



Sveriges geologiska undersökning

Geofysiska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment

Geofysiska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment

Slutrapport



**Gustav Sohlenius, Lena Persson
& Mehrdad Bastani**

Sammanfattning

Syftet med detta projekt har varit att ta reda på om geoelektriska fältmätningar kan användas för att avgränsa sulfidhaltiga sediment i djup- och ytled.

I både Sverige och Finland finns stora arealer med postglaciala sediment vilka innehåller järnsulfider (tex FeS och FeS_2). Dessa sediment finns främst i områden som efter den senaste istiden legat under Östersjöns nivå men som genom den allttjämt pågående landhöjningen torrlagts. I samband med byggnationer eller för att möjliggöra uppodling sänks ofta grundvattenytan varvid järnsulfiderna oxiderar, vilket ofta leder till en kraftig sänkning av pH. Den jordmån som bildas efter oxidation av sulfidhaltiga sediment brukar kallas sur sulfatjord. De sura förhållandena leder till en ökad kemisk vittring vilket gör att toxiska metaller (tex Ni och Cd) kan mobiliseras. Det finns då risk att för växter och djur skadliga mängder av dessa metaller nå bäckar och sjöar.

I Mälardalen sammanfaller förekomsterna av sulfidhaltiga sediment ofta med områden som på jordartskartorna klassificerats som gyttjelera. Längs Norrlandskusten förekommer sulfidmineral främst i gyttjiga siltiga sediment.

Ett tidigare projekt har visat att det i många regioner går att använda SGUs jordartsinformation tillsammans med resultat från de biogeokemiska och geofysiska karteringarna för att identifiera förekomster av sulfidhaltiga sediment. Områden med sulfidhaltiga sediment framträder ofta som lågresistiva områden på flyggeofysik kartor. Dessa kartor ger dock endast en översiktlig bild av var sulfidjordarna förekommer. Målsättningen med detta projekt har därför varit att hitta geoelektriska metoder som kan användas för att med större noggrannhet avgränsa områden sulfidhaltiga sediment. Studien har inriktats på tre region, ett i Västerbotten, ett i Mälardalen och ett i Norrbotten. Inom varje region har undersökningar utförts på flera platser. På samtliga lokaler har tidigare stratigrafiska undersökningar utförts vilka visar på förekomster av sulfidhaltiga sediment.

Inom detta projekt har vi använt följande geoelektriska metoder: *I*) Elektrisk mätning med Lund Imaging System, *II*) RMT (radiomagnetotellurik), *III*) OhmMapper, *IV*) Resistivitetsond.

Våra resultat visar att utbredningen av sulfidhaltiga sediment sammanfaller med områden som har låg elektrisk resistivitet. Resultaten visar att det är fullt möjligt att med geoelektriska metoder avgränsa de sulfidhaltiga sedimenten från omkringliggande sulfidfria jordarter. Resultaten från de olika metoderna visade god överensstämmelse. För att säkerställa att sulfidhaltiga sediment förekommer i ett visst område är det dock alltid nödvändigt att utföra stratigrafiska undersökningar och analyser av jordarternas svavelhalt. De sulfidhaltiga sedimentens utbredning kan därefter avgränsas med geoelektriska metoder.

De sulfidhaltiga sedimenten längs Norrlandskusten har högre resistivitet än motsvarande sediment längre söderut kring Mälardalen. Det är möjligt att detta beror på att sedimenten kring Mälardalen innehåller relativt höga halter av lermineral vilka bidrar till en låg resistivitet.

Det har inte varit möjligt att i denna undersökning fastställa varför de sulfidhaltiga sedimenten har lägre resistivitet än andra finkorniga jordarter. Undersökningar från Finland har dock visat att porvattnet i sulfidhaltiga sediment innehåller höga koncentrationer av klorid. Det är därför möjligt att den främsta orsaken till den låga resistiviteten hos dessa sediment är höga koncentrationer av salt i porvattnet, vilket är en effekt av att de en gång avsatts i bräckt vatten.

Abstract

The aim of this project has been to evaluate the possibility to use geoelectrical methods to delineate the depth and surface extension of sulphidic sediments.

In both Sweden and Finland there are large areas with post-glacial sediments containing iron sulphides (e.g. FeS and FeS₂). These sediments are most common in areas, which was covered by water after the latest deglaciation and has become land due to the ongoing land upheaval. The groundwater table in areas with sulphidic sediments is often lowered in connection with construction works or to obtain arable land. That causes oxidation of the iron sulphides, which in turn often causes a significant lowering of soil pH. The soil type formed after oxidation of sulphidic sediments is called Acid sulphate soil. The acid conditions cause increased chemical weathering and thereby mobilisation of toxic trace elements (e.g. Ni and Cd). There is a risk that for animals and plants dangerous quantities of these elements reach watercourses and lakes.

The sulphidic sediments around Lake Mälaren (Middle Sweden) often occur in areas, which has been classified as gyttja clay on the map of Quaternary deposits. Along the coast of northern Sweden sulphide minerals commonly occur in silty gyttja sediments.

An earlier project has shown that it is often possible to use SGUs maps of Quaternary deposits together with the biogeochemical and geophysical maps in order to delineate areas with sulphidic sediments. Areas with sulphidic sediments are recognised as areas with low resistivity on the geophysical maps. However, these maps can only be used to obtain an overview of the occurrences of sulphidic sediments. The aim of the present project has therefore been to study geoelectrical methods, which can delineate sulphidic sediments with a high precision. The study has focused on three regions, one close to Lake Mälaren, one in Västerbotten and one in Norrbotten. Several sites have been investigated in each region. There are earlier stratigraphical studies from the investigated sites showing the occurrence of sulphidic sediments.

The following geoelectrical methods were used within the present project:

I) Electrical measurements with Lund Imaging System, *II)* RMT (radiomagnetotellurik), *III)* OhmMapper, *IV)* Resistivity probe.

Our results show that the occurrence of sulphidic sediments coincide with areas with low electric resistivity. The results show that it is possible to use geoelectrical methods to delineate sulphidic sediments from sulphide free sediments. The results show good agreement between the different methods used in this investigation. Stratigraphical methods and sulphur analyses are, however, always necessary to recognise the presence of sulphidic sediments at a certain site. The depth and surface extension of the sulphidic sediments can thereafter be delineated by the use of geoelectrical methods.

The sulphidic sediments along the coast of Norrland have a higher resistivity than corresponding sediments in the Mälaren Valley further south. That may possibly be an effect of high contents of clay minerals in the sediments around Lake Mälaren, which contribute to a low resistivity.

It has not been possible to establish the reason for the relatively low resistivity of the sulphidic sediments. Studies from Finland have shown that the pore water of sulphidic sediments has high concentrations of chloride. It is therefore possible that high concentrations of salt in the pore water explain the low resistivity of the sulphidic sediments. The high salinity is explained by the fact that these sulphidic sediments were deposited in brackish water.

INLEDNING	2
TIDIGARE SGU-FINANSIERADE UNDERSÖKNINGAR.....	5
GEOKEMISK KARAKTERISERING AV SULFIDHALTIGA JORDAR.....	5
FÖREKOMSTEN AV SULFIDHALTIGA POSTGLACIALA SEDIMENT	5
KARTERINGSMETODIK OCH METALLBELASTNING – SURA SULFATJORDAR	6
SAMARBETSPROJEKT	6
METODER.....	7
FÄLTKÄNNETECKEN FÖR SURA SULFATJORDAR OCH SULFIDHALTIGA SEDIMENT.....	10
RESULTAT.....	13
OMRÅDE 1, MÄLARDALEN	13
<i>Uddetorp</i>	13
<i>Fiholm</i>	19
VÄSTERBOTTEN.....	24
<i>Norrfors</i>	24
<i>Västerslätt</i>	27
NORRBOTTEN	31
<i>Ersnäs</i>	31
<i>Böle</i>	33
DISKUSSION OCH SLUTSATS	36
SULPHIDIC SEDIMENTS AND ACID SULPHATE SOILS.....	38
Mötets första dag	38
Mötets andra dag - exkursion.....	39
REFERENSER	43

Inledning

I både Sverige och Finland finns under den högsta kustlinjen stora arealer med postglaciala sediment vilka innehåller järnsulfider (tex. FeS och FeS₂; tex. Åström 1996, Öborn 1994). Dessa sulfider har bildats som en följd av att syrefria förhållanden rått under eller efter det att sedimenten avsatts.

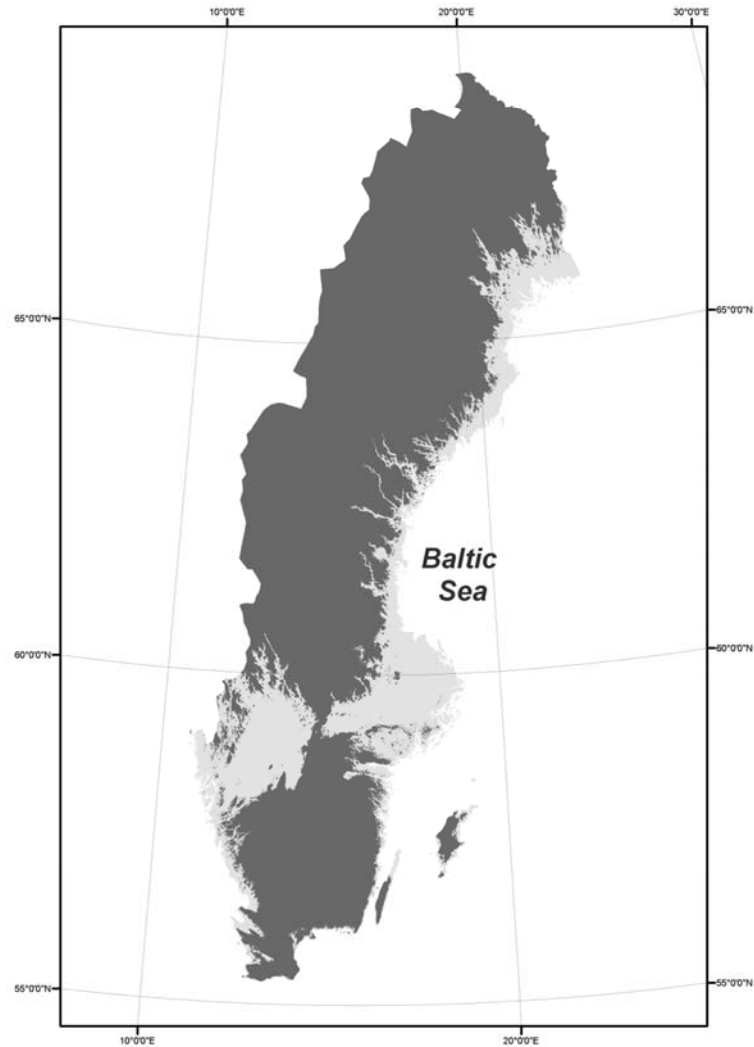
I samband med byggnationer eller för att möjliggöra uppodling sänks ofta grundvattenytan varvid järnsulfiderna oxiderar. Detta leder till att protoner frigör. Om jorden har en otillräcklig buffringsförmåga leder detta till att pH sjunker, ofta ner till 3-4. De jordar som då bildas brukar kallas sura sulfatjordar. De sura förhållandena leder till en ökad kemisk vittring vilket gör att toxiska metaller kan mobiliseras (t.ex. Ni, Cu och Cd; tex. Åström och Björklund 1995). Det är risk att skadliga mängder av de mobiliserade metallerna kommer ut i bäckar och sjöar. Det finns anledning att befara att bidraget av tungmetaller från sura sulfatjordar lokalt är stort. Dessutom kan ytvatten i vattendrag som dränerar sulfatjordar ha extremt låga pH-värden, vilket i sig medför problem för vissa arter i de akvatiska ekosystemen. Därför är det viktigt att identifiera de processer som leder till mobilisering av metaller samt att fastställa var sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment förekommer geografiskt.

I Sverige och Finland har de flesta observationer av sulfidhaltiga sediment gjorts på nivåer som låg under vatten vid början av Littorinahavet (Figur 1) då bräckt vatten trängde in i Östersjön (t ex Fromm 1965; Georgala 1980; Ivarsson mfl 1996). Den totala arealen uppodlade sura sulfatjordar har i Sverige uppskattats till 140 000 hektar (Öborn 1994). Det är möjligt att den verkliga arealen är större. Det har inte gjorts några uppskattningar av den total arealen sulfidhaltiga sediment i Sverige. Det finns dock en sammanställning från Umeå universitet av förekomster av sulfidhaltiga sediment i Sverige (Ivarsson mfl 1996).

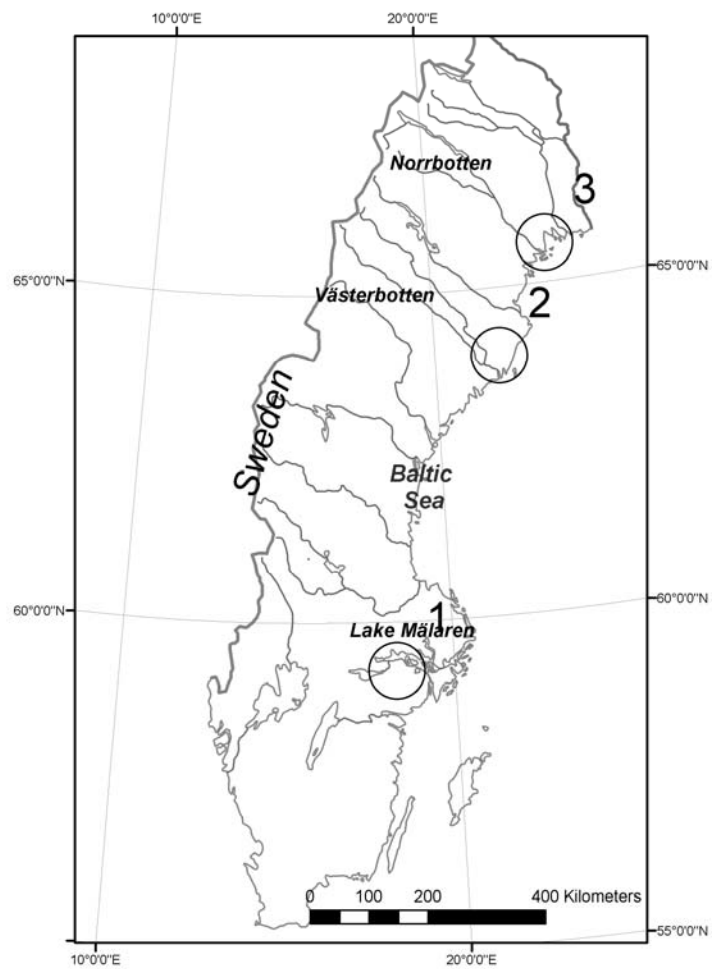
Det är ofta möjligt att i borrhälsar eller i grävda schakt identifiera sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar (tex Sohlenius mfl 2004, Lax och Sohlenius 2006). Det är dock tidskrävande att med dessa metoder i yt- och djupled avgränsa större förekomster av sulfidhaltig jord. Inom detta projekt har vi därför försökt hitta mer tidsparande geofysik metoder som kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. En målsättning är att geofysikmetoder i framtiden kan komma att användas innan tex större schaktningsarbeten för att uppskatta hur mycket sulfidhaltiga sediment som finns i ett visst område. Förhoppningsvis kan resultatet från detta projekt även visa om de geoelektriska metoderna även kan vara användbara vid andra stratigrafiska jordartsundersökningar.

Inom ett tidigare projekt har vi jämfört jordartskartor med data som tagits fram vid SGUs flygelektromagnetiska VLF mätningar med (Sohlenius mfl, 2004). Syftet med det var att undersöka om dessa data kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. På några platser gjordes dessutom elektriska sonderingar i fält. Resultaten visar att de sulfidhaltiga sedimenten i Mälardalen har en lägre elektrisk resistivitet än omkringliggande jordar. Även undersökningar från Österbotten i Finland har visat att de sulfidhaltiga jordarna har en lägre elektrisk resistivitet än andra finkorniga sediment (Puranen mfl 1997 Lintinen mfl., 2003; Suppala mfl., 2005). Eftersom de geoelektriska metoderna verkar lovande har vi i detta projekt inriktat oss på att testa sådana metoder för att identifiera sulfidhaltiga sediment. Fältundersökningarna har inriktat på platser i Mälardalen (Område 1), Västerbotten (Område 2) och i Norrbotten (Område 3) där det sedan tidigare är känt att sulfidhaltiga sediment förekommer (Figur 2).

Den elektriska resistiviteten är omvänt proportionell mot konduktiviteten och har SI-enheten Ohm.m ($\Omega.m$). I denna rapport använder vi termen resistivitet. Resistiviteten hos jordarter beror huvudsakligen på porositet, kornstorlek, vattenmättnad, salthalt i porvattnet samt förekomsten av lermineral (Ward, 1990). Hög vattenmättnad såväl som hög salthalt i porvattnet leder till låg resistivitet. Förekomsten av lermineral leder till ännu lägre resistivitet.



Figur 1. De flesta områden med sulfidhaltiga sediment finns på nivåer som var täckta av vatten under tiden för Littorinahavet. På kartan syns Littorinahavets utbredning för 6500 år sedan samt de områden som studerats inom detta projekt.



Figur 2. *De tre områden där de geoelektriska undersökningarna utförts.*

Tidigare SGU-finansierade undersökningar

Geokemisk karakterisering av sulfidhaltiga jordar

Det SGU finansierade Projektet "*Geokemisk karakterisering av sulfidhaltiga jordar*" (Sohlenius och Öborn, 2003) pågick 2000-2001. De resultat som erhöles inom projektet gjorde att flera slutsatser kunde dras:

- I Norrland förekommer en relativt stor andel av järnsulfiderna som FeS vilket ger sulfidjorden en karakteristisk svart färg (Svartmocka). I lerjordar från Mälardalen och längst Östersjökusten är pyrit det sulfidmineral som dominerar.
- Många metaller är bundna i den pyrit som förekommer i de sulfidhaltiga sedimenten.
- De totala halterna av spårmetaller är inte högre i de sulfidhaltiga sedimenten jämfört med sulfidfria sediment.
- De sura förhållandena som uppstår då de sulfidhaltiga sedimenten oxiderar leder till ökad utlakning av många metaller (tex Cu, Mn, Co, Al, Ni och Cd).
- Alla de analyserade metallerna uppvisar förhöjda halter i den lättlösliga fraktionen i övergången mellan oxiderad och reducerad jord. Detta är en effekt av den kraftiga vittringen i den sura oxiderade jorden..
- De flesta ämnen mobiliseras troligtvis genom ökad vitting av silikatmineral, medan oxidation av pyrit är av underordnad betydelse.
- Sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment kan oftast identifieras i fält.

Denna information har varit av vikt även i det här avrapporterade projektet.

Förekomsten av sulfidhaltiga postglaciala sediment

Under 2003 bedrevs det internt finansierade projektet "Förekomsten av sulfidhaltiga postglaciala sediment" (Sohlenius, Persson, Lax, Andersson och Daniels, avrapporterat 2004). Resultat från det projektet visar att det är möjligt att använda data från flera av de metoder, som SGU nyttjar inom sin ordinarie verksamhet, för att identifiera områden med sulfidhaltiga jordar. De olika metoderna har dock vissa begränsningar, men kan tillsammans användas för att fastställa var dessa jordar förekommer. Det är däremot inte möjligt att med dessa data uppskatta de sulfidhaltiga sedimentens mäktighet.

I Mälardalen sammanfaller förekomsterna av sulfidhaltiga sediment med områden som på jordartskartan (serie Ae) karterats som gyttjelra. Längst Norrlandskusten förekommer sulfidmineral främst i gyttjiga siltiga sediment. Vid SGUs jordartskartering i Norrland har gyttjejordar inte avgränsats från andra finkorniga vattenavsatta sediment (Länkartor serie Ca och jordartskartor serie Ak). I Västerbottens och Norrbottens kustområden utgör dessa sulfidhaltiga sediment en stor andel av de finkorniga sedimenten närmast kusten. I dessa områden kan därför SGUs jordartskartor ge en grov uppfattning om var sulfidhaltiga sediment troligtvis förekommer. I Norrland överlagras de mest finkorniga sedimenten på många platser

av älv- eller svallsediment. Det gör att ytor som på jordartskartan angetts som älv eller svallsediment mycket väl kan underlagras av sulfidhaltiga sediment.

De biogeokemiska kartorna visar att vissa metaller (exempelvis Ni och Co) uppvisar höga halter i bäckvattenväxter från områden med sura sulfatjordar. Dessa data kan därför användas för att identifiera sådana områden (Lax, 2005). De förhöjda halterna förekommer dock endast i sådana områden där oxidation av sulfider har skett och sura förhållanden lett till mobilisering av metaller. Troligen rör det sig främst om de områden där grundvattenytan sänkts genom dikning för att möjliggöra uppodling. Det är troligt att det finns våtmarksområden med sulfidhaltiga sediment där en nära markytan liggande grundvattenyta förhindrar eller försvårar sulfidoxidationen. Sådana områden kommer då inte att återspeglas genom höga metallhalter på de biogeokemiska kartorna. De biogeokemiska proverna har tagits med en täthet av 1 prov/6 km². Det innebär att dessa data i första hand kan användas för att identifiera större regioner med sura sulfatjordar, eller om provet är taget i direkt anknytning till mindre förekomster.

Från SGUs flyglektromagnetiska VLF-data framställs kartor över markens elektriska ledningsförmåga. Resultatet från dessa mätningar visar att områden med sulfidhaltiga sediment framträder som områden med mycket låg resistivitet (hög ledningsförmåga). Kartan över markens ledningsförmåga framställs från VLF-data där fältet uppmätts från två VLF-sändare. Dessa mätningar täcker än så länge bara ca en tredjedel av Sveriges yta.

Karteringsmetodik och metallbelastning – sura sulfatjordar

Inom det SGU-finansierade projektet ”Karteringsmetodik och metallbelastning – sura sulfatjordar” (2005) har Gustav Sohlenius tillsammans med Kaj Lax och Sten-Åke Ohlsson (alla på SGU) arbetat med att utformat en metodik för att med enkla fältmetoder fastställa förekomsten av sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment (Lax och Sohlenius, 2006).

Samarbetsprojekt

Under 2003 påbörjades Geonat projektet som är ett delvis EU finansierat projekt där SGU tillsammans med GTK undersöker geologin i området i och kring Kvarken. Detta projekt avslutades under hösten 2005. En målsättning har varit att på den svenska sidan uppskatta de sulfidhaltiga sedimentens utbredning längst Kvarkens kuster och i Umeälvens dalgång. Detta har i stor utsträckning skett genom arkivstudier där material från bl a väg- och banverket gåtts igenom (Malin Fuchs och Björn Wiberg).

Metoder

Med utgångspunkt från tillgänglig geologisk information valdes lämpliga undersökningsplatser i tre undersökningsområden ut Figur 2. Samtliga lokaler ligger på eller nära platser där tidigare undersökningar visat att sulfidhaltiga sediment förekommer. För att underlätta mätning med de geoelektriska metoderna valdes områden belägna på jordbruksmark ut. För att kartlägga resistiviteten i markens ytligaste delar (<30 m) har vi testat fyra olika metoder:

RMT (radiomagnetotellurik) metoden

En elektromagnetisk metod som utnyttjar radiosändare i frekvensområdet 15-250 kHz. Det instrument vi använt, "EnviroMT" (Figur 3) är utvecklat vid Uppsala Universitet och har tidigare visat sig användbart vid denna typ av ytnära undersökningar (Bastani, 2001 samt Pedersen et.al 2005). Vi mätningen registreras tre komponenter av det magnetiska fältet och två horisontella komponenter av det elektriska fältet. Markens skenbara resistivitet ρ_a , kan därefter bestämmas ur kvoten av det horisontella elektriska, E_x och magnetiska, H_y fältet enligt:

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\nu\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \text{där } \nu = \text{frekvens (Hz)} \text{ och } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (}\Omega\text{sm}^{-1}\text{)}.$$

Djupkänningen är beroende av frekvensen på så sätt att lägre frekvenser tränger djupare ned i marken. Vid RMT-mätningen användes ett mätpunktsavstånd på 10m för samtliga profiler. Data har sedan modellerats med hjälp av inversionsprogrammet Rebocc (Siripunvaraporn and Egbert, 2000)

Elektrisk mätning med ABEM Lund Imaging System

Vid elektrisk resistivitetsmätning utsänds en ström i marken via två strömelektroder och potentialskillnaden registreras med två potentialelektroder. Markens skenbara resistivitet kan sedan beräknas enligt:

$$\rho_a = K \cdot \frac{U}{I}$$

där U är uppmätt potentialskillnad, I motsvaras av den utsända strömmen och K är en geometrisk faktor som är beroende av elektroderna inbördes läge. Genom att öka avståndet mellan strömelektroderna erhålls en större djupkänning. Vid mätningen användes ABEM Lund Imaging System (Dahlin, 1996), ett multielektrodsystem där ett stort antal elektroder (64 st) placeras ut längs profillinjen och registrering sker sedan automatiskt för olika elektrodkonfigurationer. Ett elektrodavstånd på 5 m användes för samtliga profiler. Data har sedan modellerats med inversionsprogrammet Res2Dinv (Loke, 2004).

Vid några lokaler användes ett enklare instrument med enbart fyra elektroder. Vid denna mätning utfördes en sk elektrisk sondering (VES) där avståndet mellan strömelektroderna ökas successivt och vilket medför att resistiviteten kan bestämmas i vertikalled i en punkt.

OhmMapper

Ett relativt nyutvecklat elektriskt instrument som bygger på att strömmen tillförs marken kapacitivt med den fördelen att inga elektroder behövs (Kuras et. al., 2006). Markens resistivitet kan därigenom registreras kontinuerligt under mätning vilket medför en snabb datainsamling (Figur 4). Instrumentet består av en sändare och en mottagare och genom att öka avståndet mellan dessa kan djupare delar av marken undersökas. Tidigare resultat har visat att detta instrument är användbart vid detaljerad kartläggning av markens resistivitet (Walker och Houser 2002). Data insamlades med en hastighet av 4 mätningar per sekund vilket motsvara ett mätpunktsavstånd på ca 25 cm. Vid mätningen användes olika avstånd mellan sändare och mottagare (dipolavstånd). Varje profil uppmättes alltså flera gånger med olika avstånd vanligtvis 2, 5, 10 och 20 m. Data har sedan modellerats med inversionsprogrammet Res2Dinv (Loke, 2004).

Resistivitetsond

En sond bestående av en elektrisk sensor (Figur 5) som registrerar resistiviteten inom ett litet område (några cm). Sonden pressas ned i marken och kan förlängas med hjälp av metallstänger. Instrumentet är utvecklat av Finlands Geologiska Undersökning (GTK; Puranen mfl, 1997). Sonden har använts vid liknande undersökningar i Finland i studier av sulfidhaltiga leror (Suppala et al., 2005).

Tabell 1. De geofysikmetoder och instrument som användes i denna undersökning. Område 1 ligger kring Mälaren, Områden 2 i Västerbotten och Område 3 i norrbotten.

Område	Antal lokaler	Metod	Instrument
1	2	RMT (radiomagnetotellurik)	EnviroMT (Uppsala Universitet)
		Kapacitiv resistivitet	OhmMapper (Geometrics AB)
		In-situ resistivitet	Resistivitetsond (GTK)
2	2	RMT	EnviroMT (Uppsala Universitet)
3	2	RMT	EnviroMT (Uppsala Universitet)
		DC elektrisk resistivitet	Lund Imaging System (ABEM)

I samband med de geofysiska mätningarna skedde även provtagning med borrh. Kärnornas stratigrafi beskrevs varefter prover togs för att i första hand bestämma svavelhalten. På två platser i Västerbotten grävdes schakt med grävsropa i syfte att åskådliggöra de sulfidhaltiga sedimentens och de sura sulfatjordarnas karaktär.

Tolkningsmetodik

Vid tolkningen av data uppmätt med EnviroMT, OhmMapper och ABEM Lund Imaging system har vi använt tvådimensionell inversionsprogram. Vid inversion skapas en modell av marken med celler av okänd resistivitet. Programmet försöker sedan anpassa resistiviteten i varje cell så att responsen från modellen överensstämmer med uppmätta data. Resultatet presenteras sedan som djupsektioner över resistiviteten längs den uppmätta profilen.



Figur 3. Mätning med RMT (radiomagnetotellurik) vid Stöcksjö nära Umeå. Metoden utnyttjar radiosändare i frekvensområdet 15-250 kHz.



Figur 4. Mätning med OhmMapper på lokalen Fiholm mellan Eskilstuna och Strängnäs.



Figur 5. Lena Persson (SGU) och Taija Houtari (GTK) med resistivitetssonden på Kungsängen några kilometer söder om Uppsala

Fältkännetecken för sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment

Med utgångspunkt från resultaten tidigare projekt kan några fältkännetecken för sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment sammanställas. Dessa jordar kan ofta identifieras redan i fält, dels med utgångspunkt från deras läge i terrängen och dels med utgångspunkt från jordartens utseende.

I Västerbotten och Norrbotten bildas sura sulfatjordar främst efter oxidation av s.k. svartmocka i vilken mineralet FeS färgar jorden svart (Figur 6). I många fall påminner dessa svarta jordar om skokräm. I kontakt med syre oxiderar FeS väldigt fort och jorden får en grå färg redan efter några timmar. Svartmockan är vanlig framförallt i de områden med postglacial silt som utgör slättnområdena närmast kusten. Denna sulfidhaltiga silten innehåller en eller ett par % organiskt material. Längre upp i dalgångarna och längst vattendrag är de sulfidhaltiga sedimenten oftast täckta av yngre älv och svallsediment.

I södra delen av Sverige utvecklas sura sulfatjordar ofta på platser som på SGUs jordartskartor klassificerats som gyttjelera. Områden med gyttjelera finns ofta i de lägst partierna av områden som utgörs av lersediment. Ofta ligger dessa sediment i förlängningen av havs och sjövikar. Gyttjelera är vanligt förekommer kring Mälaren och andra nära havsytanivån liggande sjöar i Mälardalen. Dessa leror har en blågrå ibland svagt grönaktig färg, de innehåller några procent organiskt material, samt sulfidmineralet pyrit (FeS_2). Detta sulfidmineral påverkar ej jordens färg och oxiderar inte lika lätt som FeS.

De sura sulfatjordar, som bildas efter oxidation av sulfidhaltiga sediment, kännetecknas av vertikala sprickor som ofta kan följas ner till grundvattenytan (Figur 7). I sprickorna finns ofta purpurroda (flera mm tjocka) beläggningar av järnhydroxider. I anslutning till dessa

rostutfällningar förekommer ibland också det blekgula mineralet jarosit, $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, som är en bra indikator för att identifiera sura sulfatjordar. Detta sist nämnda mineral verkar vara mer vanligt förekommande i sura sulfatjordar längst Norrlandskusten jämfört med motsvarande jordar längre söderut.



Figur 6. Svartmucka provtagen i en våtmark vid Västerfjärden ca 10 km söder om Umeå.



Figur 7. Sur sulfatjord som bildats efter oxidation av sulfidhaltiga sediment i Västerbotten. Dessa jordar kännetecknas av mer eller mindre lodräta sprickor som ofta når ner till grundvattennivån. Sprickornas väggar är täckta av järnhydroxider. Bilden togs i ett maskingrävt schakt vid fältarbete under sommaren 2004.

Resultat

Under fältarbetena besöktes flera lokaler i Västerbotten, Norrbotten och Mälardalen där det är känt att sulfidhaltiga sediment förekommer. Samtliga undersökta lokaler ligger på mark som har eller för närvarande nyttjas som åkermark. Sådana områden valdes för att göra arbetet med den geoelektriska utrustningen så enkel så möjligt.

Område 1, Mälardalen

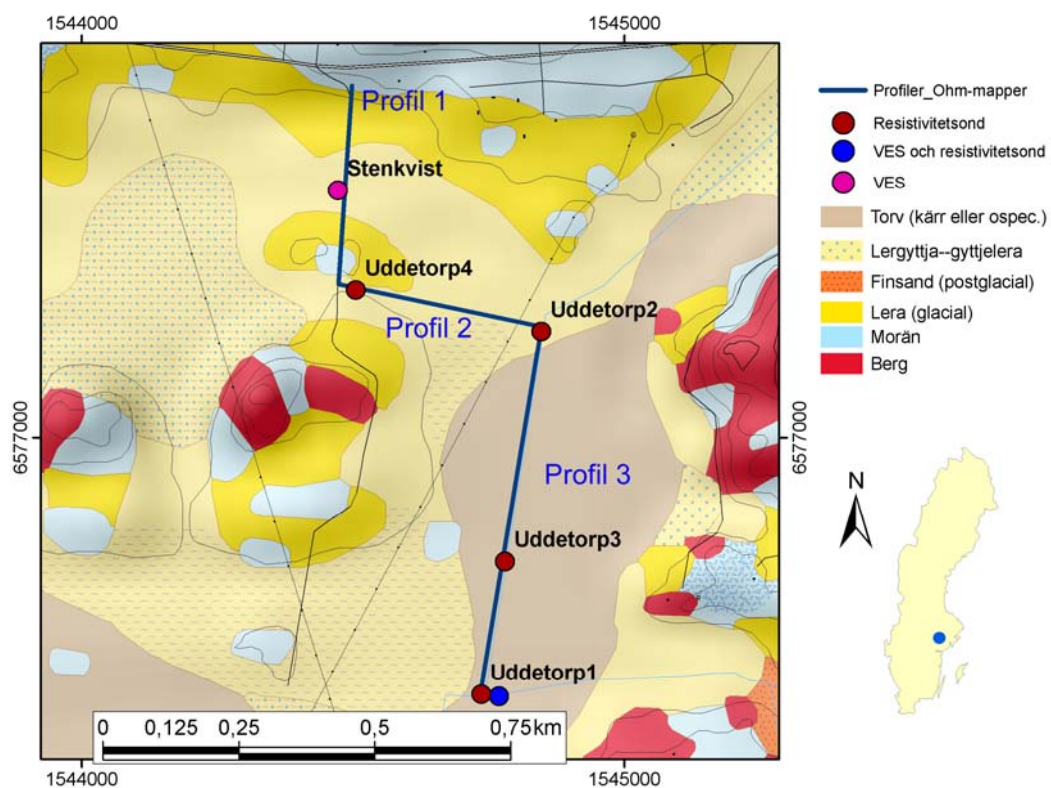
Geoelektriska mätningar utfördes på två platser (Uddetorp och Fiholm) mellan Strängnäs och Eskilstuna söder om Mälaren. Båda dessa lokaler har beskrivits av Sohlenius mfl. (2004).

Uddetorp

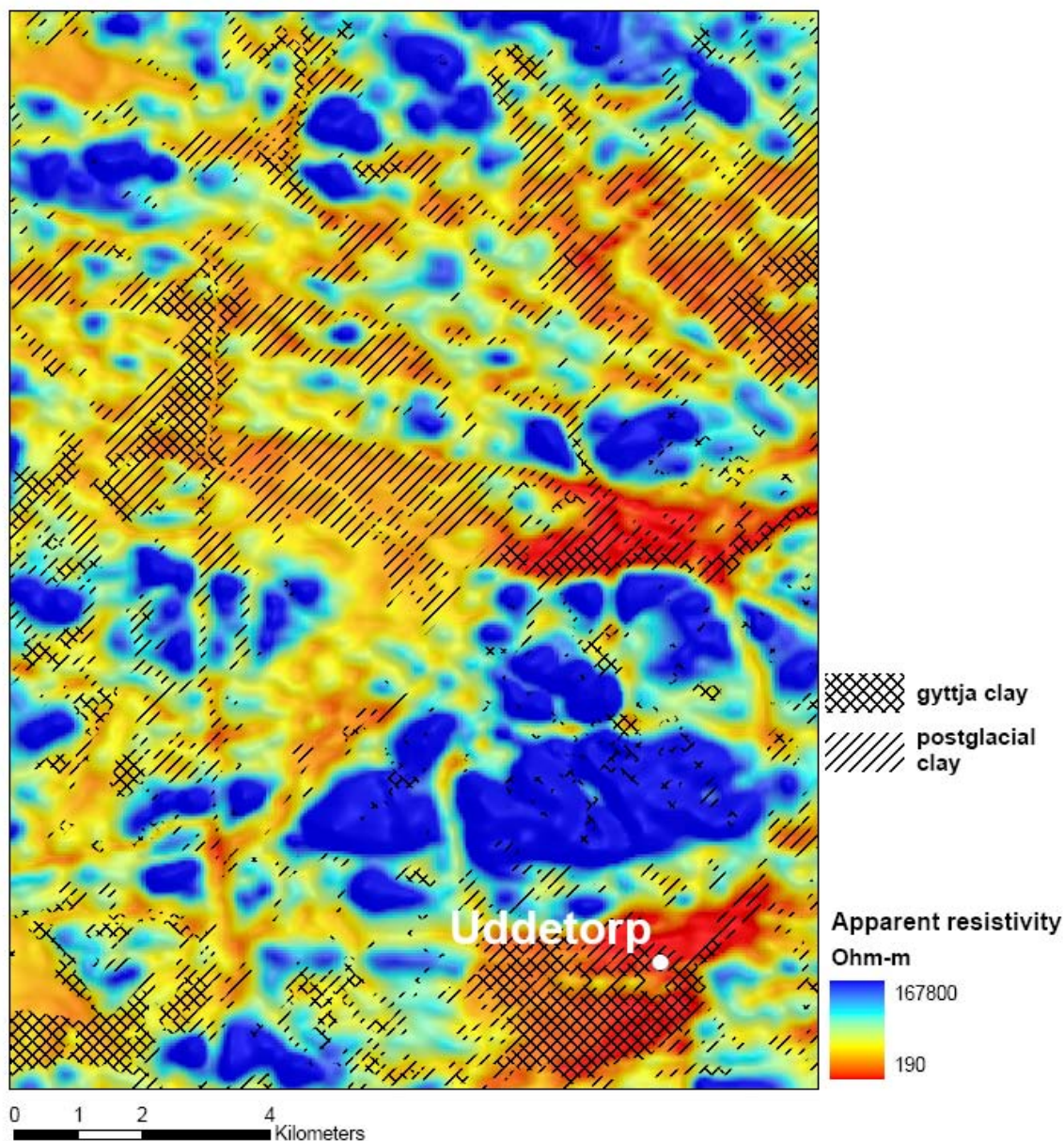
(1544768N, 6576524E; ca 30 m ö. h. y.)

På jordartskartan redovisas denna lokal i stor utsträckning torv och tunt torvlager på lergyttja (Figur 8). Resistivitetkartan visar på en mycket låg resistivitet i området (Figur 9). Hela området utgörs idag en åkermark där grundvattenytan sänkts genom dikning. Området har tidigare delvis utgjorts av en grund sjö. Under våren 2004 utfördes mätningar med OhmMapper, RMT och resistivitetsond på denna lokal. Inom ett tidigare FoU projekt (Sohlenius mfl, 2004) utfördes våren 2003 två elektriska sonderingar (VES) samt provtagning i området.

Vid Uddetorp 1 finns torv, som underlagras av lergyttja. Prover från lergyttjan innehåller höga halter av både kol och svavel (Tabell 2). Troligtvis är svavlet delvis bundet i sulfidmineral. Prover från Uddetorp 2, 3 och 4 samt Stenkvista 1 innehåller relativt lite organiskt kol och svavel. På dessa platser har jordarten klassificerats som postglacial lera.



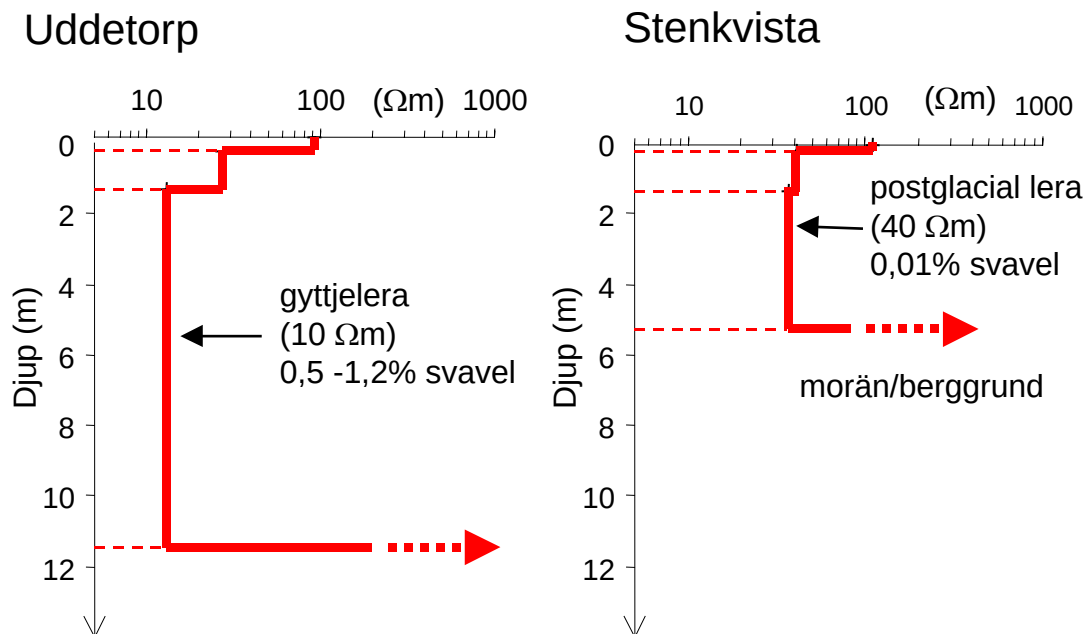
Figur 8. Jordartskartan över Uddetorp med de uppmätta profilerna och punkterna där elektriska sonderingar (Sohlenius mfl, 2004) och mätningar med resistivitetssond utförts.



Figur 9. Karta över markens elektriska resistivitet erhållen från flygelektromangetiska (VLF) mätningar vid Uddetorp.

Resultat från tidigare elektrisk sondering vid Uddetorp 1 (Sohlenius mfl, 2004) visar att det finns ett tunt relativt högresistivt skikt i överytan motsvarande torv ovan grundvattenytan (Figur 10). Detta lager följs av ett ca 1 m mäktigt lager med en resistivitet av 27 Ωm motsvarande gyttjeleran ovan grundvattenytan. Lager 3 motsvaras av den vattenmättade gyttjeleran med en resistivitet på 13 Ωm . Detta lager har en mäktighet på 10 m och följs av ett lager med betydligt högre resistivitet ($>1000 \Omega\text{m}$). Det understa lagret motsvaras av troligen av en morän med hög resistivitet. Enligt tolkningsmodellen är det totala jorddjupet vid mätpunkten minst 11,5 m. Vid punkten Stenkvista utfördes ytterligare en elektrisk sondering under fältarbetet 2003 (Figur 10). Även här visar resistivitetskartan en relativt låg resistivitet. Enligt jordartskartan finns postglacial lera på denna plats (Figur 8). Resultatet visar att lera i

denna punkt har en högre resistivitet (ca. 40 Ωm) och mindre mäktighet (ca. 5 m) i jämförelse med gyttjeleran vid Uddetorp 1. Prov att denna lera innehåller låga halter av kol och svavel och därmed inte kan karakteriseras som en sulfidhaltig jord (Tabell 2, Stenkvista 1).



Figur 10 Resultat från elektriska sonderingar i Uddetorp 1 (tv) och Stenkvista (th). Den lägsta resistiviteten uppmättes vid punkten Uddetorp1, som också uppvisar den högsta svallhalten. Läget för sonderingarna framgår av Figur 8.

Sammanlagt tre profiler mättes med OhmMapper. Profil 1 och 2 uppmättes med ett dipolavstånd på max 10 m varför djupkänningen är begränsad till drygt 3 m (Figur 11). Profil 3 uppmättes med ett dipolavstånd på max 20 m varför djupkänningen för denna profil uppgår till ca 7 m. Denna profil uppmättes även med RMT (Figur 12).

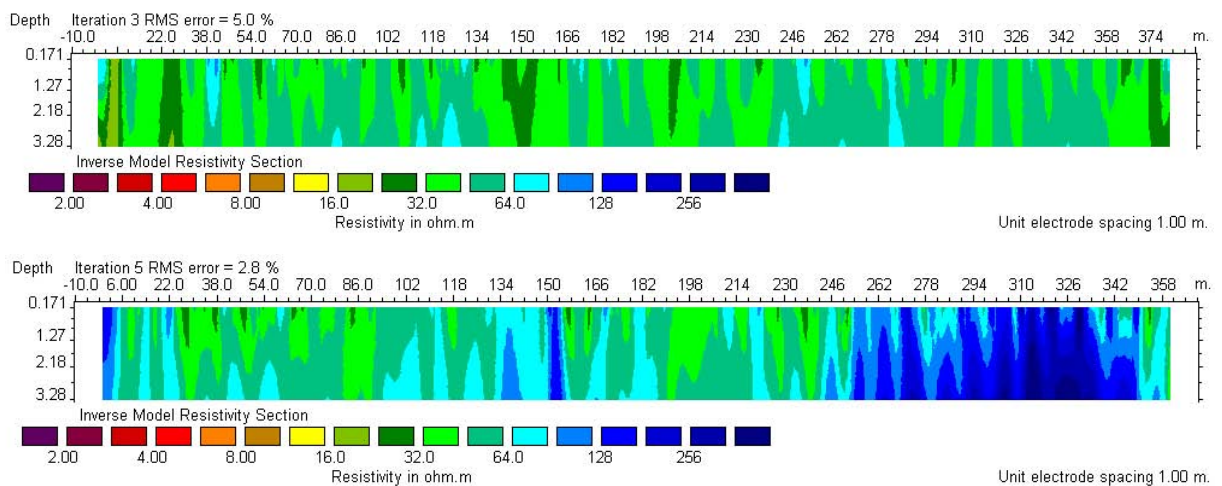
Profil 1 korsar ett område med postglacial och glacial lera samt en moränkulle (Figur 8). Moränkullen framträder tydligt som ett område med betydligt högre resistivitet (blått, ca 250 Ωm) jämfört med den omgivande lermarken (grönt, ca 50 Ωm).

Profil 2 ligger helt på ett område som på jordartskartan lagts som postglacial lera. Profilen uppvisar väldigt lite variation både i djupled och längs profilen (observera att djupskalan är överdriven i jämförelse med längdskalan). Resistiviteten i denna lera uppvisa liknande värden som uppmättes på lerorna i profil 1 (omkring 50 Ωm).

Profil 3 passerar ett område som på jordartskartan (Figur 8) karterats som torv. Mäktigheten på detta torvlager överstiger knappast en meter och underlagras sannolikt till stor del av leror som innehåller organsikt material (tex gyttjeleran). Denna profil uppmättes med två olika metoder OhmMapper och RMT. Resultaten från mätningen med OhmMapper (Figur 12) visar att leran som underlagras torven har en betydligt lägre resistivitet (ca 10 Ωm) i jämförelse med de lerorna vid profil 1 och 2. Det mäktigaste lagret med lågresistiv jord finns mellan 250

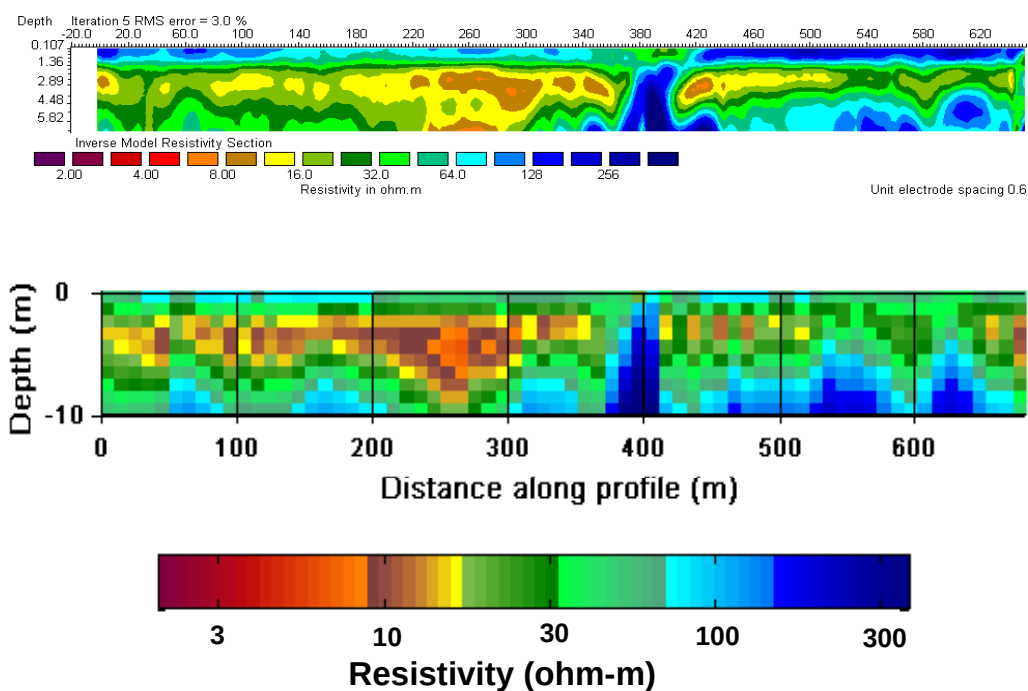
och 300 meter. Det högresistiva lagret vid markytan (< 1,5m) motsvaras troligtvis av jord ovan grundvattenytan. Den högre resistiviteten är en effekt av att jorden ovan grundvattenytan ej är mättad med avseende på vatten. Vid 380 meter syns en tydlig högresistiv struktur. Inte långt från den delen av profilen finns en moränkulle (Figur 8) och det är därför troligt att det den högresistiva strukturen motsvaras av en moränrygg och att djupet till morän på denna plats är betydligt mindre (ca. 2m) än i övriga delar av profilen.

Resultat från RMT mätningen (Figur 12) stämmer väl överens med resultaten från OhmMapper. Även här framgår att de mäktigaste lagren med lågresistiv jord finns mellan 250 och 350. Djupkänningen för RMT är dock betydligt bättre i jämförelse med OhmMapper och den undre begränsningen av lerorna kan därför lättare avgränsas med RMT. OhmMapper har däremot en betydligt bättre upplösning i de ytligaste delarna (0-2m) och även en bättre lateral upplösning pga att mätpunktsavståndet är ca 1m i jämförelse med 10m för RMT.

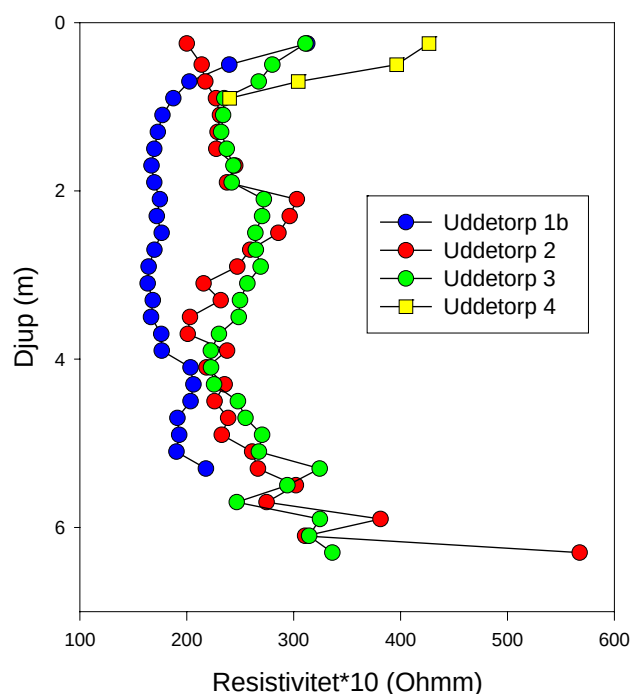


Figur 11. Uddetorp profil 1 och 2. För profilernas läge se Figur 8.

På Uddetorp 1,2,3 och 4 gjordes även mätningar med resistivitetsonden. Resultaten (Figur 13) visar att den plats där resistiviteten är som lägst också uppvisar den högsta svavelhalten (Uddetorp 1).



Figur 12. Resultat från mätningar med OhmMapper och RMT längst profil 3. För profilens läge se Figur 8.



Figur 13. Resultat från mätningar med resistivitetsond på platserna Uddetorp 1b, 2, 3 och 4. Den lägsta resistiviteten uppmättes vid punkten Uddetorp 1b, som också uppvisar den högsta svallhalten. Läget för sonderingarna framgår av Figur 8.

Fiholm

(1552497N, 6591430E; 1 m ö. h. y.)

Denna lokal ligger i ett område där tidigare undersökningar av sulfidhaltiga sediment utförts (Manngård, 1997; Öborn och Andersson, 1999). Området utgörs till störst delen av åkermark där gyttjelera och postglacial lera är de vanligaste jordarterna (Figur 14). Tidigare resultat från Manngård (1997) och SGUs biogeokemiska kartering visar på en relativt kraftig mobilisering av vissa metaller från området.

Inom ett tidigare FoU projekt (Sohlenius mfl., 2004) utfördes under våren 2003 två elektriska sonderingar och två borrhningar i området (Fiholm A och B; Figur 14). Borrhningar vid Fiholm A visade att det där finns en typisk gyttjelera ner till ett djup av minst 3,5 meter. Vid Fiholm B finns lera med låg organisk halt. Resultaten från analyser av kol och svavel (Tabell 2) visar att det på platsen för den första sonderingen (Fiholm A) finns sulfidhaltig gyttjelera medan halterna av svavel och kol är låga vid Fiholm B (Tabell 2). På jordartskartan (Figur 14) framgår att Fiholm B ligger nära ett område med glacillera, som kan förväntas ha en låg svavelhalt.

Resultaten från de elektriska sonderingarna visar på väldigt låg resistivitet vid både Fiholm A och B (Figur 15). Vid Fiholm A uppmättes den lägsta resistiviteten och tolkningsmodellen ger en resistivitet på ca. 5 Ω m och en lermäktighet på ca 8 m. Modellen från Fiholm B ger en resistivitet på ca 10 Ω m och en lermäktighet på ca 6 m. Den sulfidhaltiga leran vid Fiholm A har alltså en lägre resistivitet än den sulfidfria leran vid Fiholm B.

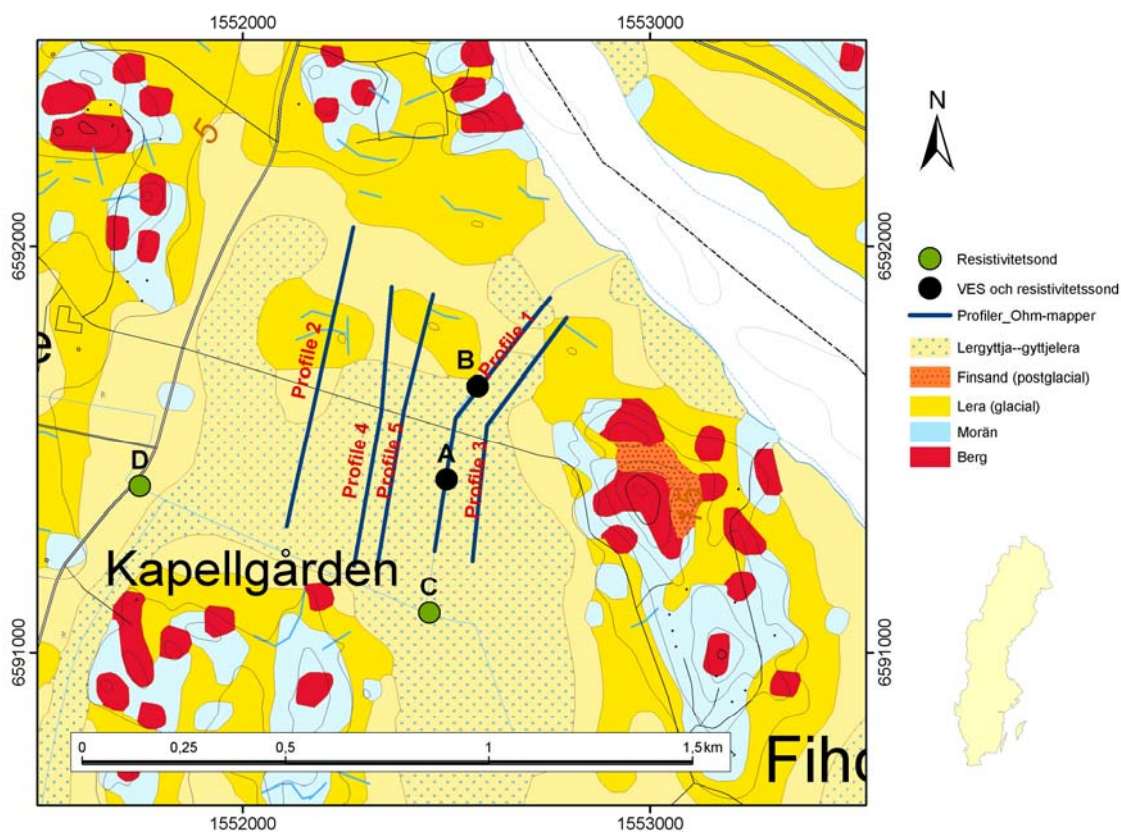
Fem sonderingar gjordes med resistivitetsonden Fiholm A, B1, B2, C och D (Figur 14). Fiholm B1 och B2 gjordes på samma plats för att testa metodens reproducerbarhet. Lägst resistivitet uppmättes vid punkterna Fiholm A, C och D (Figur 16). Lerprover från dessa platser uppvisar högre svallhalter än prover från Fiholm B (Tabell 2). Resultaten från Fiholm B visar att metoden har en god reproducerbarhet (Figur 16).

Sammanlagt fem profiler mättes med OhmMapper (Profil 1-5). Profil 1 uppmättes även med RMT. Resultaten från OhmMapper och RMT-mätningen (Figur 17) överensstämmer väl med varandra. Jordlagren ovan grundvattenytan (0-2 m) framträder i tolkningsmodellen som ett skikt med relativt hög resistivitet. Leran under grundvattenytan framträder som ett lager med mycket låg resistivitet i modellen. I den vänstra delen av profilen (0 – 300 m) är resistiviteten endast omkring 2 Ω m. Provtagningspunkterna, Fiholm A och B ligger längs profil 1 och det är tydligt att resistiviteten är lägre i den del av profilen där lera med relativt hög svavelhalt observerats (Fiholm A). Mäktigheten av den sulfidhaltiga leran uppgår till minst ca 6m enligt modellen som erhållits från RMT-mätningen

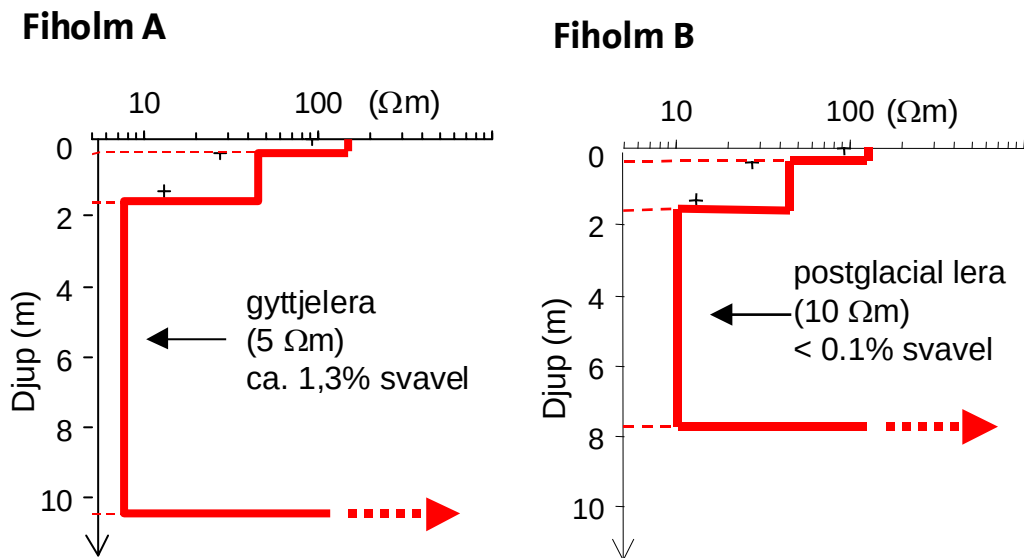
Profil 2 och 3 (Figur 18) uppvisar liknande resultat som profil 1. I båda profilerna framträder det lågresistiva sulfidhaltiga lerlagret i den vänstra (södra) delen av profilen. I Norra änden av profil 2 (550-650m) framträder ett 100 m brett lågresistivt område som troligtvis motsvaras av sulfidhaltiga leror. Ingen provtagning har skett inom detta område. En jämförelse mellan Profil 2 och jordartskartan (Figur 14) visar att områden som karterats som glacillera har en högre resistivitet än omgivande troligtvis sulfidhaltiga gyttjelera. Lerorna underlagras av morän, vilken framträder som ett högresistivt lager i delar av profilerna. De högresistiva

strukturer som syns i profil 2 (vid 440 och 500m) samt i profil3 (vid 570m) sammanfaller med de områden där profilerna korsar moränryggar.

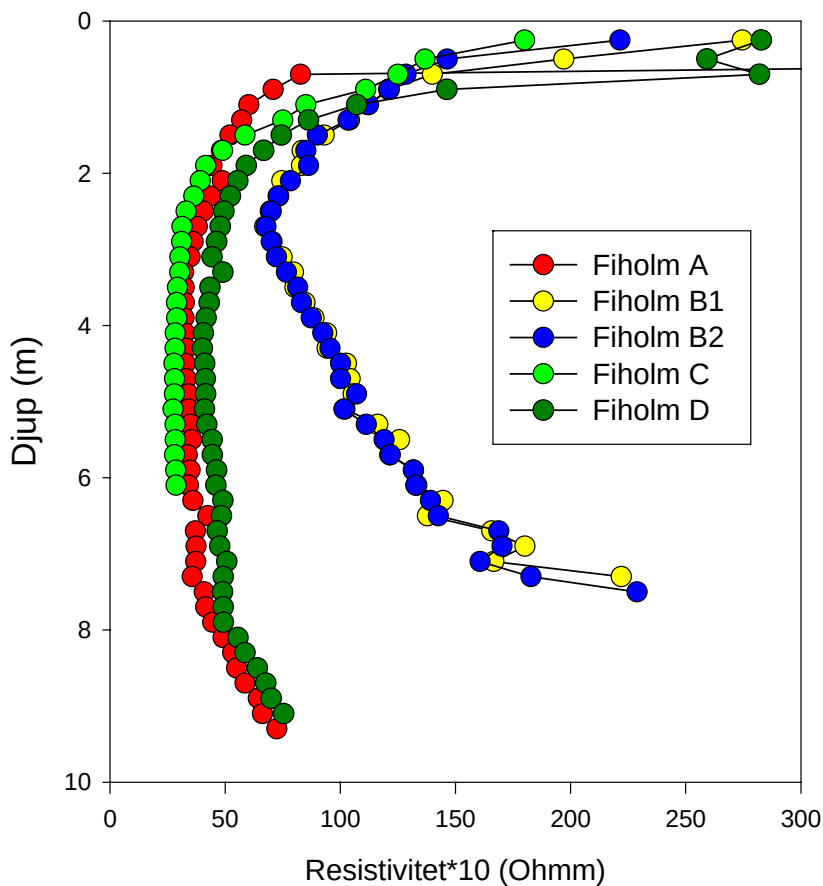
Resultaten från både Fiholm och Uddetorp visar att RMT ger god möjlighet att avgränsa de lågresistiva lerorna mot djupet, vilket inte resultaten från OhmMapper möjliggör. Däremot ger resultaten från OhmMapper en mer detaljerad bild av resistivitetvariationer i de närmast markytan liggande jordlagren. Det bör påpekas att de sulfidhaltiga lerorna i Fiholm har en lägre resistivitet än motsvarande sediment från Uddetorp.



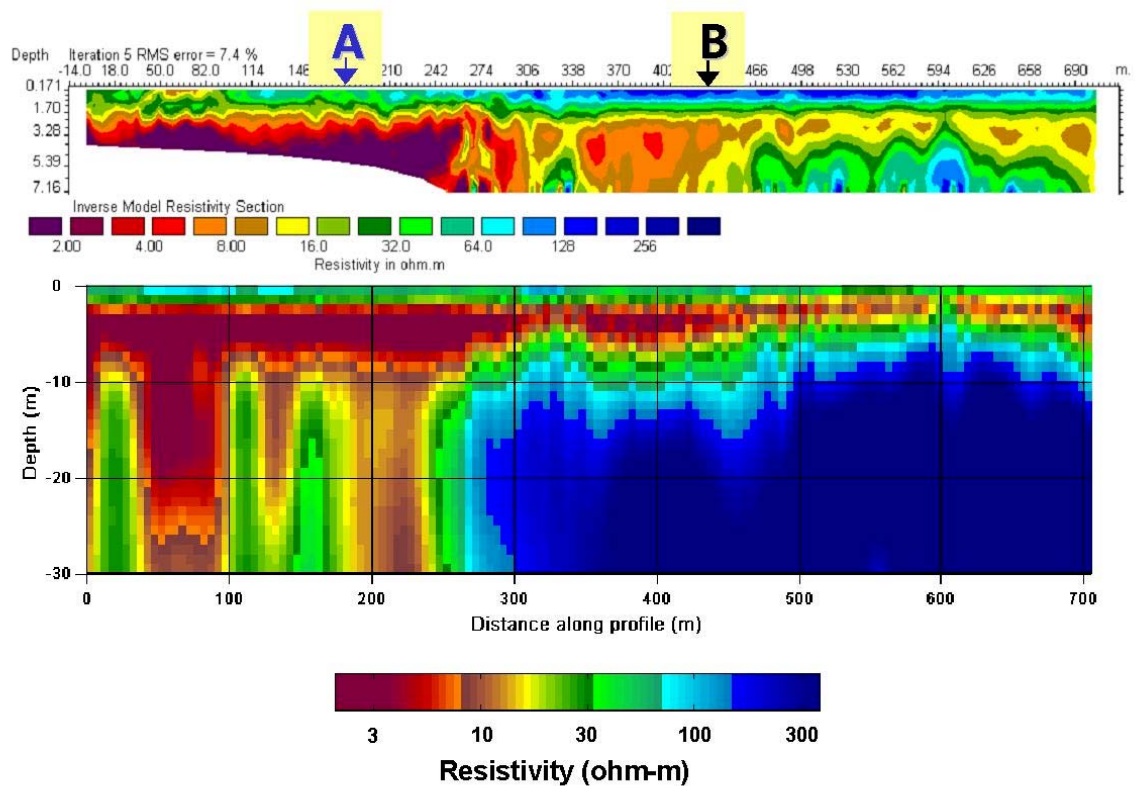
Figur 14. Jordartskartan över området kring Fiholm med de uppmätta profilerna och punkterna där elektriska sonderingar (Sohlenius mfl, 2004) och mätningar med resistivitetssond utförts.



Figur 15. Resultat från de elektrisk sonderingarna vid Fiholm A (tv) och Fiholm B (th). Läget för sonderingen framgår av Figur 14.

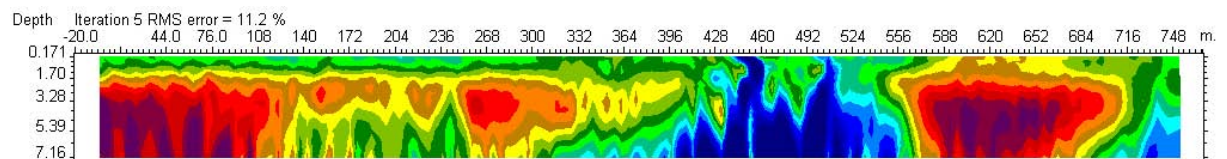


Figur 16. Resultat från mätningar med resistivitetsond vid lokalen Fiholm. Lägst resistivitet uppmättes vid punkterna Fiholm 1, 3 och 4. Lerprover från Fiholm 1 och 4 uppvisar högre svallhalter än prover från Fiholm 2a och 2b. Läget för sonderingarna framgår av Figur 14.



Figur 17. Resultat från mätningar längs profil 1 på lokalen Fiholm. Överst resultat från OhmMapper och längst ner resultat från RMT. Vid punkterna A och B utfördes elektriska sonderingar och mätningar med resistivitets sond. Dessutom beskrevs sedimenten stratigrafiskt på dessa två punkter. För profilens läge se Figur 14.

a)



b)

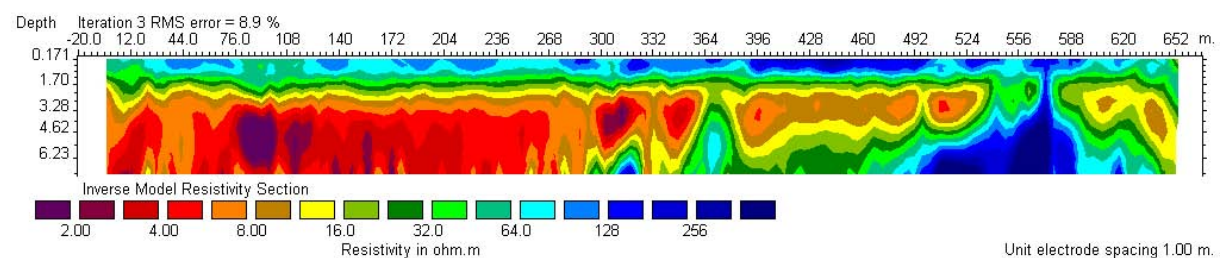


Figure 18. Resultat från mätningar med OhmMapper längs a) profil 2 och b) 3 på lokalen Fiholm. För profilens läge se Figur 14.

Tabell 2. Halterna av kol, svavel och kväve i jordar från Mälardalen.

Lokal	Djup under markytan (m)	C%	N%	S%
Fiholm B*	2	0,358	0,058	0,030
Fiholm A*	1	2,236	0,256	1,260
Fiholm A*	1,5	2,075	0,242	1,320
Fiholm A*	2	1,900	0,225	1,100
Fiholm B*	1 meter under diket	0,593	0,081	0,142
Fiholm B*	1,5 meter under diket	0,463	0,063	0,059
Fiholm B*	2,5	0,446	0,065	0,025
Fiholm D	1,0-1,1	1,00	0,128	0,03
Fiholm D	1,2-1,3	1,77	0,249	1,05
Fiholm D	1,4-1,5	2,09	0,278	1,37
Uddetorp1*	0,2	24,270	1,371	0,535
Uddetorp1*	0,5	7,857	0,912	0,500
Uddetorp1*	1	1,934	0,203	0,428
Uddetorp1*	1,7	2,831	0,337	1,160
Uddetorp1*	2	3,278	0,396	1,202
Uddetorp 1 b	1,0-1,1	3,35	0,470	1,04
Uddetorp 1 b	1,4-1,5	3,02	0,427	1,03
Uddetorp 2	1,0-1,1	0,59	0,095	0,06
Uddetorp 2	1,4-1,5	0,90	0,135	0,04
Uddetorp 3	1,0-1,1	0,40	0,064	0,12
Uddetorp 3	1,4-1,5	0,70	0,119	0,07
Uddetorp 3	1,9-2,0	0,63	0,101	0,05
Uddetorp 4	dikesbotten	0,34	0,055	<0,01
Stenkvista 1*	0,9	0,148	0,025	0,000

* dessa data redovisades även i en tidigare slutrapport (Sohlenius mfl, 2004)

Västerbotten

I Västerbottens kustområden underlagras åkermarken ofta av sulfidhaltig så kallad svartmocka (t.ex. Ivarsson mfl, 1996). Det var därför möjligt att välja ut flera lokaler (där det sedan tidigare är känt att sulfidhaltiga sediment förekommer. Geoelektriska mätningar utfördes på två platser. Genom borrhningar och maskingrävda schakt fastställdes att sulfidhaltiga sediment förekommer på tre av dessa platser (Sohlenius mfl, 2004).

Norrfors

(7093171N, 1707820E; 60 m ö. h. y.)

Vid en ombyggnation av E12 mellan Umeå och Vännäs gjordes ett ca sju meter djupt schakt, efter vägens nordsida, genom svartmocka och ovanliggande älvsand. Enligt jordartskartan ligger platsen inom ett område som täcks av silt (Figur 19). På sydsidan av vägen börjar sluttningen ner mot Umeälv. Marken på platsen används idag som jordbruksmark.

Stratigrafin undersöktes under ett fältarbete 2003 (se Sohlenius mfl, 2004). De överst ca 2,5 metrarna av schaktet består av skiktad sand som troligen avsatts av älven. Schaktet stod öppet under 2003 och 2004. De svarta FeS mineral, som karakteriserar svartmocka, hade närmast markytan oxiderat vid de fältundersökningar som gjordes på platsen. I spadgrävda gropar kunde det konstateras att nästan hela den sedimentpacke som underlagrar sanden utgörs av svartmocka. De allra överst och understa delarna av den 5,5 meter mäktiga siltpacken är dock ej svartfärgade av järnsulfid. Skärningen genomkorsas av två horisontella band som mellanlagras av ett brunt band. Varje band har en mäktighet på 30-40 cm. De ljusa banden är även i reducerat tillstånd ljusare än omgivande svartmockan. De är dessutom fint laminerade. En kornstorleks analys utfördes på ett prov taget 5,5 meter under markytan. Resultatet visar att provet består av lerig silt (lerhalt ca 8%).

Resultaten från kol och svavelanalyserna (Tabell 3) visar att alla prover tagna i silten, utom det nedersta, troligtvis innehåller sulfidbundet svavel.

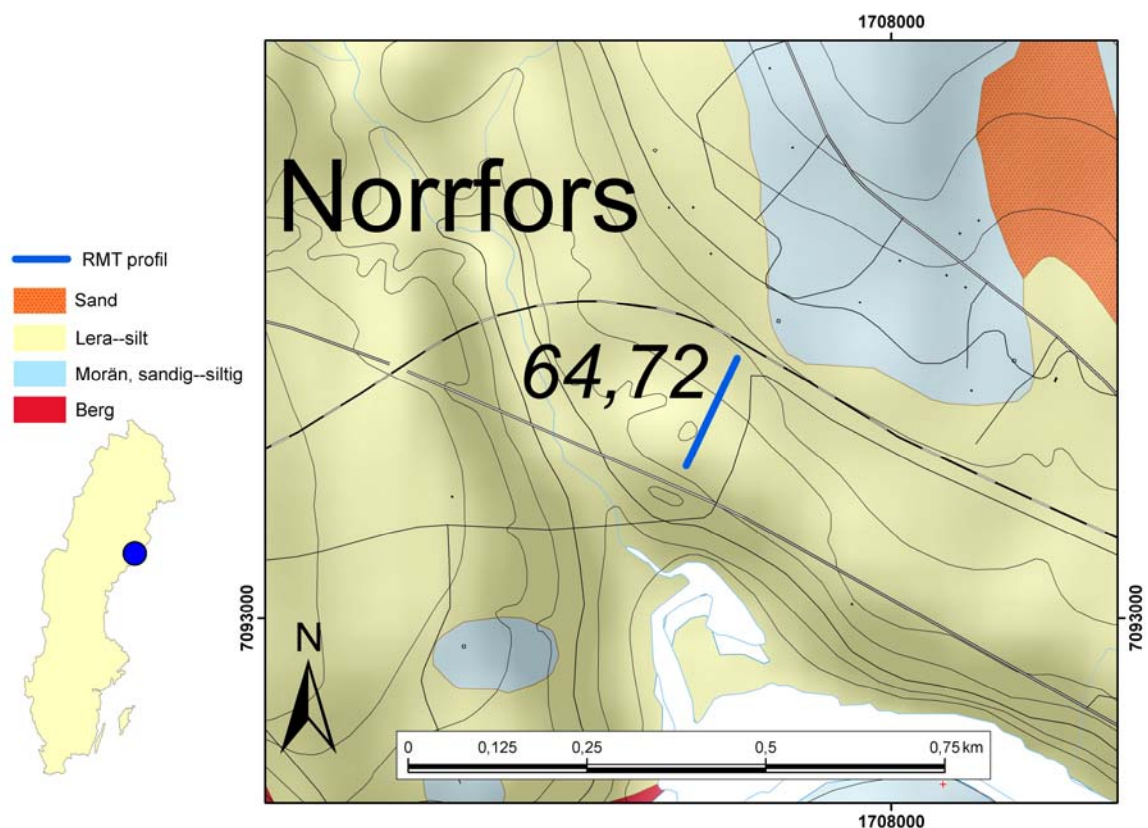
I den överst liggande sanden ligger pH kring 5. I silten uppmättes pH värden under 3 i vissa prover. I den icke oxiderade svartmockan ligger pH närmare 7. Dessa resultat visar att svartmockan på denna plats efter oxidation ger upphov till sk sur sulfatjord. Den överst liggande sandens pH har dock troligtvis inte påverkats av sulfidoxidation.

Mätning av den magnetiska susceptibiliteten visar att den svarta leran har högre susceptibilitet (ca 30-50 $\times 10^{-5}$ SI) än ovanliggande sand (omkring 5 $\times 10^{-5}$ SI). Leran uppvisar även högre magnetisk susceptibilitet än de mätningar vi tidigare gjort på sulfidhaltiga sediment i Mälardalen. Resultaten tyder på förekomst av magnetiska mineral, som tex greigite i de sulfidhaltiga lerorna i Norrfors.

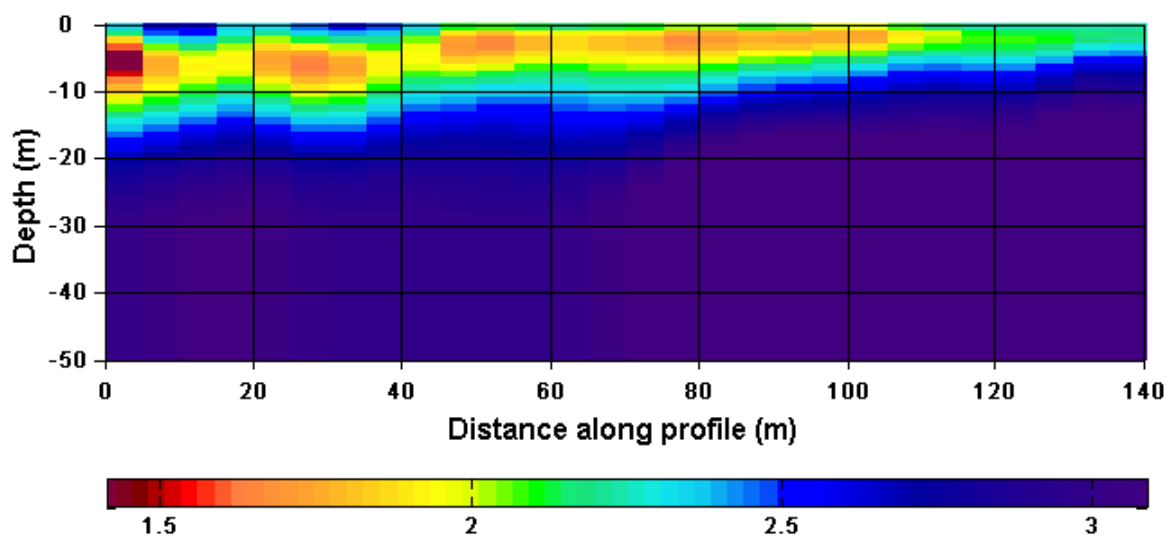
RMT mätningar utfördes längst en profil som drogs mellan vägen och järnvägen (Figur 19). Resultaten från mätningar med RMT (Figur 20) visar att det finns ett lågresistivt jordlager som tunnar ut i riktning mot järnvägen. Närmast vägen överlagras det lågresistiva skiktet av ett mer högresistivt lager. Detta högresistiva lager utgörs troligen av den älvsand som i schaktet

visat sig överlagra den sulfidhaltiga svartmockan. Mäktigheten på det lågresistiva lagret, som uppmättes med RMT (Figur 20), är av samma storlekordning som den svartmocka som tidigare dokumenterats på denna lokal. Resultaten visar därför att de sulfidhaltiga sedimenten på denna plats har en lägre resistivitet än omgivande jordarter. Den sulfidhaltiga svartmockan på denna lokal har dock en högre resistivitet än motsvarande sediment i Mellansverige, se t.ex. resultaten från Fiholm mellan Strängnäs och Eskilstuna (Table xx).

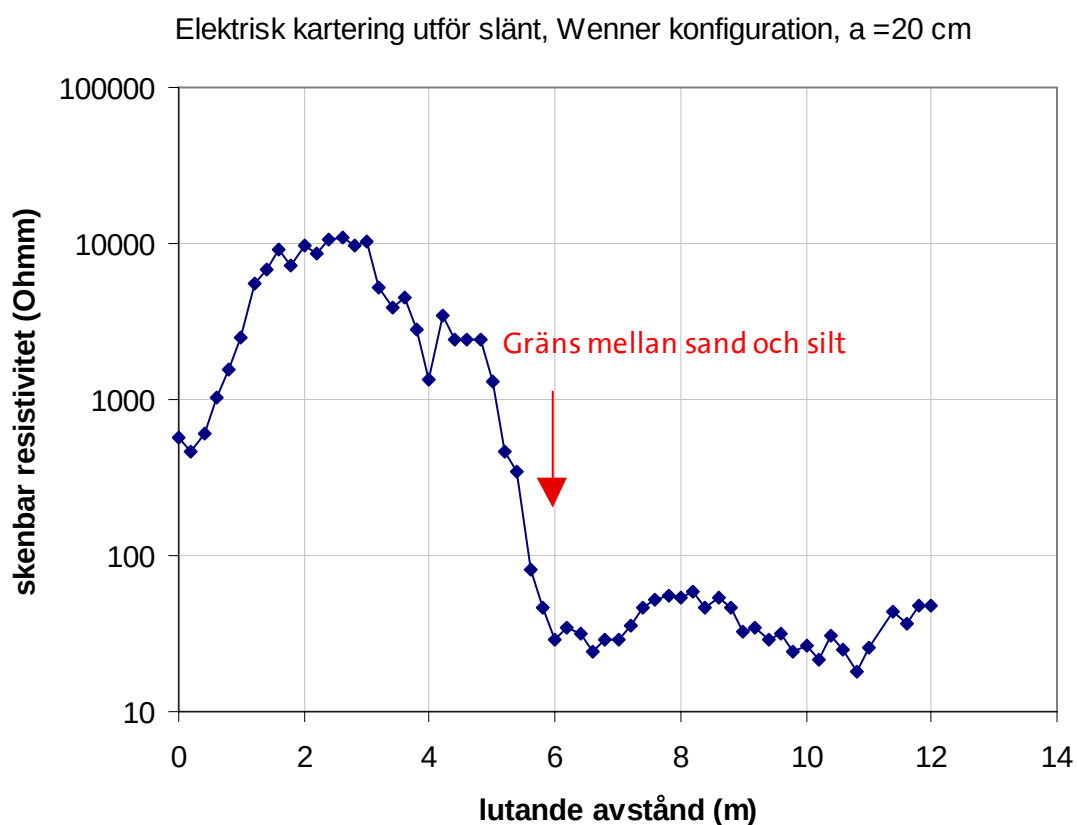
En resistivitetsprofil uppmättes även utför den avschaktade slänten, efter vägens nordsida (Figur 21). Vid mätningen användes wennerkonfiguration med ett elektrodavstånd, $a=20\text{cm}$. Resultaten visar en tydlig gräns mellan sand och silt där att den sulfidhaltiga silten har en betydligt lägre resistivitet jämfört med den ovanliggande sanden.



Figur 19. Jordartskartan över området kring Norrfors med de uppmätta profilerna.



Figur 20. Resultat från mätningar med RMT vid Norrfors mellan Umeå och Vännäs.



Figur 21. Resultat från den elektriska sondering som utfördes merför den nygrävda slänt. De översta sedimenten utgörs av älsediment medan de underliggande sedimenten utgörs av sulfidhaltig silt. Den närmast markytan liggande silten har dock exponerats för syre varvid sulfiderna oxiderat.

Västerslätt

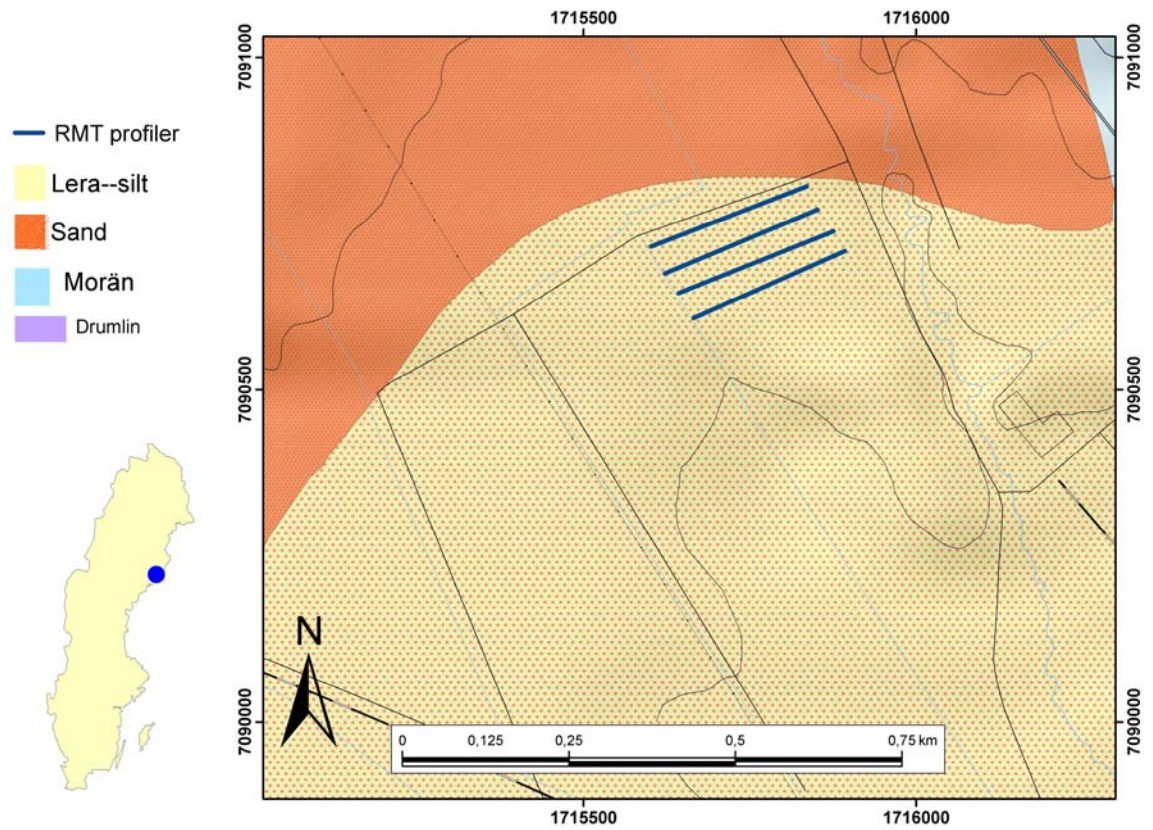
(7090718N, 1715567E; 20 m ö. h. y.)

Denna plats ligger strax nordväst om Umeå inom ett område med vidsträckta dikade åkermarker. Enligt jordartskartan består dessa områden av silt som överlagras av några dm sand (Figur 22). Under 2003 utfördes borrhning ner till ett djup av fem meter under markytan (Sohlenius mfl, 2004). De översta tre metrarna består av gyttjig silt med ljusa mm tunna horisontella skikt, som ej är tydligt svartfärgad av FeS. De understa två metrarna består däremot av svartmocka. Vid fältarbete 2004 grävdes ett maskingrävt schakt området. Gropen hade ett totaldjup av drygt 360 cm och visade samma stratigrafi som tidigare dokumenterats av Sohlenius mfl. (2004). Den översta 0,8 metern består av oxiderad rostfläckig grovsilt/finsand. Den saknar dock de för sura sulfatjordar så karakteristiska vertikala rosttäckta sprickorna. Det beror troligen på att jordarten har en låg lerhalt.

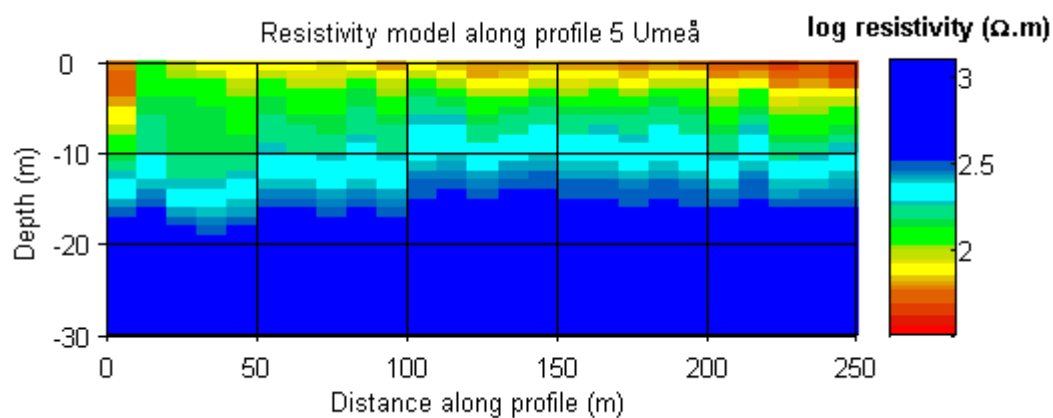
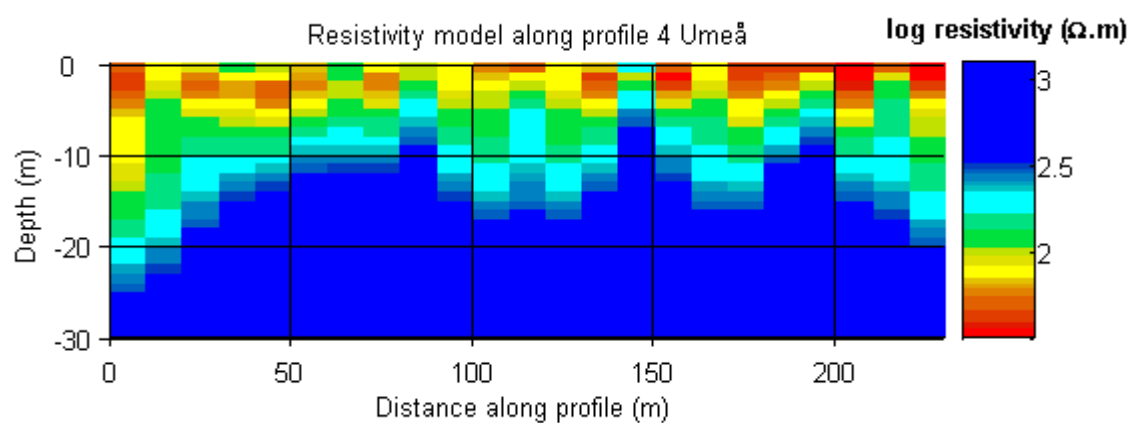
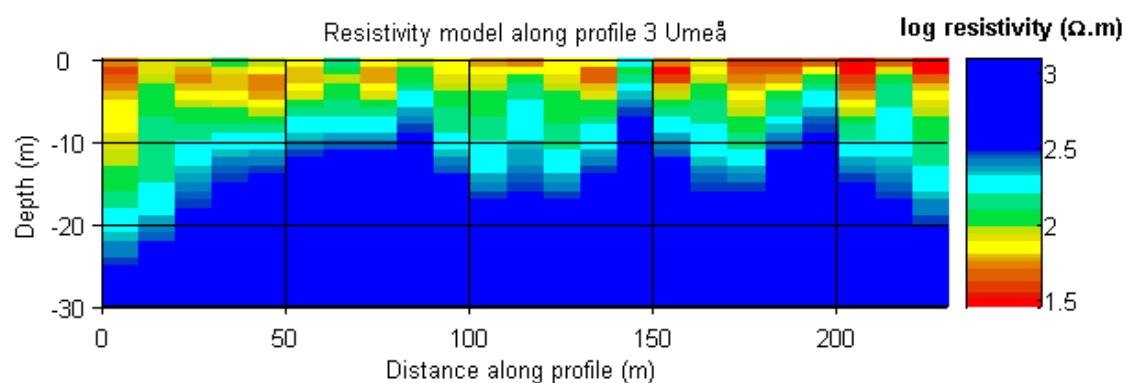
De oxiderade lagren har pH på 3,7, medan de reducerade sedimenten har pH 6,1-6,2. Mätningen gjordes dock efter det att jorden varit exponerad för luftens syre i närmare en timme vilket gör att oxidation av FeS kan ha lett till att pH under denna tid kan ha sjunkit.

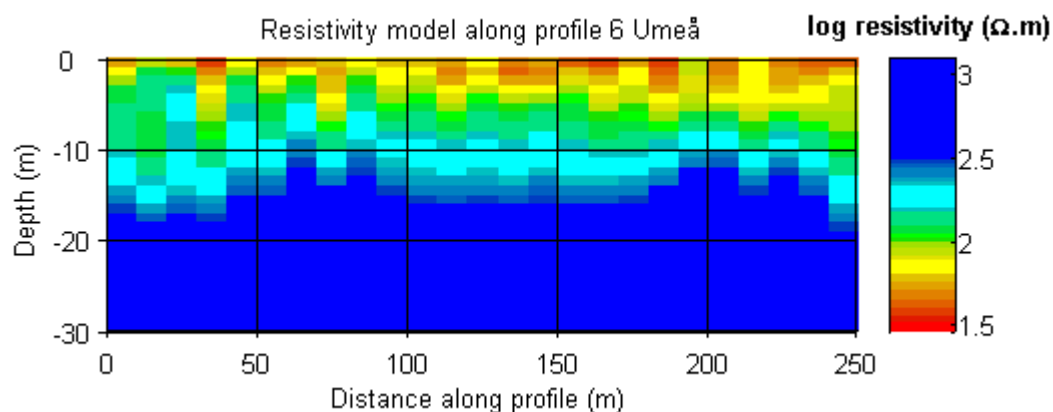
Kolhalten pendlar mellan 1 och 1,5% genom sedimentpacken (Tabell 3). Svavelhalten överstiger i flera prover 1% vilket visar att svavlet i stor utsträckning är bundet till sulfidmineral. Både svartmockan och den ovan liggande (ej svartfärgade silten) innehåller sulfidbundet svavel. De översta två proverna har låga svavelhalter vilket tillsammans med de låga pH värdet visar att sulfiderna här oxiderat. En kornstorleks analys visar att silten har en lerhalt som ligger strax under 5%.

Resultat från mätningar med RMT visar att silten under grundvattenytan har en låg resistivitet (Figur 23).



Figur 22. Jordartskartan över området kring Västerslätt med de uppmätta profilerna.





Figur 23. Resultat från mätningar med RMT på lokalen Västerslätt. (Profil 6-9)

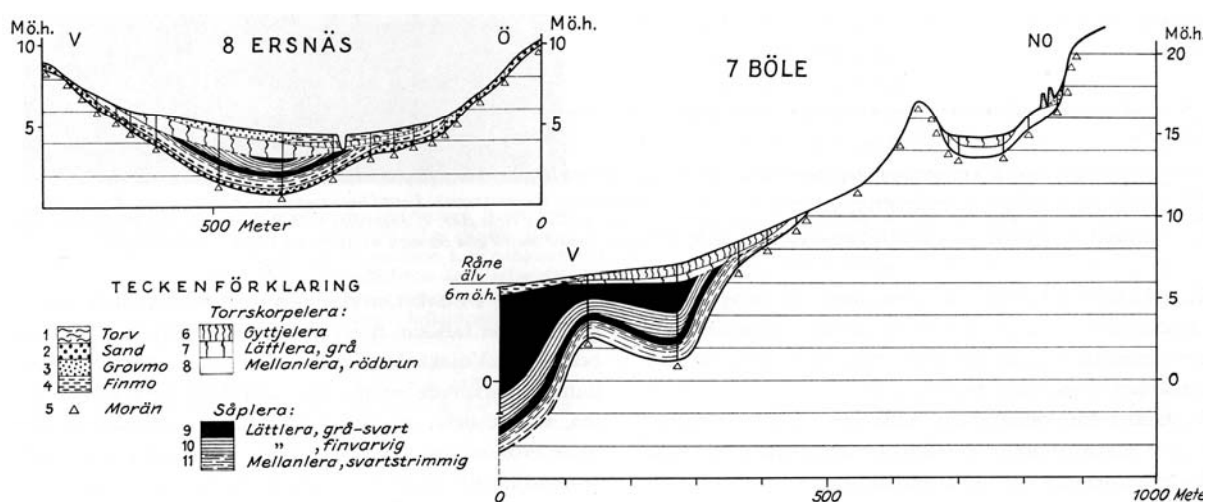
Tabell 3. Halterna av kol, svavel och kväve i jordar från Västerbotten.

Lokal	Djup under markytan (m)	C%	N%	S%
Norrfors*	0,15	0,730	0,068	0,881
Norrfors*	3,3	0,634	0,058	0,492
Norrfors*	3,8	0,583	0,057	0,370
Norrfors*	(övre ljusa bandet)	1,066	0,116	0,589
Norrfors	(övre ljusa bandet)	0,56	0,074	0,30
Norrfors	(bruna bandet)	0,57	0,073	0,43
Norrfors*	(bruna bandet)	0,968	0,103	1,664
Norrfors*	6,5	0,779	0,067	0,278
Norrfors*	6,9	0,558	0,057	0,107
Norrfors*	7,8	0,597	0,053	0,035
Västerslätt	2	1,33	0,147	0,36
Västerslätt	2,80	1,30	0,167	0,69
Västerslätt*	0,05-0,06	1,453	0,099	0,118
Västerslätt*	0,28-0,29	1,377	0,113	0,528
Västerslätt*	0,75-0,76	1,070	0,091	0,676
Västerslätt*	1,25-1,26	1,531	0,163	1,198
Västerslätt*	1,75-1,76	1,575	0,174	1,003
Västerslätt*	2,5	1,391	0,153	0,895
Västerslätt*	3,5	1,182	0,134	0,796

* dessa data redovisades även i en tidigare slutrapport (Sohlenius mfl, 2004)

Norrbotten

Mätningar med RMT och Lund Imaging System utfördes på två platser belägna på jordbruksmark där silt är den dominerande jordarten. Försök gjordes även att utföra mätningar med resistivitetsonden. På båda platser finns tidigare stratigrafiska undersökningar som visar på förekomster av sulfidhaltiga sedimenten (Figur 24; Fromm, 1965).



Figur 24. Resultat från stratigrafiska undersökningar utförda av Fromm (1965). Tolkningarna är baserade på ett antal borrhningar vilka är markerade i figurerna.

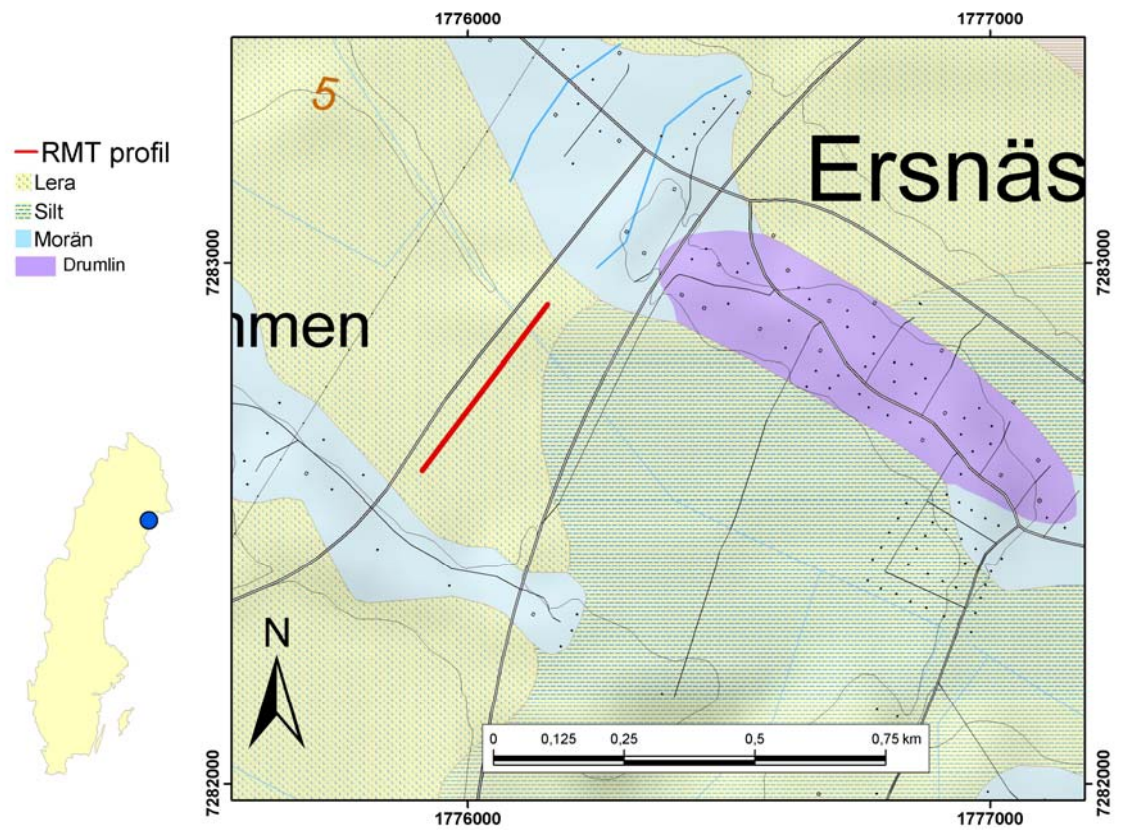
Ersnäs

(7282865N, 1776128E, 5 m ö. h. y.)

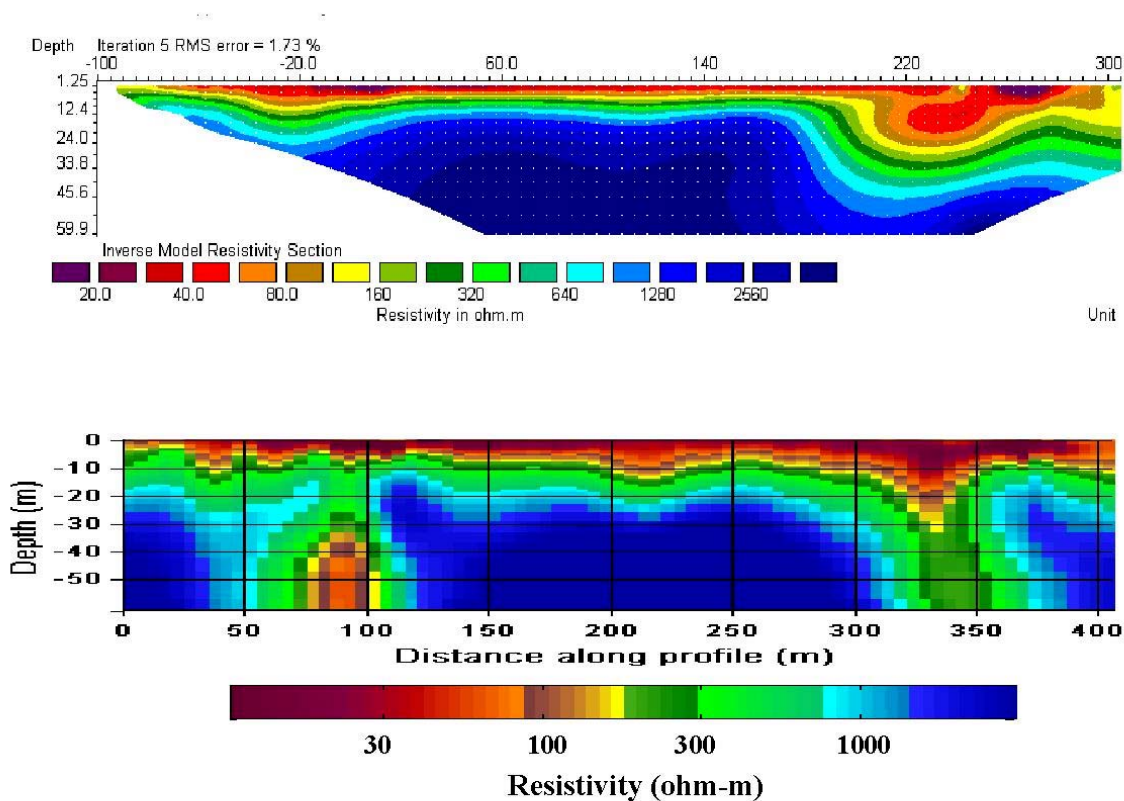
Lokalen ligger vid E4:an mellan Luleå och Piteå. Enligt jordartskartan är silt den jordart som dominerar platsen (Figur 25). Den undersökta platsen ligger på en yta vilken idag används som gräsvall. Profilen drogs över en flack sänka mellan två moränkullar. Resultat från Fromm (1965) visar att de sulfidhaltiga sedimenten i sänkans mitt når en mäktighet på ca 2 meter.

De nu undersökta lokalen ligger nära den profil som undersöktes stratigrafiskt av Fromm (1965). Resultaten från mätningarna med RMT och Lund Imaging System visar att de mäktigaste lagret med lågresistivt material finns nära den bäck som korsar profilen (Figur 26). Detta lager når en mäktighet av närmare 10 meter. I övriga delar av profilen har det lågresistiva lagret en mäktighet på drygt fem meter (Figur 26). Resultaten från de geoelektriska mätningarna skiljer sig delvis från de som dokumenterades av Fromm (1965; se Figur 24). Den tidigare stratigrafiska undersökningen visar inte att det förekommer ett mäktigt lager med sulfidhaltiga sediment närmast bäcken (Figur 24). För att verifiera mätningarna med RMT och Lund Imaging System gjordes ett försök att vid bäcken utföra en mätning med den resistivitetsond som lånats från GTK. Det var dock endast möjligt att med handkraft trycka ner sonden till ett djup av närmare två meter där resistiviteten steg. Orsakerna till skillnaderna mellan undersökningen utförd av Fromm (1965) och de här erhållna resultaten är inte kända. Det är möjligt att de geoelektriska metoderna överskattat de sulfidhaltiga sedimentens

mäktighet, men det är också tänkbart att sulfidsedimenten längst Fromm's profil är tunnare än längs den här uppmätta profilen.



Figur 25. Jordartskartan över området kring Ersnäs med den uppmätta profilen.



Figur 26. Resultat från mätningar med Lund Imaging System (överst) och RMT (underst) i Ersnäs, mellan Luleå och Piteå.

Böle

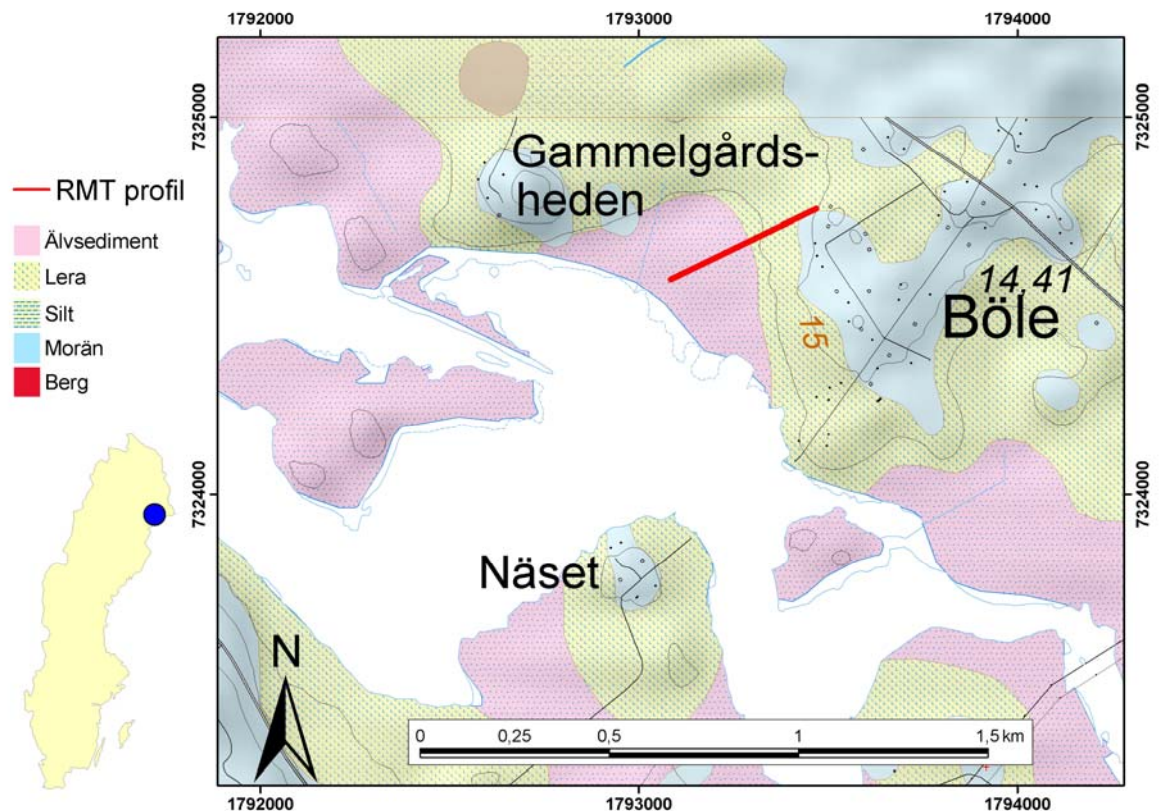
(7324570N, 1793082E, 10-15 m ö. h. y.)

Lokalen ligger vid Råneälven ca 30 kilometer norr om Luleå. Den undersökta platsen ligger på en yta vilken idag används som gräsvall. Profilen följer en svag sluttning ner mot Råne älv. Det var ej möjligt att dra profilen ner till älven eftersom terrängen var för oländig. Jordarterna längst profilen utgörs enligt jordartskartan av älvsediment närmast älven och lera högre upp (Figur 27). Dessa älvsediment underlagras sannolikt av leran.

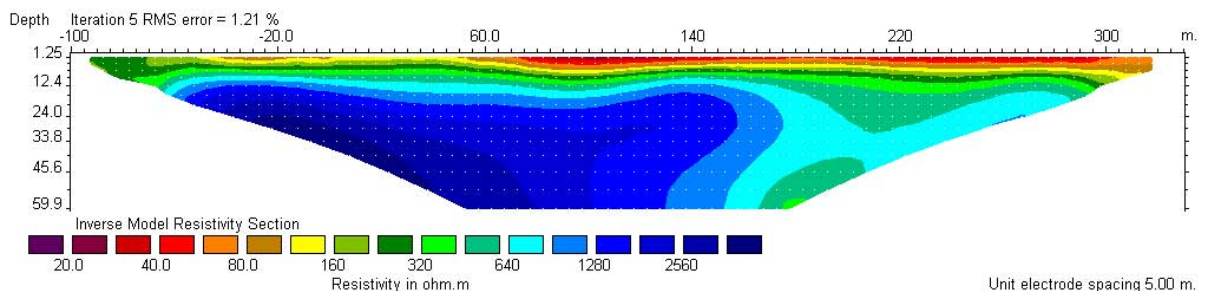
Tidigare stratigrafiska undersökningar visar att det finns närmare tio meter sulfidhaltiga sediment närmast Råne älv (Figur 24 från Fromm 1965). Dessa sediment är dock betydligt tunnare i sluttningen ner mot älven. Fromm's profil går över ett område som idag delvis består av tät skog. De geoelektriska mätningarna utfördes därför längst en profil som ligger ett hundratal meter sydost om den tidigare undersökta profilen. De sulfidhaltiga sedimenten

uppvisar på denna lokal samma stratigrafiska fördelning som vid lokalen Ersnäs (Fromm, 1965).

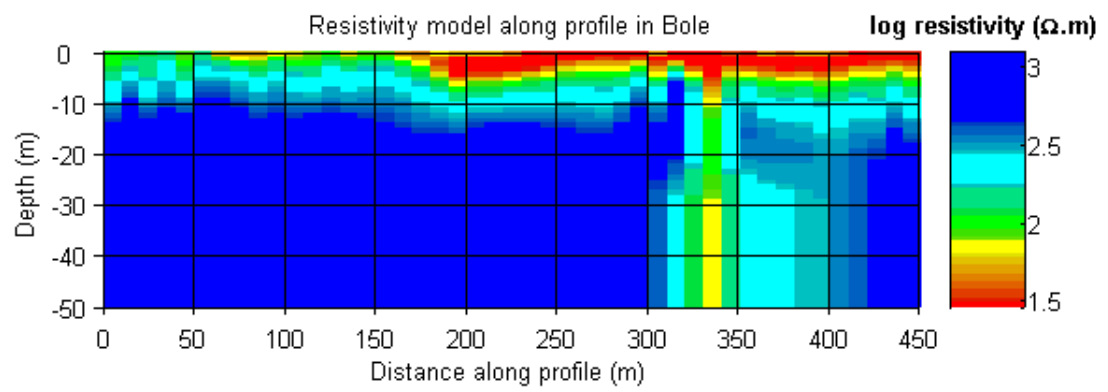
Resultaten från mätningarna med RMT och Lund Imaging System visar att det troligtvis inte finns sulfidhaltiga sediment i den nordostliga delen av profilen. Närmare älven, ca 150 meter från profilens startpunkt, minskar dock resistiviteten i de mest ytnära jordlagren (Figur 28 och 29). Det lågresistiva ytlagret har en total mäktighet på drygt fem meter, vilket överensstämmer med de mäktigheter Fromm (1965) uppmätte en bit från älvens strand. Närmare älven har dock Fromm dokumenterat förekomster på närmare 10 meter sulfidhaltiga sediment (Figur 24). Fromm's profil når dock närmare älven där sedimentens mäktighet kan förväntas vara större. De två geoelektriska metoderna visar en god överensstämmelse. RMT-metoden ge dock en bättre upplösning i de mest ytnära lagren.



Figur 27. Jordartskartan över området kring Böle med den uppmätta profilen.



Figur 28. Resultat från mätningar med Lund Imaging System i Böle.



Figur 29. Resultat från mätningar med RMT i Bole.

Diskussion och slutsats

Tidigare undersökningar har visat att områden med sulfidhaltiga sediment ofta redovisas som lergyttja/gyttjelera på jordartskartorna (Sohlenius mfl 2004). De jordartsgeologiska kartorna ger dock ingen direkt information om förekomster av sulfidhaltiga sediment. I många områden är dessutom den jordartsgeologiska informationen för översiktlig för att ge en uppfattning om var sulfidhaltiga sediment kan tänkas förekomma. Det har även visat sig att SGUs biogeokemiska kartor kan användas för att identifiera områden där de sulfidhaltiga sedimenten oxiderat och bildar sk sura sulfatjordar. I sådana områden visa de biogeokemiska kartorna på förhöjda halter av vissa metaller, ex Ni (Lax, 2005). Dessa kartor bygger dock på en relativt gles provtagning (1 prov 6/km²). Det är därför inte möjligt att med biogeokemiska kartor identifiera mindre områden med sulfidhaltiga sediment. Även om det många gånger är möjligt att använda befintliga geologiska kartor för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment behövs metoder för att mer i detalj kartlägga utbredningen av dessa sediment.

Flygburna VLF-mätningar har används för att framställa kartor som visar marken skenbara resistivitet. På dessa kartor syns lerområden som områden med en relativt låg resistivitet. Det har visat sig att de områden som utgörs av gyttjelera ofta har en lägre resistivitet än andra leror (Sohlenius mfl 2005). Med nuvarande avstånd mellan flyglinjerna är det endas möjligt att identifiera ytor med gyttjesediment som överstiger en viss storlek. Det är följaktligen inte möjligt att med dessa data identifiera mindre områden där det finns anledning att misstänka att sulfidhaltiga sediment förekommer. I denna undersökning har vi därför använt flera geoelektriska metoder för att testa om dessa kan användas för att avgränsa sulfidhaltiga sediment. Högupplösande flygmätningar med ett avstånd mellan flyglinjerna på 50 eller 100 meter skulle dock göra det möjligt att på ett mer detaljerat sätt kartera de finkorniga sedimentens resistivitet från luften.

Resultaten från denna undersökning visar att det är möjligt att använda geoelektriska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. Det är även möjligt att med dessa metoder avgränsa de sulfidhaltiga sedimenten i yt- och djupled. Det är däremot inte möjligt att använda dessa metoder för att identifiera områden med sura sulfatjordar. De sulfidhaltiga sedimenten utgör dock ofta potentiella sura sulfatjordar och det är därför värdefullt att kunna identifiera dessa jordar för att undvika en markanvändning som leder till bildandet av sura sulfatjordar och därmed ett ökat läckage av vissa metaller.

Resultaten visar att de sulfidhaltiga sedimenten har en lägre resistivitet än omgivande finkorniga, sulfidfria sediment. Den absoluta resistiviteten hos de sulfidhaltiga sedimenten varierar dock mellan de tre undersökta områdena. Det är tydligt att de sulfidhaltiga sedimenten i norra Sverige har en högre resistivitet än motsvarande sediment längre söderut (Tabell 4). Förekomster av sulfidhaltiga sediment måste därför alltid verifieras med stratigrafiska undersökningar. Resultat från resistivitetmätningar kan användas för att hitta lämpliga platser för sådana stratigrafiska studier.

Orsaken till skillnaden i resistivitet mellan södra och norra Sverige är inte känd. Det är möjligt att de sediment där sulfiderna förekommer har olika resistivitet. Sedimenten i Mälardalen har

generellt sett en högre lerhalt än de i norra Sverige (cf. Eriksson mfl., 1999). Eftersom lermineral har en låg resistivitet kan detta förklara skillnaden.

Orsaken till den relativt låga resistiviteten hos de sulfidhaltiga sedimenten är inte heller känd. Eftersom de sulfidhaltiga sedimenten avsatts i bräckt vatten är det möjligt att höga koncentrationer av reliktsalthaltigt vatten orsakar den låga resistiviteten. Det antagandet stöds av resultat från Suppala mfl. (2005) som studerade sulfidhaltiga sediment i Finland och fann en korrelation mellan låg resistivitet och höga koncentrationer av klorid i porvattnet. De högsta kloridkoncentrationerna uppmättes i de sulfidhaltiga sedimenten och det var därför möjligt att använda geoelektriska metoder för att avgränsa förekomsterna av dessa sediment.

Tabell 4. De sulfidhaltiga och omgivande sulfidfria sedimentens genomsnittliga resistivitet (resultat från mätningar RMT).

Område	Lokal	Resistivitet (ohm.m) sulfidhaltiga sediment	Resistivitet (ohm.m) omgivande sediment
1	Fiholm ⁺	2-5	7-12
1	Uddetorp ⁺	8-15	30-40
2	Norrfors [*]	23-100	300-1100
3	Ersnäs ^{**}	20-40	60-100
3	Böle ^{**}	20-40	60-100

+Mälaren, *Västerbotten, **Norrbotten

Sulphidic sediments and acid sulphate soils

11-12 maj 2005

I maj 2005 anordnades en mindre konferens på SGU i Uppsala med titeln: *"Sulphidic sediments and acid sulphate soils"*. Syftet med mötet var dels att diskutera vilka metoder som kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment och dels att diskutera hur miljöproblem associerade med sulfidhaltiga sediment kan minimeras.

Ett 30-tal personer från konsultföretag, myndigheter och universitet i Sverige och Finland deltog på mötet. Under mötets första dag hölls samantaget 11 muntliga presentationer dessutom presenterades några poster. Tre av presentationerna behandlade resultat som tagits fram under detta och andra SGU finansierade FoU projekt. På mötets andra dag anordnades en exkursion under vilken vi besökte flera lokaler med kring Uppsala där sulfidhaltiga sediment förekommer. Ett viktigt syfte med exkursionen var att diskutera fältmetoder som kan användas för att identifiera dessa jordar. Under mötet knöts flera kontakter som kommer att vara viktiga vid framtida diskussioner om sulfidhaltiga sediment och dras miljöpåverkan.

Mötets första dag

Under den första dagen hölls nedanstående föredrag:

Föredragshållare

Titel

Mats Åström, (Högskolan i Kalmar)

Forskning i Åbo och Kalmar – en överblick

Gustav Sohlenius, SGU

Sulphidic sediments and acid sulphate soils in Sweden

Petri Lintinen, Heikki Vanhala, Ilkka Suppala, Tajja Huotari och Mikael Eklund (Finlands geologiska undersökning)

Geochemistry and depositional environment of glacial and postglacial sulphide rich sediments in Rintala, Seinäjoki, western Finland.

Peter Österholm, (Åbo akademi)

Previous, current and future leaching of sulphur and metals from acid sulphate soils in W. Finland

Robert Sundström, (Åbo akademi)

En juridisk analys av dikning förorsakat syra- och metalläckage från finländsk jordbruksmark (sura sulfatjordar).

Anton Boman, (Åbo akademi)

Laboratorie- och fältmetoder för bestämning av sulfider i sediment och sura sulfatjordar

Ingrid Öborn, SLU

Seasonal variation in stream water chemistry in some small catchments dominated by acid sulphate soils used for agricultural production

Kaj Lax, SGU

Acid sulphate soils in Sweden and impact on stream plant chemistry

Lena Persson och Mehrdad Bastani, SGU

Using electric and electromagnetic methods to map the extension of sulphidic sediments in Sweden

Ilkka Suppala, Heikki Vanhala, Petri Lintinen
och Taija Huotari, (Finlands geologiska
undersökning)

Geophysical characterising of sulphide rich fine-grained
sediments in the Kyrönjoki river valley, western Finland.

Josef Mácsik, Ecoloop

Guide lines for managing sulphide soils

Erik Jonsson, Golder Uppsala

Development of a field method for assessment of
environmental impacts of acid sulphate soils

Föredragen behandlade flera aspekter på de sulfidhaltiga sedimenten. Några presentationer tog upp på vilket sätt dess jordar påverkar miljön. Peter Österholm (Åbo akademi) har gjort beräkningar av hur lång tid det tar innan läckaget från de sura sulfatjordarna i Finland minskar. Enligt dessa beräkningar kommer det kraftiga metalläckaget ha slutat inom de närmsta hundra åren. Han fastställer vidare att läckaget av metaller till allra största delen är en effekt av dikning och inte en naturlig process.

Robert Sundström (Åbo Akademi) har gjort en juridisk analys av de sura sulfatjordarnas miljöpåverkan. Han konstaterar att de sura sulfatjordarna har en sådan negativ påverkan på miljön att det strider mot EU:s ramdirektiv för vatten (2000/60/EC). Trots det nämns de sällan i de finska miljöprogrammen och det har aldrig behövts något tillstånd för att dika dessa jordar.

Flera föredrag behandlade olika metoder, tex geofysik och biogeokemiska kartor, som kan användas för att identifiera områden med sura sulfatjordar. Under mötet presenterades dessutom några postrar. Mötet avslutades med en diskussion om hur man på bästa sätt ska kunna minimera de negativa miljökonsekvenser som uppstår efter oxidation av sulfidhaltiga jordar.

Mötets andra dag - exkursion

Under mötets andra dag anordnades en exkursion där det blev tillfälle att se de olika typer av sulfidhaltig sediment och sura sulfatjordar som förekommer kring Uppsala. Ett viktigt syfte var att diskutera hur dessa jordar kan karaktäriseras i fält. Stora delar av centrala Uppsala underlagras av sulfidhaltiga sediment. Idag pågår och planeras fler byggnationer kring staden där det är nödvändigt att schakta bort stora volymer sulfidhaltig jord. Det har visat sig att de sulfidhaltiga jordarna kring Uppsala ofta, men inte alltid, innehåller kalk. Denna kalk kan förväntas helt eller delvis buffra den surhet som uppstår då sulfidmineralen oxiderar. Statens geotekniska institut (SGI) har i laboratoriet analyserat buffringspotentialen hos några sulfidjordar och fastställt att det inte föreligger någon risk för en kraftig sänkning av pH om sulfiderna oxiderar. Det finns däremot inga studier från naturliga förhållanden som visar om sulfidjordarnas kalk förmår att buffra sulfidoxidationen. På Kungsängen finns exempelvis flera meter, icke kalkhaltig, sulfidhaltig gyttjelera som troligtvis har en dålig buffrings potential.

Stora mängder sulfidjord har idag schaktets bort och lagts exempelvis i bullervallar. Eftersom det ej är helt säkerställt att sura förhållanden inte uppstår efter oxidation av sulfidjordarna från Uppsalatrakten är det viktigt att följa upp och reda på om läckage av spårelement sker från dessa schaktmassor.



Figur 30 Sulfidhaltig gyttja provtagen med ryssborr på Kungsängen söder om Uppsala.



Figur 31. Bild från exkursionen som visar besök vid byggarbetsplatsen av Musikens hus i Uppsala.

Under exkursionen besöktes nedanstående lokaler.

Kungsängen ca 3 km söder om centrala Uppsala. Sveriges lantbruksuniversitet har utfört flera fältstudier kring Kungsängens gård. Stora delar av åkrarna kring gården underlagras av sulfidhaltiga sediment. Borrningar har visat att de sulfidhaltiga sedimenten på denna plats är upp till 14 meter mäktiga (Wiklander och Hallgren 1949; Järnefors, 1958). I en borrhäls från Kungsängen har Järnefors (1958) konstaterat att den sulfidhaltiga leran når ett djup av 14 meter. De översta metrarna av leran är kalkfri medan underliggande lera innehåller kalk. Eftersom området dikats för odling har sulfiderna i de närmast markytan liggande lagren oxiderat vilket lett till ett lågt pH. Vid besöket på lokalen provtogs sulfidhaltig gyttjeler med ryssborr (Figur 30). I en grävd grop visades exempel på den sura sulfatjord som bildats på platsen. Dessutom demonstrerades den resistivitetssond som utvecklats vid GTK (Figur 5).

Stefan Andersson från Institutionen för markvetenskap vid Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) berättade om ett forskningsprojekt som studerar kaliumbalansen i marken. En viktig

målsättning med projektet är att ta reda på hur mycket kalium från vittring av markens mineral bidrar till balansen av detta ämne. En av projektets försöksytor ligger på Kungsängen.

Lerområdet mellan Årsta och Skölsta, ca 4 km öster om centrala Uppsala. Här besöktes en skärning som frilagts vid byggnation för ny dragning av E4:an. Där den nya motorvägen ska korsa en museijärnväg (Lännakatten) har schaktningsarbeten utförts varvid sulfidhaltiga sediment påträffats. Dessa sediment innehåller kalciumkarbonat och mätningar av buffringspotentialen som utförts av SGI indikerar att det inte föreligger någon risk för att pH sjunker nämnvärt om sulfidmineralen oxiderar. Harald Agrell (SGU) har dokumenterat skärningen och redogjorde vid besöket för sina resultat. Öster om skärningen överlagras den sulfidhaltiga gyttjeleran av några decimeter sand/silt vilket är inte helt vanligt i denna del av Sverige.

Byggnation av **Musikens hus** vid Vaksala torg mitt i Uppsala. Inför schaktningsarbetet påträffades sulfidhaltiga sediment. Studier har visat att jordarna innehåller höga halter kalciumkarbonat och har därmed en god förmåga att buffra den surhet som uppkommer vid en eventuell oxidation av sedimentets sulfider. Vid besöket pågick grävningar (Figur 31). Leran innehåller FeS som ger den ett gråsvart utseende. Då jorden exponerats för luft under några timmar oxiderar FeS och jordarten ljusnar den betydligt. Kalken i denna jordart verkar i stor utsträckning föreligga i form av musselskal.

Skediga norr om Uppsala. Platsen ligger i anslutning till Uppsalaåsen. SGU har här utfört flera geofysikstudier. Syftet med dessa undersökningar har varit att kartlägga åsmaterialets utbredning i djupled. Isälvs materialet överlagras i stor utsträckning av lera. Åsen utgör Uppsalas grundvattentäkt och det är därför av vikt att känna till dess utbredning på djupet. Mehrdad Bastani (SGU) presenterade resultat som erhållits efter mätningar med RMT på denna plats.

Ärentuna norr om Uppsala. Vi denna lokal demonstrerade Sten-Åke Ohlsson (SGU) hur provtagningen vid SGUs biogeokemiska kartering går till. Vid karteringen samlas vissa växter in från botten av utvalda vattendrag. Växterna analyseras sedan med avseende på ett stort antal grundämnen. Tidigare undersökningar har visat att bäckvattenväxter från områden med sura sulfatjordar uppvisar relativt höga halter av flera ämnen (Lax 2005, Sohlenius mfl, 2004). De biogeokemiska kartorna kan därför användas för att identifiera större områden där sura sulfatjordar förekommer.

Referenser

- Fredén, C. (red.), 2002. Berg och jord. Sveriges nationalatlas. Tredje upplagan. 208 pp.
- Fromm, E. 1965. Beskrivning till jordartskartan över Norrbottens län nedanför lappmarksgränsen. Sveriges Geologiska Undersökning Ca 39, 236 pp.
- Bastani, M. 2001. EnviroMT – a New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System. Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala Dissertations from the faculty of Science and Technology 32. ISBN 91-554-5051-2.
- Eriksson, J., Andersson, A., Andersson, R., 1999. Texture of agricultural topsoils in Sweden. Swedish Environmental Protection Agency, Report 4955, 26 p. (English summary).
- Georgala, D., 1980. Palaeoenvironmental studies of post-glacial black clays in north-eastern Sweden. Stockh. Contrib. Geol., XXXVI, 151 pp.
- Granlund, E. 1943. Beskrivning till jordartskarta över Västerbottens län nedanför odlingsgränsen. SGU Ca 26. 165 pp.
- Ivarsson, H., Persson, A., Andersson, T. och Bergqvist, A. 1996: Sulfidjordar i norra och mellersta Sverige. Umeå universitet, Inst. För ekologi och miljövärd. 21 pp.
- Järnefors, B. 1958: Beskrivning till jordartskartan över Uppsalatrakten. SGU Ba 15. 46 pp.
- Lax, K. 2005: Analysis of stream plants as indicators of acid sulphate soils in Sweden. Submitted to Agricultural and Food Science (2004-08-28).
- Lax, K., 2005. Stream plant chemistry as indicator of acid sulphate soils in Sweden. Agricultural and Food Science 14, 83-87.
- Lax, K., Sohlenius, G., 2006. Sura sulfatjordar och metallbelastning. Geological Survey of Sweden, Report 2006:5, 19 p (in Swedish).
- Lintinen, P., Suppala, I., Vanhala, H., Eklund, M., 2003. Survey of a buried ice-marginal deposit by airborne EM measurements – A case from Kyrönjoki valley plain in southern Osterbothnia, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 36, 67-75.
- Manngård, B. 1997. Sulfidhaltiga lerors inverkan på vattenkemin i två tillflöden till Sörfjärden, Mälaren. Institutionen för markvetenskap, Avd. för marklära och ekokemi, Examensarbeten- och seminarieuppsatser Nr 28, 54 sid.
- Puranen, R., Mälilä, M., Sulkanen, K. och Grundström, A. 1997. A new apparatus for electric conductivity and temperature logging of soft sediments. Geological Survey of Finland, Special Paper 23, 149-155.
- Sohlenius, G., Persson, L., Lax, K., Andersson, L. och Daniels, J. 2004. Förekomsten av sulfidhaltiga postglacial sediment. Slutrapport FoU projekt. SGU-rapport 2004:9.
- Sohlenius G. och Öborn I., 2003. Slutrapportering av projektet "Geokemisk karakterisering av sulfidhaltiga jordar" SGU
- Sohlenius G. och Öborn I., 2004. Geochemistry and partitioning of trace elements in acid sulphate soils in Sweden and Finland before and after sulphide oxidation. Geoderma 122, 167-175.

- Suppala, I., Lintinen, P., Vanhala, H., 2005. Geophysical characterisation of sulphide rich fine-grained sediments in Seinäjoki area, western Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 38, 61-71.
- Suppala, I., Vanhala, H. and Lintinen, P. 2003. Comparison between ground and airborne EM data in mapping acid sulphate soils and sulphide bearing clays in the Kyrönjoki valley, western Finland. 9th Meeting of Environmental and engineering Geophysics, Prague, August 31-September 4, 2003 Czech Republic.
- Walker, J., och Houser, P. R., 2002. Evaluation of the OhmMapper instrument for soil moisture measurement. Soil Science Society of America Journal. 66, 728-724.
- Ward, S.H., 1990. Resistivity and Induced polarisation methods, In: Ward, S.H., (Ed.) Geotechnical and Environmental geophysics, vol 1, Society of Exploration Geophysics, 147-189.
- Åström, M. 1996. Geochemistry, chemical reactivity and extent of leaching of sulphide-bearing fine-grained sediments in Southern Ostrobothnia,, Western Finland. PhD theses, Department of Geology and Mineralogy, Åbo Akademi University.
- Åström, M. och Björklund, A. 1995. Impact of acid sulfate soils on stream water geochemistry in western Finland. Journal of Geochemical Exploration 55, 163-170.
- Öborn, I. 1994. Morphology , chemistry, mineralogy, and fertility of some acid sulfate soils in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, 18, 46 pp.