resistivitets- och IP-mätningar. Våtmark 16, som mättes 2013, visas med gul rektangel.

Tabell 1-1. Aktivitetsplan och metodbeskrivning.

Namn	ID-nummer	Version
Resistivitetsmätningar i göl 7, 14 och 18	AP SFK-19-005	1.0
Metodbeskrivning för resistivitetsmätning	SKB MD 212.005	2.0

2 Metod

Vid resistivitetsmätningar (kallas också elektriska mätningar) mäts markens 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 marken hög motståndsförmåga (d.v.s. är dåligt ledande) och vice versa. Geofysiker talar ofta om markens resistivitet, vilket är detsamma som dess elektriska motstånd. För detaljerad information om metoden, se Parasnis (1997).

Resistivitet mäts i enheten ohm-m (Ωm). Den elektriska resistiviteten i marken kan variera inom stora intervall och genom att kartlägga de rumsliga variationerna i resistivitet kan man bygga upp en bild av markens strukturer. Med kännedom om olika geologiska materials resistivitet är det då möjligt att utifrån mätningar och modeller göra geologiska tolkningar. I lösa avlagringar är vatteninnehållet en mycket viktig parameter för resistiviteten. "Normalt" vatten har en resistivitet på ca 50–100 ohm-m, saltvatten kan ha resistivitet < 1 ohm-m och smältvatten i fjällen kan ha resistivitet $\gg 100$ ohm-m. Leror har ofta avvikande låg resistivitet i intervallet 1–150 ohm-m medan fuktig morän kan ha resistiviteter i intervallet 1 000–3 000 ohm-m (figur 2-1). Friskt kristallint berg (t.ex. granit) med obetydlig porositet har hög resistivitet ($> 10\,000$ ohm-m). Våt sand har ofta resistivitet i det ungefärliga intervallet 500–1000 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 s.k. inversionsteknik för att skapa 2D-modeller över resistivitet fördelningen. Modelleringen utfördes med hänsyn till rådande topografi och med s.k. robust inversion (L1-norm), se t.ex. Adiat et al. (2013). Geofysisk inversion är en process där en fysikalisk modell räknas fram för marken utifrån en uppsättning mätdata. I praktiken måste man alltid anta en förenklad geometri i modellen. Marken delas då upp i ett stort antal rektangulära celler. Cellernas resistivitet justeras sedan iterativt på ett sådant sätt att en teoretiskt beräknad respons till modellen stämmer överens med mätdata. Måttet på hur väl modellen är anpassad till data anges av ett absolutfel (L1-norm). Absolutfel $< 5\%$ är en mycket god anpassning, absolutfel 5–10 % är en god anpassning, absolutfel 10–15 % är en godkänd anpassning och absolutfel $> 15\%$ är en dålig anpassning. Ett absolutfel på $> 15\%$ betyder dock inte att modellen i sig är geologiskt dålig eller orimlig, däremot bör man i ett sådant fall undvika detaljerade tolkningar och i första hand utvärdera modellen mer generellt. Slutlösningen är inte unik utan beror på ett antal parametrar som styr algoritmen. För det aktuella arbetet användes programmet Res2DInv (GeoTomo Software Res2DInv 64, ver. 4.05, www.geotomo.com).

Inversionsmodellen är dock inte entydig och upplöser inte alltid det man eftersöker på ett önskat sätt. Olika typer av resistivitet fördelning i marken kan ge upphov till likartade anomalier (avvikelser) 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 inversionsresultaten värderas utifrån sin geologiska rimlighet och sin fysikaliska entydighet. Det är också därför mycket viktigt att man har tillgång till stödjande, oberoende information (t.ex. borrhålsloggar) i samband med tolkningen av modellerna.

I samband med resistivitetsmätningarna utfördes även IP-mätningar (inducerad polarisation). IP, som mäts i enheten mV/V, är också en elektrisk mätteknik som förenklat mäter markens förmåga att fungera som en kondensator. Metoden mäter hur den uppladdade spänningen minskar med tiden efter strömmen brutits. Vissa typer av lera, t.ex. kvicklera (Dahlin et al. 2013), har en tydlig IP-effekt och kan därför identifieras med denna metod.

2.1 Petrofysiska egenskaper på lera

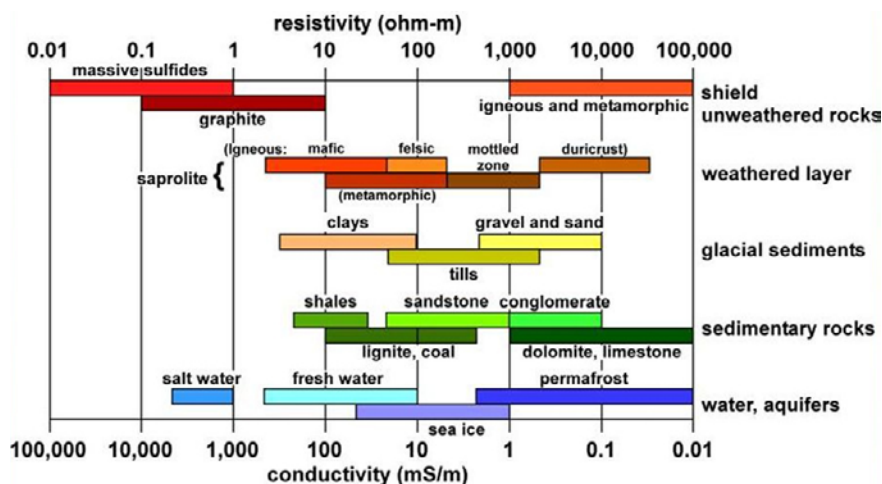
Många typer av lera är kända för att ha en hög elektrisk ledningsförmåga, dvs. låg resistivitet (se figur 2-1). I samband med mätningarna vid våtmark 16 år 2013 (Mattsson 2013, Werner et al. 2014) togs sex stycken prover på glaciallera för laboratoriemätningar av deras elektriska egenskaper. Data från mätningarna presenteras i tabell 2-1. Lerprovernans medelresistivitet var 88 ± 7 ohm-m, vilket är rimligt enligt figur 2-1, och IP-värdet var i medel 206 ± 52 mV/V. De uppmätta IP-värdena på

lerproverna är fullt rimliga och cirka 10–20 gånger högre än de IP-värden man kan förvänta sig för ”vanlig” moränjord (inklusive sand/grus). Leran bör alltså ge upphov till kraftiga anomalier i data från fältmätningarna.

Konduktivhetsmätningar på gölvatten vid våtmark 16, utförda av SKB den 20 maj 2013, indikerar att gölvattnets resistivitet då var cirka 40 ohm-m (Mattsson 2013). Det är således en viss skillnad i resistivitet mellan leran och vattnet, skillnaden är dock liten och det bedöms därför som svårt att skilja ut lera från vatten i resistivitetsdata från fältmätningar i aktuella miljöer.

Tabell 2-1. Resistivitets- och IP-data för sex prover på glaciärr från våtmark 16 (Mattsson 2013).

Prov nr	Resistivitet (ohm-m)	IP (mV/V)
1	82	157
2	93	230
3	95	306
4	79	196
5	84	195
6	96	152



Figur 2-1. Diagram som visar elektriska egenskaper för vissa geologiska material (Palacky 1987).

3 Utförande

3.1 Fältmätning av resistivitet och IP

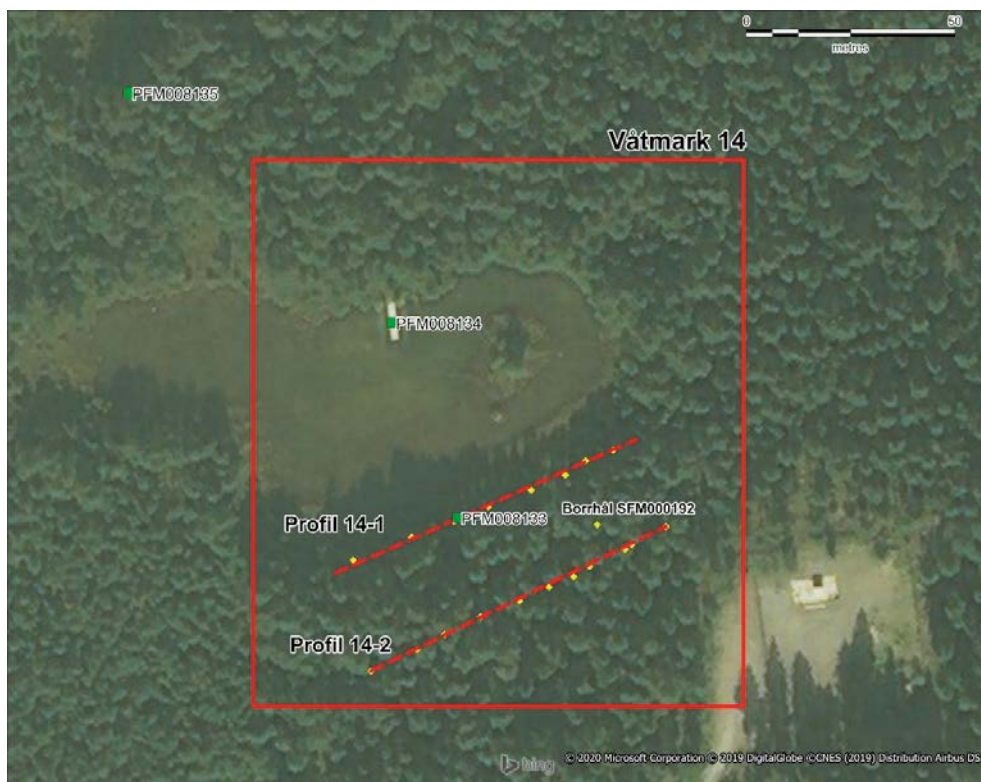
Samtliga resistivitets- och IP-mätningar utfördes av GeoVista AB med LUND Imaging System (ABEM), med 1,0 m elektrodavstånd enligt aktuell uppdragsbeskrivning och i enlighet med gällande metodbeskrivning (tabell 1-1). En multiledarkabel lades ut längs varje mätprofil och kopplades till elektroder (totalt 81 stycken per utlägg) samt till en resistivitetsmätare (Terrameter LS2). En förprogrammerad sekvens i instrumentet (så kallat gradientprotokoll) styrde hur ström skickades ut mellan vissa elektroder och hur spänningen mättes mellan andra för beräkning av resistiviteten på vissa djup och lägen längs profilerna. Under mätningen byggdes successivt en bild upp över hur markens elektriska egenskaper varierar ned till maximalt cirka 10 m djup. Totalt mättes sex stycken profiler (två profiler per våtmark) med avseende på resistivitet och IP (se figur 3-1 till 3-3). I figurerna visas även lägen för borrhål (Strömshag 2019) och provpunkter för jordartskartering som utförts under 2019 (Sohlenius et al. 2020).

Utsättningen av profilerna gjordes med handhållen GPS. Inmätningen (X, Y, Z) av mätprofilernas start- respektive slutpunkter samt av stödjande punkter däremellan utfördes med en RTK-GPS, typ Topcon GRS-1, i koordinatsystemen SWEREF 99 TM (X, Y)/RH 2000 (Z).

Längs alla profiler gjordes geologiska fältobservationer rörande bland annat blockighet, jordart och gräns mellan våtmark och fast mark. Dessa noterades i fältdagboken och användes vid den efterföljande tolkningen av modellerna (kapitel 4).



Figur 3-1. Karta över våtmark 7 som visar de två mätprofilernas geografiska lägen (röd streckade linjer) samt positionen på inmätta punkter (gula diamanter) och borrhål (gröna fyrkanter).



Figur 3-2. Karta över våtmark 14 som visar de två profilernas geografiska läge (röd streckade linjer) samt positionen på inmätta punkter (gula diamanter) och borrhål (gröna fyrkanter).



Figur 3-3. Karta över våtmark 18 som visar de två profilernas geografiska läge (röd streckade linjer) samt positionen på inmätta punkter (gula diamanter) och borrhål (gröna fyrkanter).

4 Resultat och tolkningar

4.1 Inmätning av profiler

Data från inmätningarna med RTK-GPS omfattar totalt 51 mätpunkter. Två av punkterna utgörs av inmätta borrhål (SFM000138 och SFM000192) och övriga punkter avser inmätning av mätprofiler. 39 av punkterna kunde mätas in med maximal noggrannhet, så kallad fix-lösning, vilket ger en absolut noggrannhet i storleksordningen 0,02–0,03 m i plan. Övriga tolv punkter är inmätta med så kallad float-lösning, vilken ger en sämre noggrannhet i plan (0,5–1 m).

I tabell 4-1 presenteras start/slutpunkter för de sex profilerna. Samtliga inmätta koordinater ingår i leveransen av data till SKB:s primärdatabas SICADA.

Tabell 4-1. Start- och slutkoordinater i plan (E, N; SWEREF 99 TM) och i höjd (Z; RH 2000) för mätprofiler.

Profilinje	Id-koder	Start, E (m)	Start, N (m)	Start, Z (m)	Slut, E (m)	Slut, N (m)	Slut, Z (m)
7-1	LFM1193	675412,3	6699367,8	2,5	675488,2	6699387,7	2,4
7-2	LFM1194	675417,7	6699350,5	3,1	675492,4	6699371,0	2,0
14-1*	LFM1195	675890,2	6699179,2	2,0	675961,1	6699214,9	2,0
14-2	LFM1196	675900,0	6699156,1	5,4	675969,1	6699194,2	3,6
18-1	LFM1197	675636,9	6698596,4	2,4	675709,2	6698563,7	2,5
18-2	LFM1198	675630,8	6698585,6	2,5	675703,5	6698551,9	2,6

*Koordinaterna är extrapolerade utifrån inmätta data. Start-/slutpunkterna kunde inte mätas in på grund av dåliga signalförhållanden för GPS.

4.2 Kontroll av mätdata från fält

Signalkvaliteten var mycket god i samband med mätningarna. Den utgående strömstyrkan var oftast 150–200 mA. Standardavvikelsen för enskilda mätvärden, dvs. variationen i upprepade mätningar i samma punkt, är i regel < 0,5 %. Vid själva mätningen 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 (text-fil). I samband med detta filteras samtliga negativa resistivitetsvärden bort eftersom dessa är fysikaliskt orimliga med det aktuella mätprotokollet. Totalt samlades 8 025 mätpunkter in med positiva resistivitetsvärden från de sex mätprofilerna (cirka 1 340 värden/profil). Från dessa data plockades totalt 600 värden (7,5 %) bort på grund av höga standardavvikelser, orimligt låg/hög resistivitet eller enstaka ”outliers”. Insamlade resistivitetsdata är generellt av god kvalitet. Detta indikeras av låga brusnivåer, bra signalstyrka, mjuka naturliga anomalier och få punkter med kraftigt avvikande ”orimlig” resistivitet. För IP-data är kvaliteten också bra, även om den inte är lika bra som för resistivitetsdata. 958 IP-värden (11,9 %), de flesta negativa, plockades bort ur datamängden.

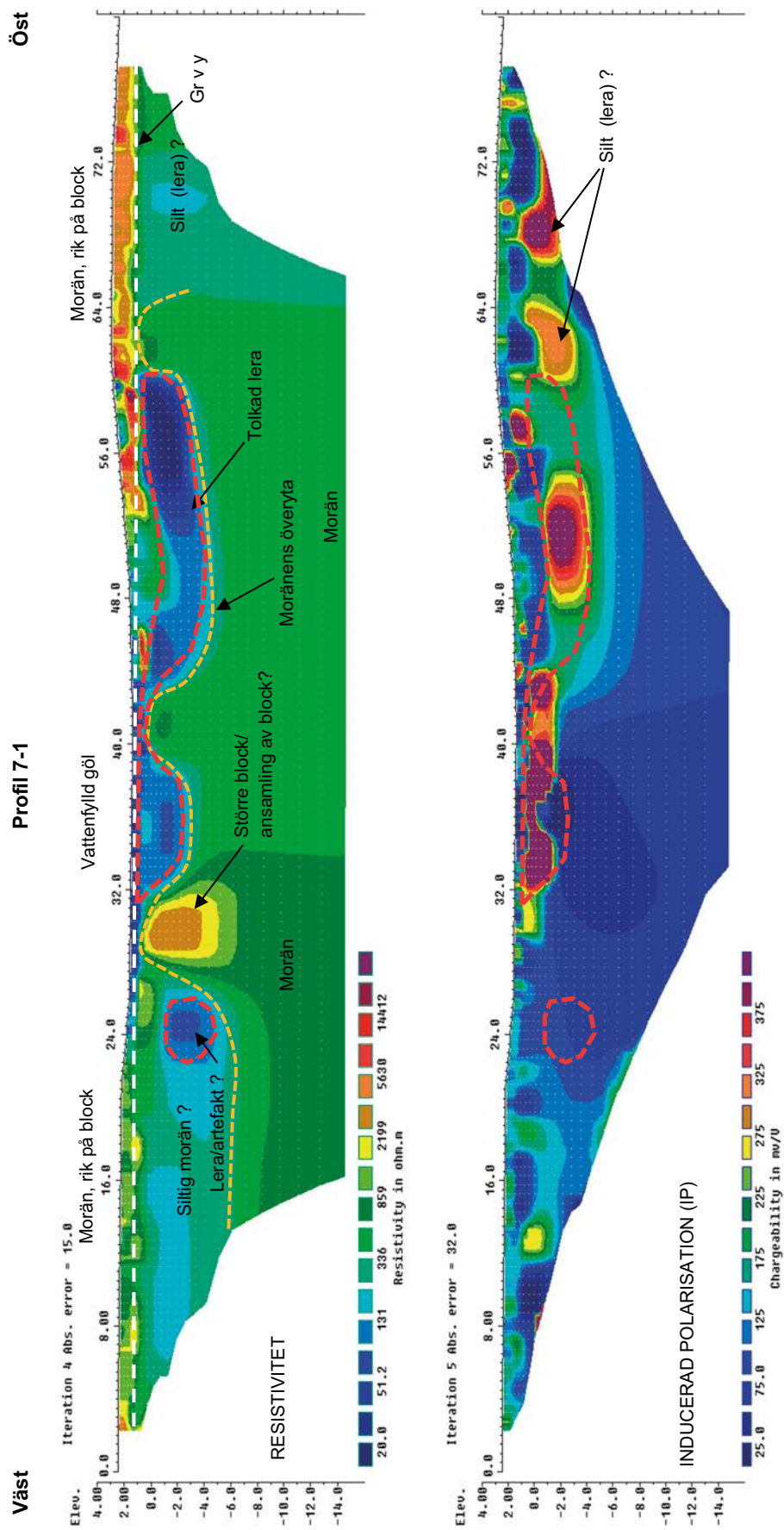
4.3 Våtmark 7 – tolkning av modeller

Våtmark 7 har en avlång form som sträcker sig i nord-sydlig orientering. De två mätprofilerna löper från väst mot öst över den södra delen av våtmarken (figur 3-1). Väster och öster om våtmarken består det övre markskiktet av morän som är rik på block. Moränjorden ligger topografiskt högre än våtmarken, som utgör en 1–2 m djup sänka i längdintervallet cirka 25–50 m. I gölen var markytan täckt av vatten då mätningarna utfördes.

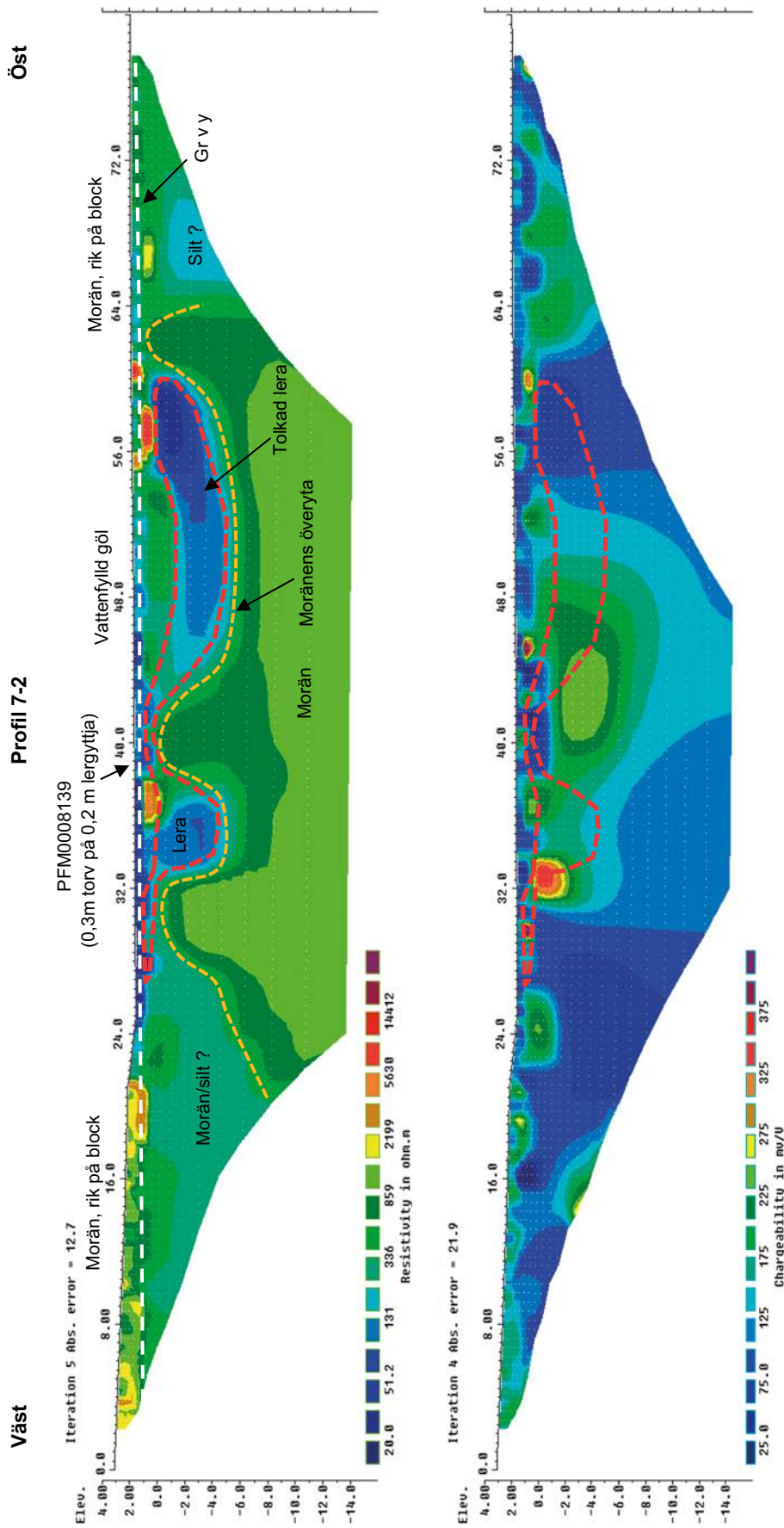
I figurerna 4-1 och 4-2 presenteras resistivitets- och IP-modeller för respektive mätprofil (resistivitet överst och IP underst). Tolkningen av geologiska lager baseras i huvudsak på resistivitetsmodellen, medan IP-modellen främst använts som ett stöd för utvärderingen av den tolkade lerans elektriska egenskaper. Därför står alla tolkningskommentarer i figurerna enbart inskrivna på resistivitetsmodellerna.

Modell Anpassningen för de två resistivitetsmodellerna är godkänd, med absolutfel (L1 norm) på 12,7 % respektive 15,0 %. De två IP-modellerna uppvisar sämre anpassning till data. Modellerna för de två profilerna uppvisar en likartad samstämmig resistivitetsfördelning. Resistivitetsmodellerna indikerar ett 1–2 m mäktigt, dränerat högresistivt moränlager öster och väster om våtmarken. Grundvattenytan ser ut att ligga i nivå med gölens yta, ca 1 m (RH 2000) Mitt under gölen, och öster om gölen, förekommer en volym med mycket låga resistivitetvärden (< 100 ohm-m) som tolkas som lera (alt. gyttja, lergyttja eller gyttjelera). Detta stöds av resultat från jordartskartering som utfördes av SGU under 2019 (Sohlenius et al. 2020), med torv ovan lergyttja i provtagningspunkten PFM008139. Volymen sträcker sig från cirka 30 m till 60 m profillängd och har en mäktighet som varierar mellan 1 och 4 m (–4 till +1 m, RH 2000). Notera att båda resistivitetsmodellerna indikerar samma form på lervolymen. Det är också möjligt att det rör sig om två skilda volymer som skiljs från varandra av en mindre ”moränrygg” vid 40 m profillängd. Låga resistivitetvärden (150–200 ohm-m) förekommer även under grundvattenytan väster och öster om den tolkade leran. Dessa volymer tolkas som morän med förekomst av silt. I botten, under nivå cirka –6 till –2 m, förekommer ett lager med förhöjda resistivitetvärden i intervallet 200–1 000 ohm-m, vilket tolkas indikera morän. Ingen av modellerna når ner till berg, vilket innebär att bergytan är minst 15 m under marknivån.

IP-modellen för mätprofil 7-1 indikerar en volym (eller ett lager) med kraftigt förhöjda IP-värden som sammanfaller ganska väl med den tolkade leran, de förhöjda IP-värdena fortsätter dock längre österut in i det som tolkas vara siltig morän. För mätprofil 7-2 indikerar IP-modellen även här förhöjda IP-värden över gölen, och österut, men korrelationen till de låga resistivitetvärdena är sämre än för mätprofil 7-1.



Figur 4-1. Resistivitetsmodell (överst) och IP-modell (nederst) för mätprofil 7-1.



Figur 4-2. Resistivitetmodell (överst) och IP-modell (nederst) för mätprofil 7-2.

4.4 Våtmark 14 – tolkning av modeller

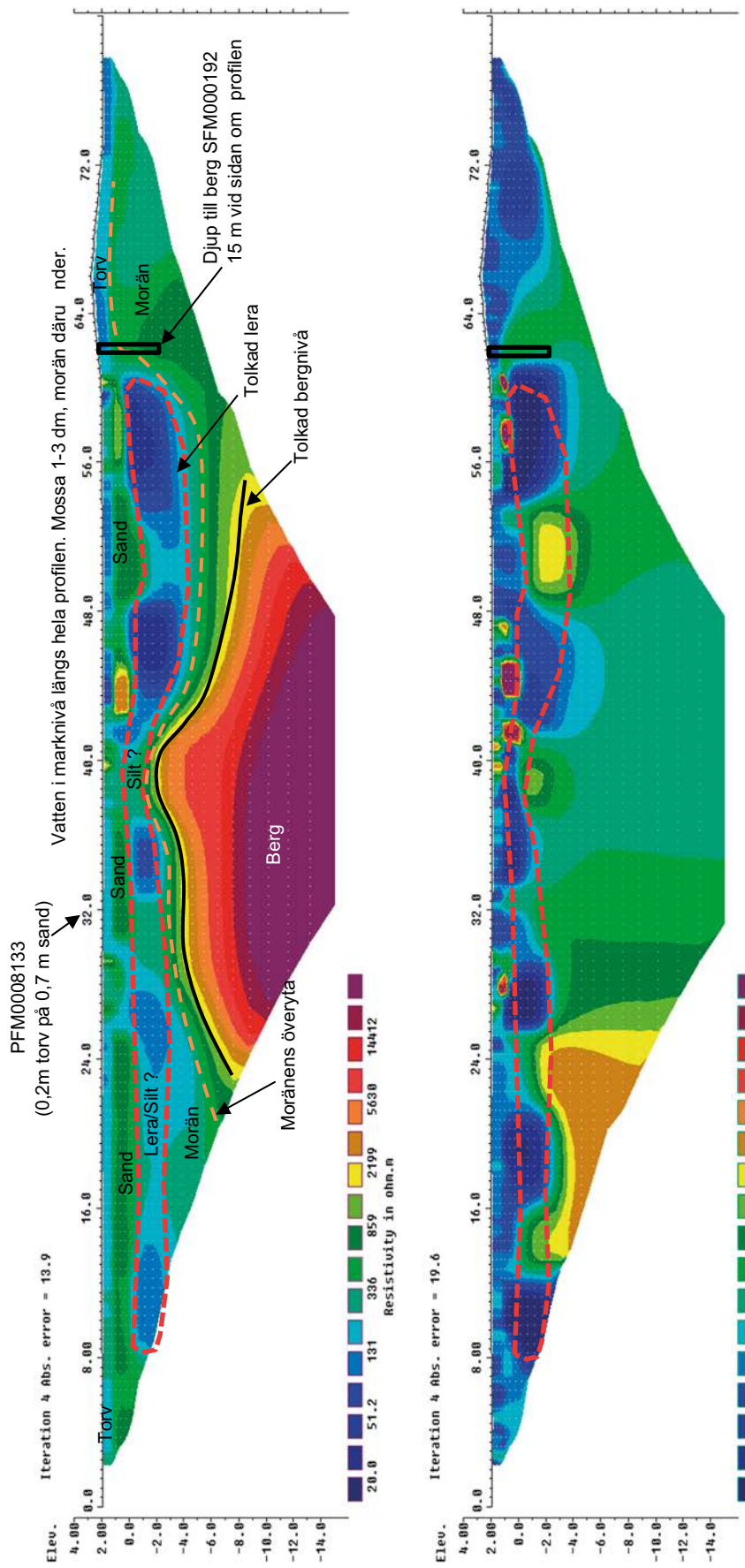
Våtmark 14 har en något avlång form i väst-östlig riktning. De två mätprofilerna löper från sydväst mot nordöst längs den södra stranden till våtmarken (figur 3-2). Den nordligaste mätprofilen 14-1, som löper närmast gölen, har nästan helt horisontell topografi. Det översta markskiktet utgörs här av 0,1–0,3 m mäktig torv som vid mätningarnas utförande var täckt av vatten. Fastare mark (sand i provtagningspunkten PFM008133, enligt preliminära resultat från 2019 års jordundersökningar (Sohlenius et al. 2020) kunde kännas under mossan med elektrodspetten. Den södra mätprofilen 14-2 löper i humusrik, blockfattig skogsmark (grov gammelskog). Den södra mätprofilen uppvisar större topografiska variationer jämfört med den norra .

I figurerna 4-3 och 4-4 presenteras resistivitets- och IP-modeller för respektive mätprofil (resistivitet överst och IP underst). På samma sätt som för våtmark 7 (avsnitt 4.3) så baseras tolkningen av geologiska lager i huvudsak på resistivitetsmodellerna, medan IP-modellerna främst använts som ett stöd för utvärderingen av den tolkade lerans elektriska egenskaper. Därför står alla tolkningskommentarer i figurerna enbart inskrivna på resistivitetsmodellerna.

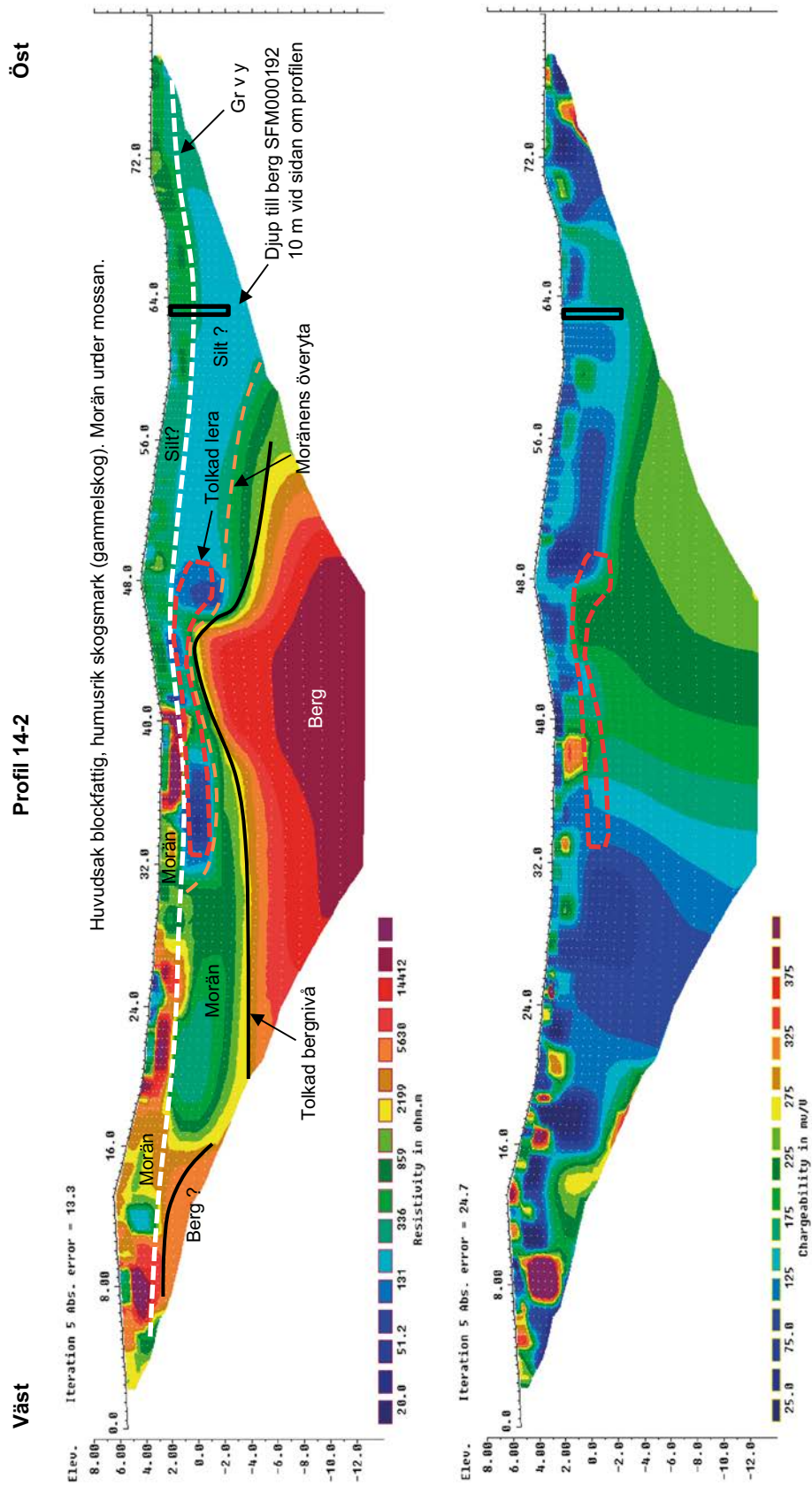
Modellanpassningen för de två resistivitetsmodellerna är godkänd, med absolutfel på 13,9 % respektive 13,3 % (L1 norm). De två IP-modellerna uppvisar sämre anpassning till data. För den norra mätprofilen 14-1, indikerar resistivitetsmodellen mycket låga resistiviteter (< 100 ohm-m) i ett cirka 2–4 m mäktigt lager från cirka 30 m till 60 m profillängd (nivå 0 till –4 m, RH 2000). Redan nära starten av mätprofilen och fram till 30 m profillängd förekommer dock avvikande låga resistivitetsvärden (100–150 ohm-m) på samma nivå. Detta kan indikera att det finns ett sammanhängande lerlager längs med nästan hela mätprofilen, alternativt att det rör sig om morän med varierande inslag av silt och/eller lera. Notera att modellen indikerar att det tolkade lerlagret överlagras av ett tunt lager med relativt höga resistivitetsvärden (sannolikt morän), men att det närmast markytan förekommer låga resistiviteter (sannolikt vattenmättad moss). Resistivitetsmodellen indikerar en tydlig övergång till berg, med bergöverytan på nivå –3 till –8 m (RH 2000). IP-modellen för mätprofil 14-1 ger inget stöd för det tolkade lerlagret. Tvärtom domineras lagret av avvikande låga IP-värden, vilket kan tyda på att det inte är lera, eller att det rör sig om en annan typ av lera jämfört med den som förekommer vid våtmark 7.

Resistivitetsmodellen för den södra profilen 14-2 indikerar högresistiv (torr) morän närmast markytan från 0 m till 40 m profillängd. Från 40 m till 80 m uppvisar modellen ett övre lager med betydligt lägre resistivitet. Grundvattenytan ser ut att följa topografin och ligger ca 2 m under marknivån (ca 2 ± 1 m.ö.h.). Längs profilintervallet 30 – 50 m förekommer fyra mindre volymer med avvikande låg resistivitet (sammandragna till en enhet i figur 4-4) som kan indikera förekomst av lera. Öster om det tolkade lerlagret förekommer det avvikande låga resistivitetsvärden (100 – 150 ohm-m) som indikerar att det kan vara ett sammanhängande lerlager längs med sista halvan av profilen, alternativt att det rör sig om morän med varierande inslag av silt och/eller lera. Resistivitetsmodellen indikerar en tydlig övergång till berg och att bergnivån ligger på 0 till –4 m.ö.h. IP-modellen för profil 14-2 ger, precis som för profil 14-1, inget stöd för det tolkade lerlagret.

Profil 14-1



Figur 4-3. Resistivitetmodell (överst) och IP-modell (nederst) för mätprofil 14-1.



Figur 4-4. Resistivitetmodell (överst) och IP-modell (nederst) för mätprofil 14-2.

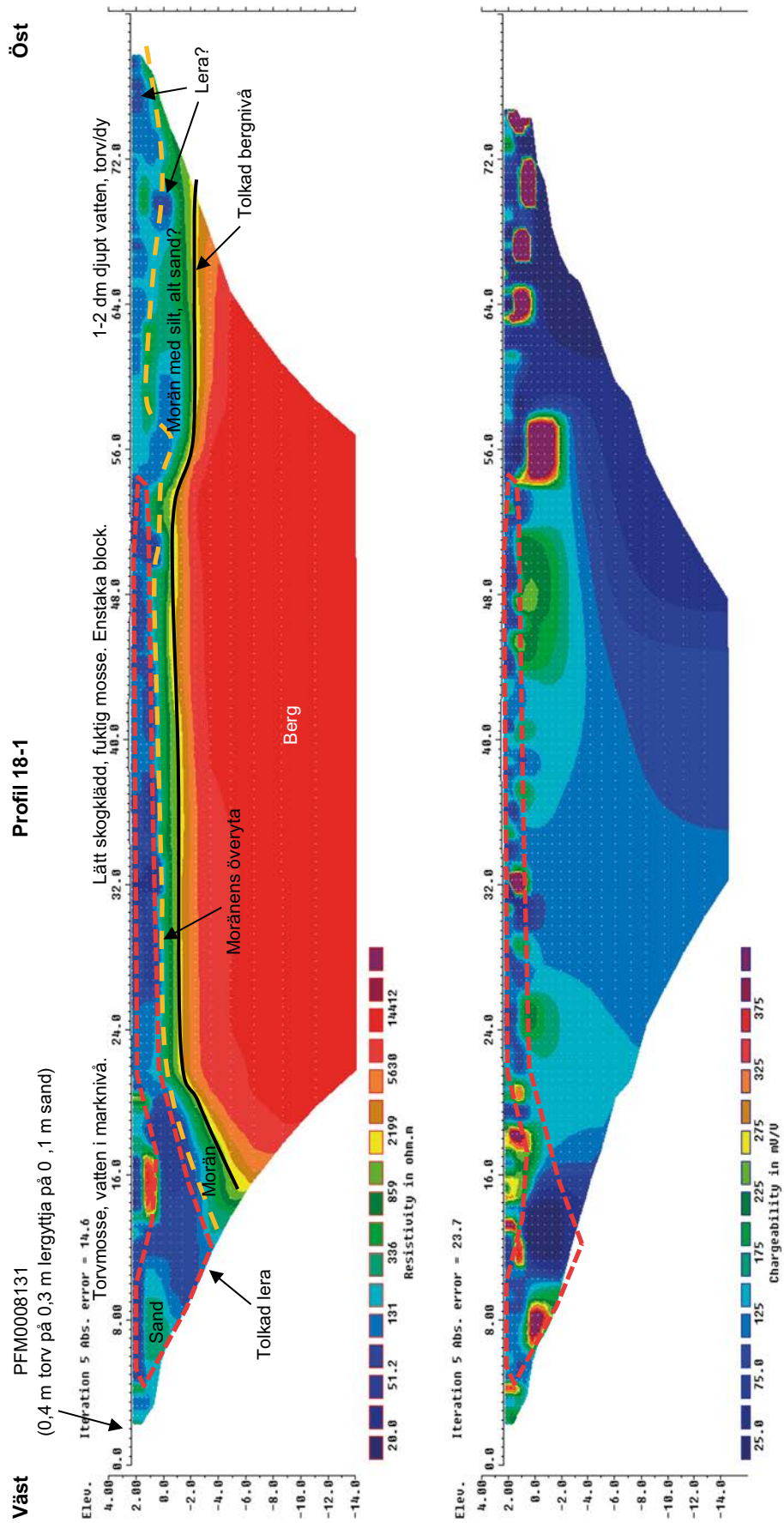
4.5 Våtmark 18 – tolkning av modeller

Våtmark 18 har en nästan rektangulär form i nordväst-sydöstlig riktning. De två mätprofilerna vid våtmarken löper från nordväst mot sydöst längs den södra stranden till våtmarken (figur 3-3). Den norra mätprofilen 18-1, som löper närmast gölen, har nästan helt horisontell topografi. Delsträckan 0–30 m domineras av torvmosse med vatten i marknivå, delsträckan 30–54 m består av lätt skogbeklädd fuktig mosse (enstaka block) och delsträckan 54–80 m består av vattenmättad mossa/dy. Den södra mätprofilen 18-2 löper över vattenmättad mossa från 0 m till 26 m profillängd, profillängd 26–75 m domineras av morän med enstaka block, och slutet av mätprofilen består av vattenmättad mossa. Den södra mätprofilen uppvisar endast små topografiska variationer.

I figurerna 4-5 och 4-6 presenteras resistivitets- och IP-modeller för respektive mätprofil (resistivitet överst och IP underst). På samma sätt som för våtmarkerna 7 och 14, så baseras tolkningen av geologiska lager och enheter i huvudsak på resistivitetsmodellerna, medan IP-modellerna främst använts som ett stöd för utvärderingen av den tolkade lerans elektriska egenskaper.

Modellanpassningen för de två resistivitetsmodellerna är godkänd med absolutfel på 14,6 % respektive 9,9 % (L1 norm). De två IP-modellerna uppvisar sämre anpassning till data. För den norra mätprofilen 18-1 indikerar resistivitetsmodellen mycket låga resistiviteter (< 100 ohm-m) i ett cirka 2–4 m mäktigt lager från starten av mätprofilen fram till cirka 55 m profillängd (nivå –2 till 2 m, RH 2000). Lagret ser ut att bli tunnare mot sydost och från 55 m profillängd fram till mätprofilens slut är resistivitetensvärdena generellt något högre (100–150 ohm-m) i de översta 4–5 m av jordlagren. Detta kan tyda på morän med inslag av lera och/eller silt. Enligt resultat från SGU:s jordundersökningar 2019 (Sohlenius et al. 2020) finns i provtagningspunkt PFM008131 ett 0,3 m mäktigt lager med lergyttja under ett 0,4 m mäktigt lager med torv, och därunder förekommer sand. Under det tolkade lerlagret indikerar modellen ett tunt (mäktighet 1–3 m) moränlager som vilar på homogent, högresistivt berg. Bergöverytan är på nivån –1 till –3 m (RH 2000) längs mätprofilen. IP-modellen för mätprofil 18-1 ger inget stöd för det tolkade lerlagret; tvärtom domineras lagret av avvikande låga IP-värden, vilket kan tyda på att det inte är lera, eller att det rör sig om en annan typ av lera jämfört med den som förekommer vid våtmark 7.

Resistivitetsmodellen för den södra mätprofilen 18-2 påminner i stora drag om modellen för mätprofil 18-1. Från starten av mätprofilen i nordväst fram till cirka 35 m profillängd uppvisar modellen ett 2–3 m mäktigt, lågresistivt lager (< 100 ohm-m) som tolkas utgöras av lera. Från 35 m profillängd till mätprofilens slut är det högre resistivitetensvärden i jorden, 100–300 ohm-m, vilket tolkas som morän med inslag av silt. Övergången till fast berg är väldefinierad och bergöverytan är på nivå-intervallet –4 till 0 m (RH 2000). IP-modellen för mätprofil 18-2 ger heller inget stöd för det tolkade lerlagret; tvärtom domineras lagret av avvikande låga IP-värden.

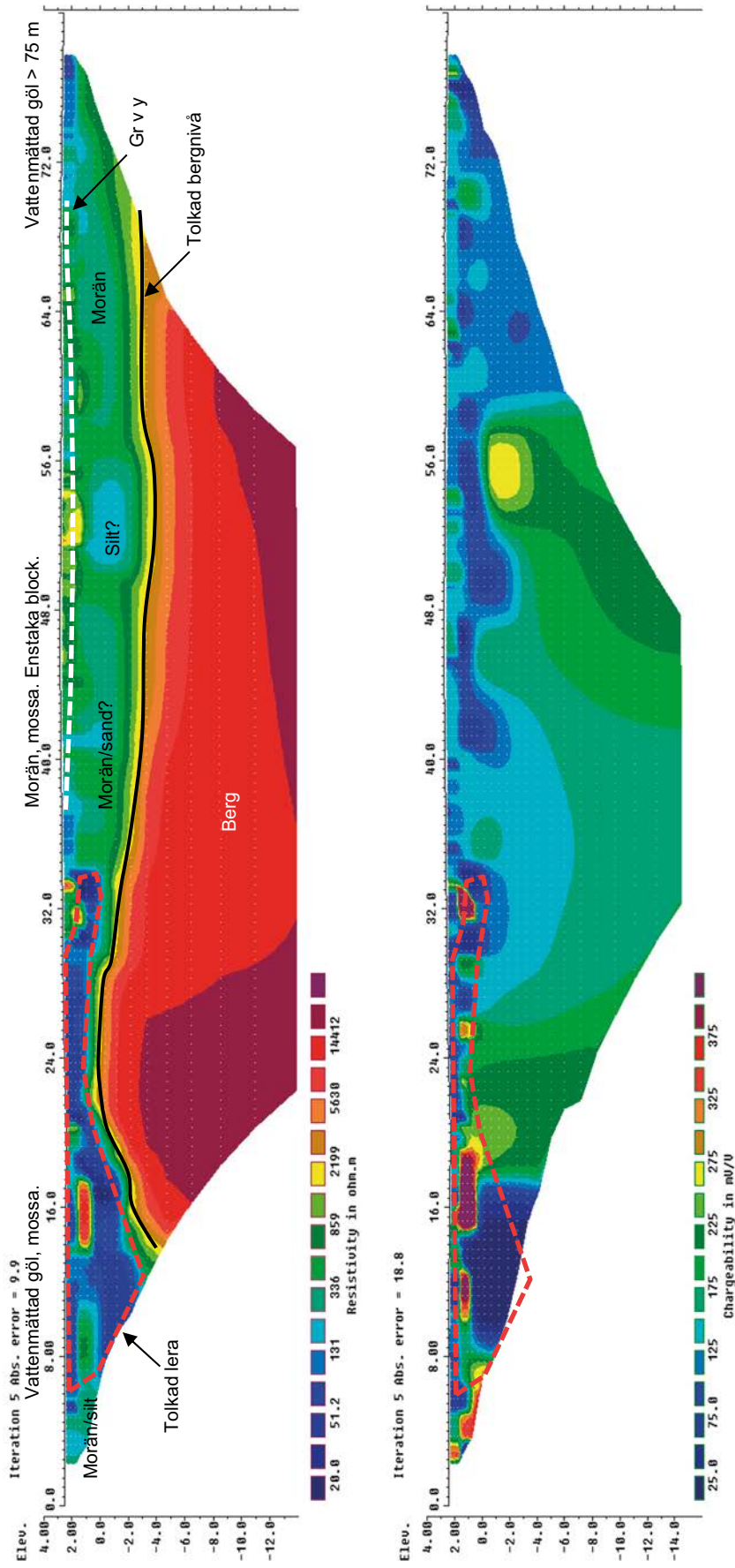


Figur 4-5. Resistiviteitsmodell (överst) och IP-modell (nederst) för mätprofil 18-1.

Öst

Profil 18-2

Väst



Figur 4-6. Resistivitetsmodell (överst) och IP-modell (nederst) för mätprofil 18-2.

5 Diskussion och slutsatser

Insamlade mätdata är av god kvalitet, vilket indikeras av hög utgående strömstyrka och låga standardavvikelser i de enskilda mätpunkterna. Täckningen av data längs profilerna är också den god, med ett snitt på 1 340 datapunkter per mätprofil. De modeller av markens resistivitetsfördelning som presenteras i denna rapport har en godkänd anpassning till mätdata, med absolutfel i intervallet 10–15 %. Anpassningen är dock inte av högsta kvalitet. Orsakerna till dålig modellenpassning kan vara flera, såsom brusiga data, kraftiga variationer i markens ledningsförmåga, störningar från elektriska installationer och/eller ”3D-effekter”, det vill säga jordvolymen med kraftigt avvikande ledningsförmåga och som är vid sidan om mätprofilen. I detta fall kan vi sannolikt utesluta samtliga av dessa orsaker, med undantag för vissa ytliga variationer i resistivitet samt omnämnda 3D-effekter, där den sistnämnda sannolikt är huvudorsaken. Mätprofilerna vid våtmarkerna 14 och 18 passerar nära respektive våtmark. Våtmarkernas sediment har mycket god elektisk ledningsförmåga jämfört med den omgivande moränen. Detta påverkar det elektriska fältet och medför att en stor del av strömmen vid mätningen koncentreras vid sidan av själva mätprofilen. Eftersom modelleringen görs i 2D kan ingen hänsyn tas till den här typen av ”sidoeffekter”. Mätprofilerna vid våtmark 7 passerar tvärs över våtmarken, vilket borde minska 3D-effekten från gölen. Trots detta har även de två modellerna för våtmark (en per mätprofil) förhöjda absolutfel. En förklaring till detta är att även om mätprofilerna korsar våtmarken, så görs passagen i våtmarken södra ände. Detta innebär att huvuddelen av våtmarkens volym ligger norr om mätprofilerna.

Alla resistivitetsmodeller som presenteras i denna rapport har således godkända anpassningar, men man bör inte lägga alltför stor vikt vid enskilda mindre anomalier. De framtagna IP-modellerna har i regel dålig anpassning till mätdata, med absolutfel i intervallet 20–30 %. Detta är dock inte så förvånande, eftersom IP-effekten är betydligt mer störningskänslig jämfört med resistivitetsmätningar. IP-modellerna ska därför i första hand betraktas övergripande och med försiktighet.

Resistivitetsmodellerna vid de tre våtmarkerna är fysikaliskt och geologiskt rimliga. De ger med stor sannolikhet en god bild över variationer i markens elektriska egenskaper. De geologiska tolkningar som presenteras i avsnitten 4.3, 4.4 och 4.5 baseras i huvudsak på en allmän erfarenhet och på resultaten från 2013 års undersökningar (Mattsson 2013), där data från flera borrhål fanns att tillgå. Modellerna indikerar en tydlig gräns mellan vattenmättad och dränerad jord, det vill säga grundvattenytans läge. Det föreligger tydliga skillnader i resistivitet mellan tolkad morän (stenig, grusig, blockig) och tolkad lera. Modellerna indikerar att det förekommer lera nära markytan vid alla tre våtmarkerna. Det går dock inte att göra en entydig gränsdragning mellan vattenmättad torv, lera och lerig morän. Vid våtmarkerna 14 och 18 når mätningarna ner till och i berg. Vid våtmarkerna 14 och 18 är övergången mellan jord och berg tydlig och väldefinierad. Jorddjupet vid våtmark 14 bedöms i snitt vara 4–8 m, och 3–6 m vid våtmark 18. Vid våtmark 7 når inte mätningarna ner till berg, vilket tyder på ett minsta jorddjup på ca 15 m.

De tre provpunkter med jordartskartering (PFM008131, -8133 och -8139) som förekommer längs resistivitets- och IP-profilerna är grunda (< 1 m), men stödjer tolkad förekomst av lera (leryttja) enligt resistivitetsmodellerna. Av de två borrhål (SFM000138 och SFM000192) som förekommer vid våtmarkerna 7 och 14 finns dokumenterad kartering av SFM000138. Hålet är mindre än 1,0 m djupt och tillför därför ingen avgörande information till föreliggande geologiska och geofysiska tolkningar. För borrhålet SFM000192 (kallas även QFM298 i Strömshag 2019) finns en tolkad bergnivå från en JB2-sondering som ger ett jorddjup på cirka 4,5 m. Jorddjupet är mäktigare än så enligt de elektriska modellerna, som indikerar morän där JB2 indikerar berg. Lagertjocklekarna som indikeras i resistivitetsmodellerna kan därför vara något överdrivna, alternativt är moränen i området mycket hård. Borrhålet SFM000192 ligger dessutom nära slutet av profilerna, där det inte är full djupnedträngning, samt 10–15 m vid sidan om profilerna, vilket gör en koppling mellan modellerna och borresultaten mer osäker.

Mitt under och öster om gölen vid våtmark 7 förekommer i båda mätprofilerna en volym med mycket låga resistivitetvärden (< 100 ohm-m) som tolkas indikera lera. Volymen sträcker sig från cirka 30 m till 60 m profillängd och har en mäktighet som varierar mellan 1 och 4 m.

För den norra mätprofilen vid våtmark 14 (mätprofil 14-1), indikerar resistivitetsmodellen ett cirka 2–4 m mäktigt lager med lera från cirka 30 till 60 m profillängd och som ligger under lager med torv och sand. Redan nära mätprofilens start och fram till 30 m profillängd förekommer dock avvikande låga resistivitetvärden (100–150 ohm-m) på samma höjdnivå. Detta kan indikera att det är ett sammanhängande lerlager längs med nästan hela mätprofilen, alternativt att det rör sig om morän med varierande inslag av silt och/eller lera. Längs profillängd 30–0 m av den södra mätprofilen (mätprofil 14-2) förekommer fyra mindre volymer med avvikande låg resistivitet och som kan indikera förekomst av lera.

För den norra mätprofilen vid våtmark 18 (mät18-1), indikerar resistivitetsmodellen ett cirka 2–4 m mäktigt lerlager från mätprofilens start fram till cirka 55 m profillängd. Lerlagret ser ut att bli tunnare mot sydost, och från 55 m profillängd till mätprofilens slut är resistivitetvärdena generellt något högre (100–150 ohm-m) i de översta 4–5 m av jordlagren. Detta kan tyda på morän med inslag av lera och/eller silt. Resistivitetsmodellen för den södra mätprofilen 18-2 påminner i stora drag om modellen för mätprofil 18-1. Från mätprofilens start i nordväst fram till cirka 35 m profillängd uppvisar modellen ett 2–3 m mäktigt, lågresistivt lager (< 100 ohm-m), vilket tolkas som lera.

IP-data är av god kvalitet men modellerna är dåligt anpassade. Det är därför osäkert i vilken grad modellerna tillför någon avgörande information till tolkningen. IP-modellerna för mätprofilerna 7-1 och 7-2 indikerar höga IP-effekter som bitvis korrelerar bra med lera tolkad från resistivitetsmodellerna. För våtmarkerna 14 och 18 finns dock inga bra korrelationer mellan avvikande låg resistivitet och förhöjd IP-effekt. Möjliga förklaringar till detta är att de låga resistivitetvärdena vid våtmarkerna 14 och 18 inte orsakas av lera, eller så har leran i dessa fall inte någon tydlig IP-effekt. För att ta reda på orsaken bör man borra eller gräva och ta prover i dessa områden.

6 Dataleverans

Förutom denna rapport i Word- och pdf-format, har även följande levererats till SKB:

- Inmätta koordinater med RTK-GPS (X, Y, Z) i koordinatsystemen SWEREF 99 TM/RH 2000.
- Rådata resistivitet och IP (*.txt filer).
- Konverterade och rensade filer med resistivitetsvärden (*.dat filer).
- Konverterade och rensade filer med IP-data (*.dat).
- Modellfiler för resistivitet (*.inv).

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Adiat K A-N , Nawawi M N M, Abdullah K, Ishola K S, Abdurahman A, 2013. Effects of electrode spacing and inversion techniques on the efficacy of 2-D resistivity imaging to delineate subsurface features. *American Journal of Applied Sciences* 10, 64–72.

Dahlin T, Löfroth H, Schälin D, Suer P, 2013. Mapping of quick clay using geoelectrical imaging and CPTU-resistivity. *Near Surface Geophysics* 11, 659–670.

Mattsson H, 2013. Projekt Kärnbränsleförvaret. Resistivitetmätning vid våtmark 16 i Forsmark. SKB P-13-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Palacky G J, 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. I Nabighian M N (red). *Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 1, Theory.* Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists. (Investigations in geophysics 3), 53–130.

Parasnis D S, 1997. Principles of applied geophysics. 5. uppl. London: Chapman & Hall.

Sohlenius G, Becher M, Boman A, 2020. Regolith in wetlands with high nature values - Physical and chemical properties. SKB P-20-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Strömhag M, 2019. Installation GV-rör. Markteknisk undersökningsrapport/Geoteknik. Sveco Civil AB. SKBdoc 1877396 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Werner K, Mårtensson E, Nordén S, 2014. Kärnbränsleförvaret i Forsmark. Pilotförsök med vattentillförsel till en våtmark. SKB R-14-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

skb.se