



Sveriges geologiska undersökning

Förekomsten av sulfidhaltiga postglaciala sediment



Gustav Sohlenius, Lena Persson, Kaj Lax,
Leif Andersson & Johan Daniels

Slutrapport

Innehåll

Sammanfattning	2
<i>Framtida undersökningar</i>	3
1. Bakgrund	4
2. Tidigare SGU-finansierade undersökningar	5
<i>Samarbetsprojekt</i>	5
3. Metoder	6
<i>Biogeokemiska data</i>	6
<i>Flyggeofysiska data</i>	7
<i>Fältarbete och analyser</i>	7
4. Fältkännetecken för sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment	8
5. Studier av befintligt SGU material	11
<i>Mälardalen</i>	11
<i>Norrlands kustområde</i>	13
6. Fältarbete	18
<i>Mälardalen</i>	18
<i>Västerbotten</i>	25
7. Diskussion och slutsatser	33
<i>Framtida undersökningar</i>	34
<i>Presentationer av resultat</i>	35
8. Referenser	36
Appendix 1	38
Appendix 2	40

Bilden på framsidan visar en sur sulfatjord på Rödbäcksslätten utanför Umeå. Den sura jorden har bildats efter oxidation av sulfidhaltig svartmocka som syns längst ner i gropen.

Sammanfattning

I både Sverige och Finland finns stora arealer med postglaciala sediment vilka innehåller järnsulfider. Dessa sediment finns främst i områden som efter den senaste istiden legat under Östersjöns nivå. 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 kan mobiliseras. Det finns då risk att skadliga mängder av de mobiliserade metallerna kommer ut i bäckar och sjöar.

Målsättningen med detta projekt har därför varit att hitta metoder för att kunna identifiera områden med sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment. För att uppnå detta har vi använt befintligt SGU material i kombination med fältkontroller. I första hand har vi använt SGU:s data från biogeokemi- och jordartskartering samt flyggeofysiska data. Fältarbeten har utförts i två områden, där det finns tidigare undersökningar av sura sulfatjordar, ett i Västerbotten och ett i Mälardalen.

Fältkontroller har visat att de sura sulfatjordarna och sulfidhaltiga sedimenten ofta kan identifieras i fält. Längst Norrlands kustland förekommer ofta s.k. svartmocka i vilken mineralet FeS färgar jorden svart. De sulfidhaltiga sedimenten i Mälardalen utgörs ofta av gyttjelera där pyrit är det dominerande sulfidmineralet. Detta mineral påverkar inte direkt jordens färg men gyttjeleror kännetecknas ofta av sin grågröna färg. Områden med gyttjelera finns ofta i de topografiskt lägsta partierna av områden med lersediment. De sura sulfatjordarna kännetecknas av vertikala sprickor som ofta kan följas ner till grundvattenytan. I sprickorna finns ofta purpurroda beläggningar av järnhydroxider. I anslutning till dessa rostutfällningar förekommer ibland också det blekgula mineralet jarosit.

Resultaten från detta projekt visar att de metoder, som SGU nyttjar inom sin ordinarie verksamhet går att använda för att identifiera områden med sulfidhaltiga jordar. De olika metoderna har dock vissa begränsningar, men kan tillsammans troligen användas för att identifiera dessa jordar.

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. Vid SGU's jordartskartering i Norrland har gyttjejordar inte avgränsats från andra finkorniga vattenavsatta sediment. I många områden utgör dessa sulfidhaltiga sediment säkert en stor andel av de finkorniga sedimenten närmast kusten. SGU's jordartskartor kan därför ge en grov uppfattning om var sulfidhaltiga sediment troligtvis förekommer. I Norrland överlagras finkorniga sulfidhaltiga sedimenten ofta 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. De förhöjda halterna förekommer dock endast i sådana områden där oxidation av sulfider har skett och sura förhållanden lett till mobilisering av metaller. Områden med sulfidhaltiga sediment där ingen oxidation skett kommer således inte att återspeglas genom höga metallhalter på de biogeokemiska kartorna. De biogeokemiska proverna har tagits med en täthet av 1

prov/6 km², vilket gör att mindre att mindre områden med sura sulfatjordar ibland ej registreras i denna kartering.

Flygelektromagnetiska VLF-data verkar kunna användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. Från VLF-data, uppmätta med två sändare, kan markens elektriska ledningsförmåga beräknas. Våra resultat visar att utbredningen av sulfidhaltiga sediment sammanfaller med områden som har hög elektrisk ledningsförmåga (låg resistivitet). Dessa flygmätningar finns dock endast över begränsade delar av Sverige. Även resultat från äldre VLF-mätningar, uppmätta med endast en sändare, visar att stora områden med sulfidhaltiga sediment avspeglas som områden med låg skenbar resistivitet. Resultat från geofysiska markmätningar (resistivitetssondering) visar även att områden med sulfidhaltiga sediment uppvisar en lägre resistivitet i jämförelse med andra sediment

Framtida undersökningar

Under 2004 påbörjades ett nytt SGU-finansierat FoU projekt: Geofysiska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment (Gustav Sohlenius, Lena Persson och Mehrdad Bastani). Målsättningen med detta projekt är att med geofysiska metoder identifiera områden med sulfidhaltiga postglaciala sediment. Resultaten kan bli ett underlag för att i framtiden lättare kunna identifiera var dessa problemjordar förekommer. Studien kommer att inriktas på tre områden, ett i Västerbotten, ett i Mälardalen och ett i Norrbotten.

1. Bakgrund

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 sulfajordar 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 detta projekt har vi därför försökt hitta metoder som kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment och sura sulfatjordar.

I Sverige och Finland har de flesta observationer av sulfidhaltiga sediment gjorts på nivåer som låg under vatten vid början av Litorinahavet då bräckt vatten trängde in i Östersjönlägre (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 dock möjligt att den verkliga arealen är större. Det har inte gjorts några uppskattningar av den total arealen med sulfidhaltiga sediment i Sverige. Det finns dock en sammanställning från Umeå universitet av förekomster av sulfidhaltiga sediment i Sverige (Ivarsson mfl 1996).

Eftersom många metaller mobiliseras från sura sulfatjordar (tex Co, Ni och Cu) kan man förvänta sig att förekomster av sådana jordar avspeglas i de data som SGU tagit fram vid den biogeokemiska karteringen. I denna undersökning jämfördes därför de biogeokemiska resultaten med jordartskartor och kända förekomster av sulfidhaltiga sediment.

De sulfidhaltiga jordarna kan tänkas ha andra fysiska egenskaper (tex lägre resistivitet) än andra finkorniga sediment. I en studie från Österbotten har Puranen mfl 1997 visat att sulfidhaltiga sediment har en hög elektrisk konduktivitet, dvs. låg resistivitet. Vi har därför jämfört data som tagits fram vid SGU:s flygelektromagnetiska VLF mätningar med jordartskartor för att undersöka om detta material kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. På några platser gjordes dessutom elektriska sonderingar i fält.

De sulfidhaltiga sedimenten avsätts bottenar med ringa vattenrörelser där reducerade förhållanden råder vid eller under gränsen mellan sediment och vatten. Med hjälp av strandförskjutningsmodeller kan man hitta platser där sådana förhållanden kan ha rått.

2. Tidigare SGU-finansierade undersökningar

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

- a) 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.
- b) Många metaller är bundna i den pyrit som förekommer i de sulfidhaltiga sedimenten.
- c) De totala halterna av spårmetaller är inte högre i de sulfidhaltiga sedimenten jämfört med sulfidfria sediment.
- d) 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).
- e) Alla de analyserade metallerna uppvisar förhöjda halter i den lösliga fraktionen i övergången mellan oxiderad och reducerad jord. Detta är en effekt av den kraftiga vittringen i den sura oxiderade jorden..
- f) De flesta ämnen mobiliseras troligtvis genom ökad vittring av silikatmineral, medan oxidation av pyrit är av underordnad betydelse.
- g) Sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment kan oftast identifieras i fält.

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

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 Kvarnen. En målsättning är att på den svenska sidan uppskatta de sulfidhaltiga sedimentens utbredning längst Kvarnens kuster och i Umeälvens dalgång. Detta sker i stor utsträckning genom arkivstudier där material från bla väg- och banverket går igenom.

Inom Geonat projektet har Malin Fuchs (Umeå universitet) och Björn Wiberg (SGU) utfört arkivstudier hos bla Vägverket och Banverket. Ett syfte med dessa arkivstudier är att fastställa inom vilka områden längst Västerbottens kust som sulfidhaltiga sediment förekommer.

3. Metoder

I flera områden kring Mälaren har sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment undersökts med avseende på tex. metall- och svavelhalter (Manngård 1997, Sohlenius och Öborn 2001). Vi har bedrivit fältarbete i ett av dessa områden för att ta fram en metod som i framtiden kan användas för att uppskatta den totala arealen sura och potentiellt sura sulfatjordar. Området ligger väster om Sörfjärden, en vik av Mälaren som är belägen mellan Strängnäs och Eskilstuna.

En ny metod att beräkna markens skenbara resistivitet från VLF-data har tagits fram av Pedersen och Becken (2003). Över de områden där det finns moderna VLF mätningar uppmätta från två sändare kan vi numera även beräkna markens resistivitet. Jämförelser mellan resistivitetskartan, beräknad från VLF-data och jordartskartor gjordes därför i områdena kring Eskilstuna och Västerås där sådana mätningar finns. Därefter gjordes fältkontroller på några platser. Kring Sörfjärden finns dock inga nyare VLF mätningar uppmätta från två sändare.

Det finns flera rapporter som visar att det finns sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment i Västerbottens kustland (tex Ivarsson mfl 1996). Eftersom Geonatprojektet bedriver undersökningar i det området förlades även fältundersökningar inom detta projekt dit. Jämförelser mellan olika typer av kartmaterial har dock gjorts med material från olika delar av Norrlandskusten. Tillgången på flygelektromagnetiska data är dock sämre längst Norrlandskusten och det har därför ej gått att utvärdera dessa metoder på samma sätt som i Mälardalen.

Biogeokemiska data

I många områden med sura sulfatjordar visar de biogeokemiska kartorna att halterna av tex. S, Ni och Cu är förhöjda. Vi har därför använt SGU:s biogeokemiska data tillsammans med jordartskartor för att identifiera områden där dessa jordar förekommer. Denna kartering, som är regional med en täthet om ca 1 prov per 6 km², bygger på analyser av ett fåtal växtarter, främst starrarter och älggräs (rötter) samt näckmossa. I dagsläget har mer än 35 000 prover analyserats.

Halterna av Cu, Co och Ni har plottats på jordartskartor för att undersöka om områden med eventuella sulfidhaltiga sediment uppvisar högre halter av dessa ämnen. I denna rapport finns exempel från Västerbotten, Mälardalen och Norrbotten redovisade.

För att undersöka i vilken utsträckning de biogeokemiska analyserna kan användas för att prognosticera förekomst av läckande sulfatjordar konstruerades ett index på basen av provens innehåll av S, Ni, U, Y och Zn (se Åström och Björklund 1995). Elementassociationen valdes eftersom den inte kan antas avspegla några vanligt förekommande geologiska källor, såsom sulfidmineraliseringar i berggrund etc. Samtliga element (uttryckta som mgkg⁻¹ torrsvikt) normaliserades först mot den 99e percentilen av hela populationen. Detta innebär att samtliga haltobservationer fick värden mellan 0 och 1, och en procent av populationen (de högsta värdena) erhöll värdet 1. Därefter summerades de normaliserade värdena, för att slutligen divideras med antalet ingående variabler (5 stycken). Resultatet är en kvot som ligger mellan 0,02 och 1,00. Värdet 1,00 innebär att ett prov ligger inom den högsta percentilen för samtliga ingående element.

I ett senare skede har ytterligare arbete lagts på att undersöka hur jordarter (speciellt gyttjeleror) inverkar på kemin i bäckvattenväxterna. Detta arbete, som i sin helhet finns har rapporterats separat (Lax 2004).

Flyggeofysiska data

Flyggeofysiska data täcker idag stora delar av landet. Dom flyggeofysiska mätningarna innefattar mätningar av det jordmagnetiska fältet, radiometrisk mätningar samt flygelektromagnetiska mätningar inom VLF-området. Inom detta projekt har vi enbart utnyttjat VLF-data för att identifiera sulfidjordar. Dessa jordarter kan förväntas ha en högre elektrisk konduktivitet i jämförelse med vanliga lerjordar, dels pga. att sulfidleror har ett högre innehåll av elektrisk ledande mineral som FeS och FeS₂ och dels pga. att kloridhalten hos dessa jordarter kan vara högre (Puranen mfl 1997).

Vid tolkningen av VLF-data har vi utnyttjat de nya metoder som utvecklats inom tidigare FoU-projekt (Persson och Daniels, 2004). Möjligheten att beräkna resistivitet och fas från VLF-data (Pedersen och Becken, 2003) har avsevärt ökad användningen av dessa data. VLF-data har tidigare främst använts för att detektera linjär lågresistiva strukturer som vattenförande sprickzoner i berg. Med den nya tekniken är det numera möjligt att skilja ut lågresistiva områden som lerjordar från högresistiva hållrika områden med litet jordtäckte. En av målsättningarna med projektet var därför att undersöka om även områden med sulfidleror kan identifieras med hjälp av resistivitetsdata. Eftersom moderna VLF data uppmätta från två sändare endast täcker en del av landet har jämförelsen mellan dessa data och kända förekomster av sulfidhaltiga sediment endast kunnat göras på två kartblad: Västerås SO och Eskilstuna NO.

Det är även möjligt att sulfidleror skiljer ur sig med avseende på magnetiska egenskaper samt halten av kalium, uran och torium. Några studier av magnetiska och radiometrisk data har inte gjorts inom detta projekt utan kommer eventuellt att genomföras inom fortsättningsprojektet.

Strandlinje beräkningarna utförda i detta arbete grundar sig på en matematisk modell framtagen av Tore Påsse (Påsse 2001). Denna model er en empirisk formel baserad på strandförskjutningskurvor i hela Skandinavien. Modellen beskriver den oregelbundna landhöjningen med hjälp av en matematisk formel. GIS implementeringen av modellen grundar sig på dagens digitala terrängmodell som med hjälp av formeln omräknas till den nivå som gällde vid den aktuella tidpunkten. Landmassans nedtryckning av den senaste istiden beräknas för varje punkt och havsytans läge bestäms med en eustatisk beräkning.

Fältarbete och analyser

I Mälardalen utfördes fältarbete i första hand för att undersöka om flygelektromagnetiska VLF-data och biogeokemiska kartor kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. Elektriska sonderingarna utfördes på sex platser där jordarterna också klassificerades.

I Västerbotten utfördes fältarbete för att få en uppfattning om de sulfidhaltiga sedimentens utbredning och stratigrafi. Vid fältarbetena gjordes jordartsbedömningar och sammanlagt 52 prover togs ut för analyser av i första hand svavel och kol. De prover som tagits nära markytan kommer från spadgrävda gropar. Prover från djupare nivåer, ofta under grundvattenytan, har tagits med rysskannborr eller med en förlängningsbar stickprovtagare. Denna provtagningen utfördes ofta i diken, vars botten ligger nära grundvattenytan och det var möjligt att trycka ner borrhullstrutningen.

I Västerbotten är det ibland svårt eller omöjligt att penetrera de ofta sandiga överst liggande jordarna med handkraft. På några platser var det därför ej möjligt att avgöra om det finns sulfidhaltiga sediment.

De naturfuktiga proverna skakades med avjoniserat vatten varefter pH mättes (i fält). Proverna torkades och maldes (på laboratoriet). De total halter av kol, svavel och kväve bestämdes därefter med elementaranalys (Leco). De relativt höga svavelhalter (i vissa fall över 1%) som uppmättes i vissa prover visar att svavlet med hög sannolikhet till stor del är bundet i sulfidmineral. Delar av svavlet kan dock vara bundet på annat sätt, tex till organiskt material. Chanton mfl (1987) har dock visat att marint organiskt material har en svavelhalt som ligger under 1%.

Några av proverna från Västerbotten analyserades med avseende på ett antal metaller. Sammanlagt 2,5 g jord vägdes in och extraherades med 50 ml 7 M HNO_3 i 30 min (120°C). Därefter analyserades metallkoncentrationerna i extraktet med ICP-MS. Alla dessa analyser utfördes på Institutionen för markvetenskap (SLU). Två prover från Västerbotten analyserades med avseende på kornstorlek på SWECO Geolab i Stockholm.

4. Fältkännetecken för sura sulfatjordar och sulfidhaltiga sediment

Med utgångspunkt från resultaten från detta och 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 jordens utseende.

I Västerbotten och Norrbotten bildas sura sulfatjordar främst efter oxidation av s.k. svartmocka i vilken mineralet FeS färgar jorden svart (Figur 1). 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 slättområdena närmast kusten. Denna sulfidhaltiga silten innehåller en eller ett par % organiskt material. Längre upp i dalgångarna är de sulfidhaltiga sedimenten oftast täckta av yngre älv och svallsediment (Figur 20).

I södra delen av Sverige utvecklas sura sulfatjordar ofta på platser som på SGU:s jordartskartor klassificerats som gyttjelera (Figur 4). 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 havsyttnivån liggande sjöar i Mälardalen. Dessa leror har en blågrå ibland svagt grönaktig färg (Figur 2), de innehåller några procent organiskt material, samt sulfidmineralet pyrit (FeS_2). Detta sulfidmineral påverkar ej jordens färg och oxiderar inte lika lätt som FeS .



Figur 1. Svartmocka provtagen i en våtmark vid Västerfjärden ca 10 km söder om Umeå.



Figur 2. Sulfidhaltig gyttjelera från Hacksta i Mälardalen.



Figur 3. Sur sulfatjord som bildats efter oxidation av sulfidhaltiga sediment i Österbotten. Dessa jordar kännetecknas av mer eller mindre lodräta sprickor som ofta når ner till grundvattennivån. Sprickornas väggar är täckta av järnhydroxider.

5. Studier av befintligt SGU material

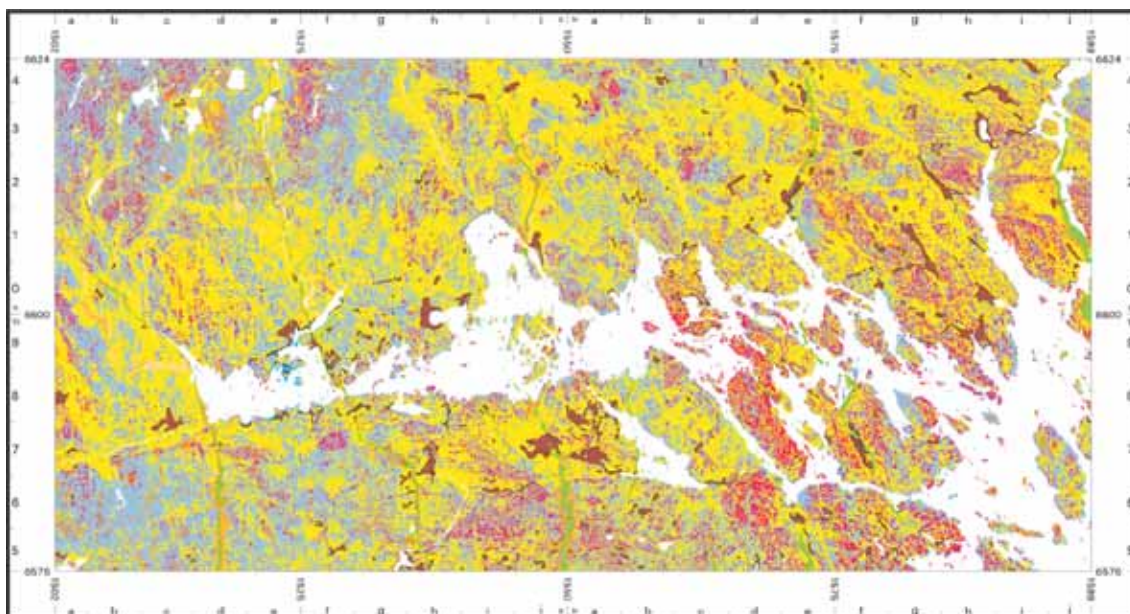
Resultaten från beräkningarna av det biogeokemiska indexet finns presenterade på kartor från två områden, Mälardalen och Norrbottens kustland (se Appendix 1). En senare studie (Lax 2004) visade att gyttjelerorna ger signifikant förhöjda halter av framförallt Ni, Co, Cu, S, Y, U, W, samt Mo, medan halterna av As och Pb inte påverkas eller sjunker. Nästan exakt samma drag har konstaterats för bäckvatten i Österbotten, Finland (Åström & Åström 1997). Normaliering av Ni och Y med Pb (kvoter) visade sig i vara en enkel metod, höga kvoter sammanfaller väl med områden med gyttjeleror.

Mälardalen

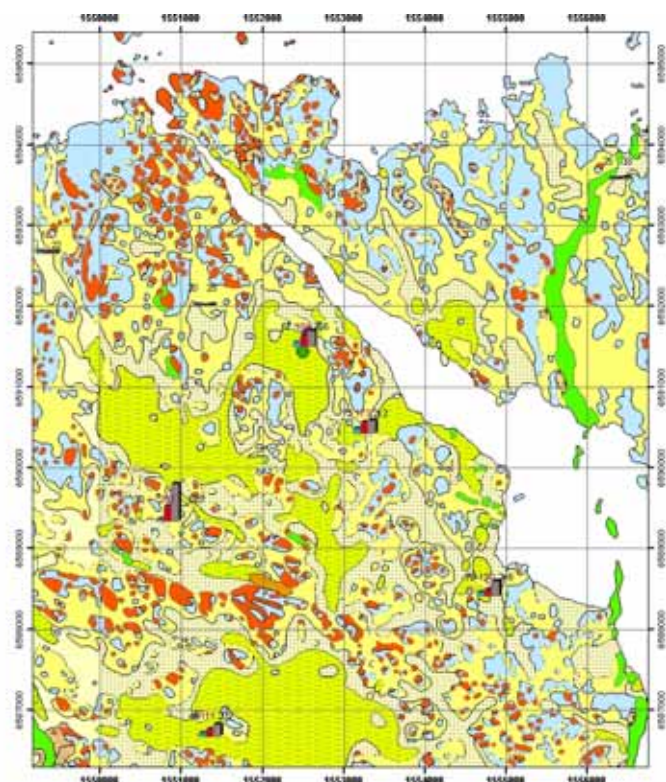
Resultaten från studierna av de biogeokemiska kartorna visar på ett samband mellan höga halter av vissa metaller och förekomster av gyttjehaltiga sediment. Ett sådant område är de uppodlade gytjesedimenten väster om Sörfjärden mellan Strängnäs och Eskilstuna (Figur 5). Kvoten, eller "sulfatjordsindex", plottades på en karta (Appendix 1). I Mälardalen uppvisar områden där det finns rikligt med gyttjelera, och därmed troligen sulfidhaltiga sediment, höga kvoter. Resultat från den biogeokemiska karteringen med inriktning mot sura sulfatjordar finns även beskrivet av Lax (2004).

En jämförelse mellan resistivetskartan beräknad från VLF-data och jordartskartorna (Västerås SO och Eskilstuna NO) visar att det finns en god överensstämmelse mellan förekomster av gyttjelera (Figur 4) och områden med mycket låg resistivitet (Figur 9).

Landhöjningsmodellen visar att lerområdena i Mälardalen till största delen stod under vattnet för 4000 år sedan då havets yta stod mer än 20 meter högre än idag. De sulfidhaltiga sedimenten kring Mälaren hittas i första hand i områden som var skyddade vikar för ca 2000 år sedan, då havet stod ca 10 meter ovanför dagens nivå (Appendix 2). Det är därför möjligt att de sulfidhaltiga sedimenten i detta område avsatts relativt sent i en miljö som liknar de näringsrika vikar som idag kännetecknar Mälaren. Det finns dock lokaler med sulfidhaltiga sediment som ligger på högre nivåer ovan havsytan (se Uddetorp ca 30 m ö. h. y.). Troligtvis är inte de sulfidhaltiga sedimenten bundna till en viss nivå ovan havsytan utan istället till sådana områden där bildningsmiljön kan ha varit gynnsam för bildandet av sulfidmineral. Sådana platser finns där det tidigare funnits långgrunda skyddade vikar eller fjärdar vilka är omgivna av lermarker. I sådan miljöer ackumulerar stora mängder organiskt material på botten vilket leder till syrebrist och därmed bildandet av sulfidmineral.



Figur 4. Fördelningen av jordarter i området kring Mälaren. Alla områden med lergyttja-gyttjelera har en brun färg på kartan.

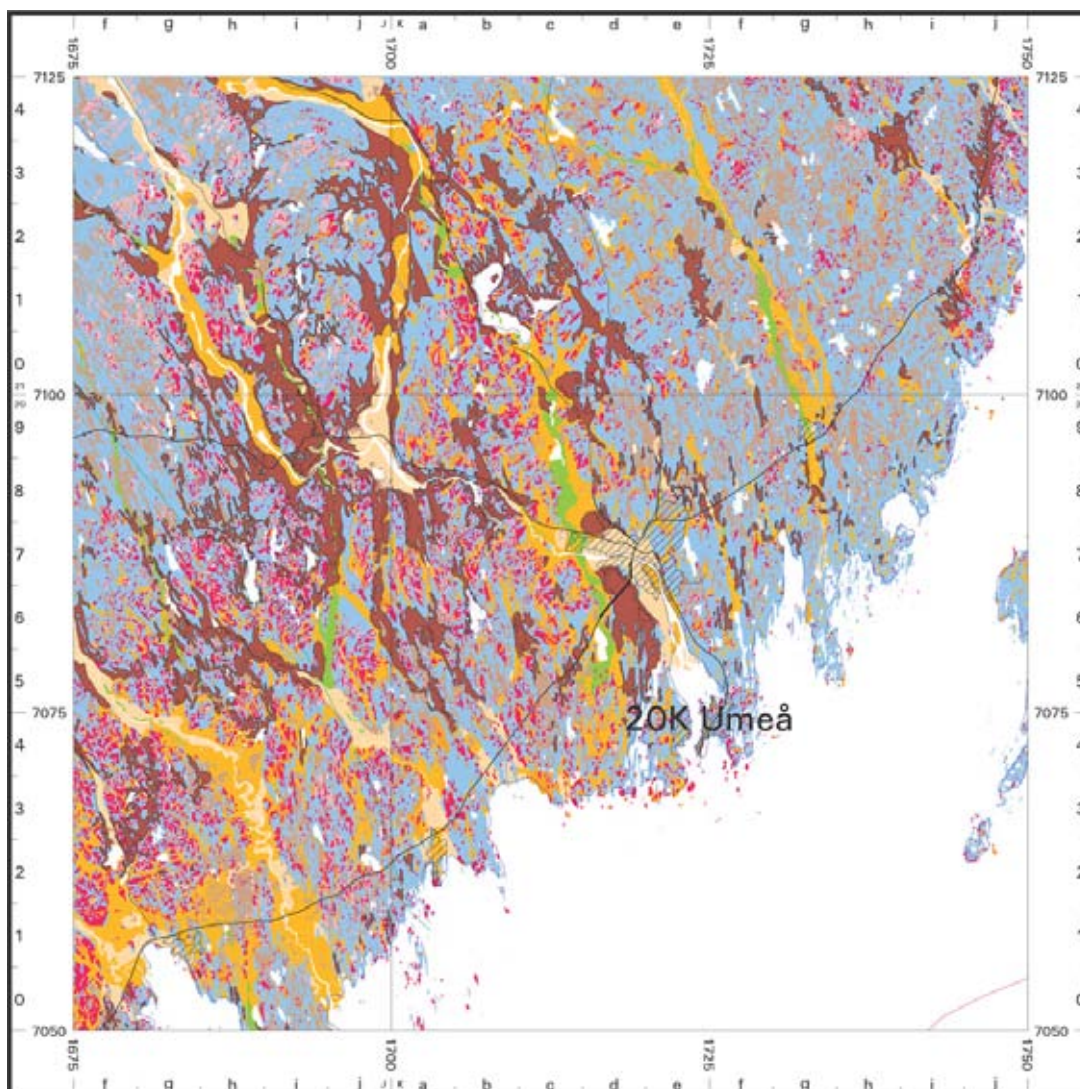


Figur 5. Halterna av Co, Cu och Ni plottat på jordartskartan. De högsta halterna hittas i prover tagna i bäckar som troligtvis avvattnar områden med sura sulfatjordar. Gula områden med gröns streck utgörs av områden med gyttjelera, vilken troligtvis till största delen är sulfidhaltig. Bilden kommer från Sörfjärden, en vik av Mälaren belägen mellan Eskilstuna och Strängnäs. (Cu=blå, Ni=röd och Co=grå). Lokalen Fiholm är markerad med en grön ring.

Norrlands kustområde

Biogeokemin i Norrbotten visar att bäckar som avvattnar finsediment i områdena närmast kusten uppvisar höga halter av flera metaller (Figur 8). Det är dock inte lika tydligt som i Mälardalen att de sulfidhaltiga jordarna i Norrbotten har ett högt "sulfatjordsindex" (Appendix 1).

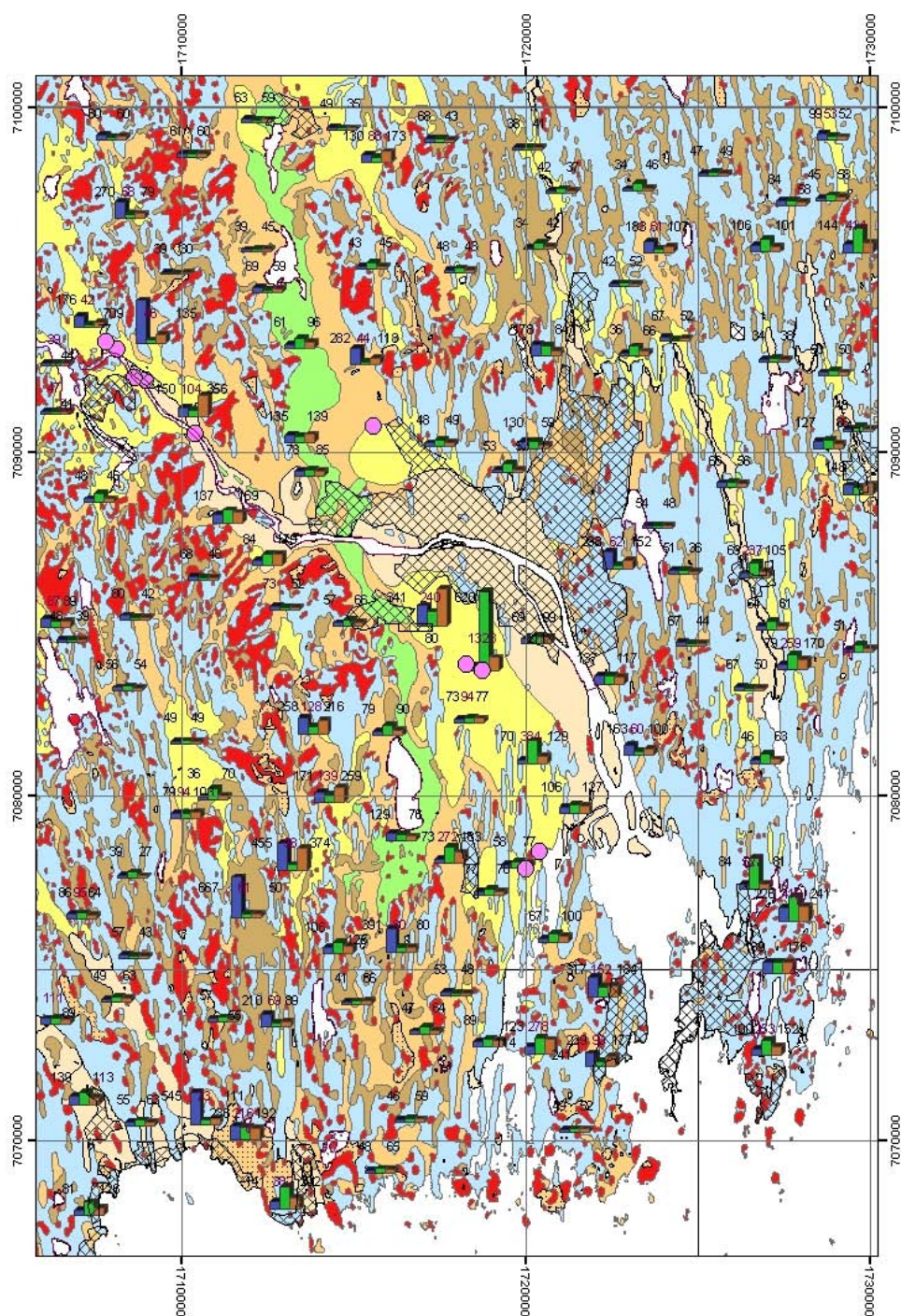
Även i Västerbotten runt Umeälvens dalgång uppvisar halterna av flera ämnen (Ni, Co och Cu) relativt höga halter i vissa områden som avvattnar finkorniga sediment (Figur 6 och Figur 7). I området mellan Skellefteå och Luleå visade det sig att bäckvattenväxter i postglaciala sediment är anrikade på samma element som i Mälardalen, men att haltnivåerna generellt är lägre (Lax 2004). Orsakerna till detta är inte klarlagda, men det finns uppgifter som (vad gäller vattenlevande mossor) visar att kraftigt sura vatten, eller förekomst av humuspartiklar begränsar ad-/absorption av kationer. Ställs haltnivåerna (och kvoterna med Pb) i relation till lokala, icke påverkade material, t ex bäckvattenväxter från rena moränområden, är dock signaturen tydlig.



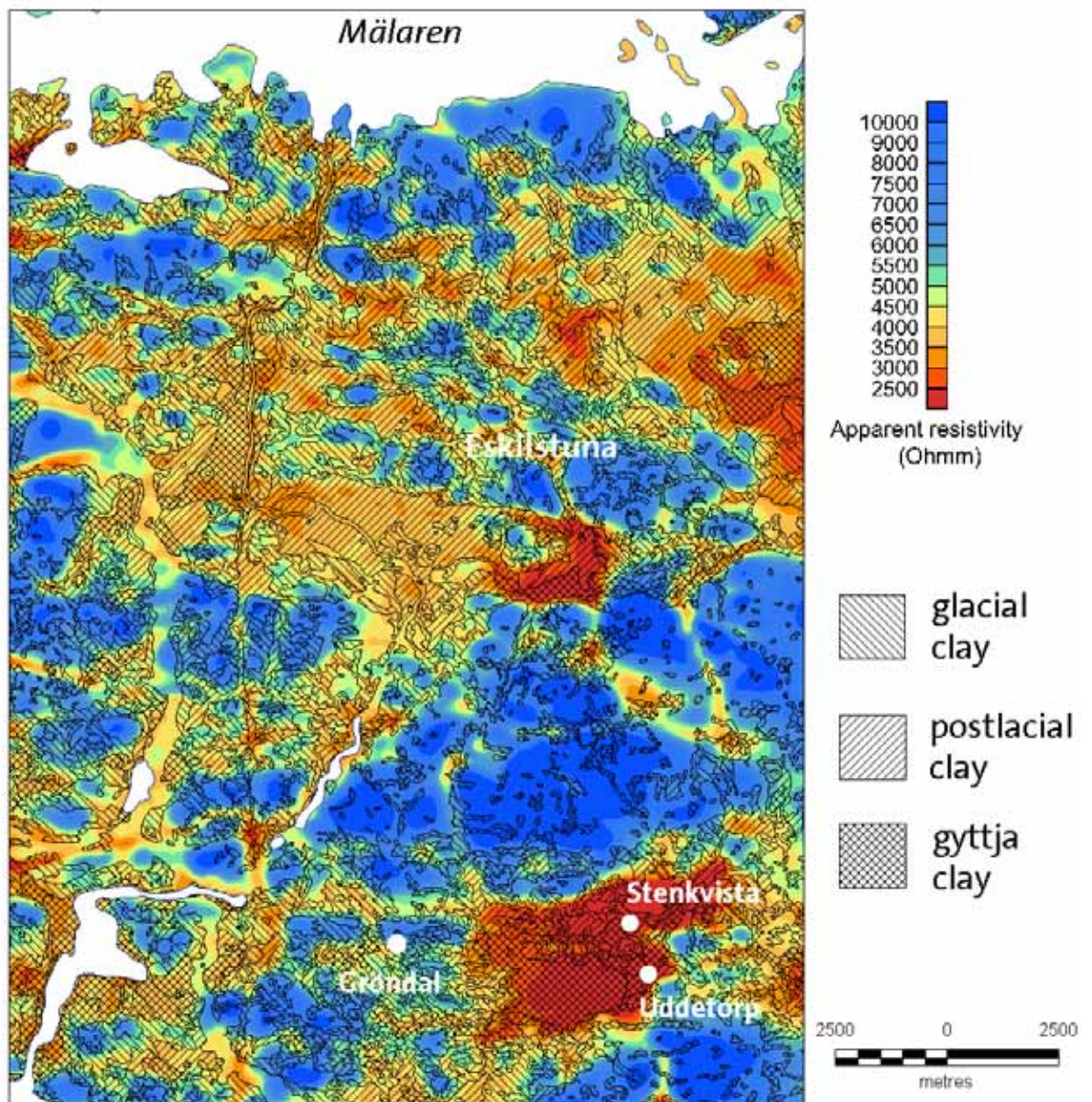
Figur 6. Jordartskarta över Umeåtrakten. Områden med finsediment har på denna karta markerats med brunt. Det är i första hand i dessa områden som svartmocka förekommer.

I Ångermanland, längst Höga kusten, finns inga tydliga samband mellan biogeokemi och förekomster av finkorniga vattenavsatta sedimenten. I detta område har markens skenbara resistivitet beräknats från VLF data. Det var dock inte möjligt att från resistivitetskartan urskilja områden med finkorniga sediment. Det finns relativt få rapporter om sulfidhaltiga sediment i Ångermanland (se tex Jerbo 1965). Eftersom området är kraftigt kuperat är det troligt att dessa sediment överlagras av yngre svallsediment och därför inte går att urskilja med de metoder vi använt här.

Det finns ofta mäktiga lager av sulfidhaltiga sediment längst Norrlands kust. Dessa jordar har därför säkert avsatts under en period som varat i tusentals år (Fromm 1965; se lokalen Norrfors nedan). Enligt Fromm (1965) hittas sulfidhaltiga sediment främst i områdena nedanför Litorinagränsen. Landhöjningsmodeller för området kring Umeå visar att en smal havsvik, för 7000 år sedan, sträckte sig flera mil upp i nuvarande Umeälvens dalgång. Havsytan stod då ca 100 meter ovanför dagens nivå. För 3500 år sedan låg slättområdena kring Umeå fortfarande under vatten (Appendix 2). De flesta platser med sulfidhaltigas sediment som påträffades vid fältarbetet (se nedan) låg under den nivå som var täckt av vatten för 3500 år sedan (35-40 meter ovan dagens havsytenivå). Det finns dock rapporter som visar att det finns sulfidhaltiga sediment även högre upp i dalgången (Ivarsson mfl 1996). Högre upp i dalgångarna kan dessa sediment troligtvis var täckta av yngre svall och älvsediment (se nedan). Detta gör att risken är mindre att sulfiderna ska oxidera och därmed orsaka en ökad mobilisering av metaller (se Norrfors).



Figur 7. Halterna av Co, Cu och Ni plottat på jordartskartan. De högsta halterna hittas i prover tagna i bäckar som troligtvis avvattnar områden med sura sulfatjordar. Exempel på ett sådant område är siltslätten väster och söder om Umeå (guldfärgad på kartan). (Cu=blå, Ni=röd och Co=grå).



Figur 9. Skenbar resistivitet beräknad från VLF-data över en del av kartbladet Eskilstuna NO. Områdets leravlagringar är markerade på kartan. Det finns en signifikant korrelation mellan områden med gyttjelera och områden med en låg resistivitet.

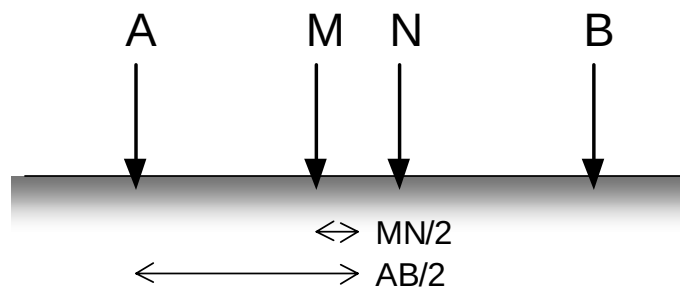
6. Fältarbete



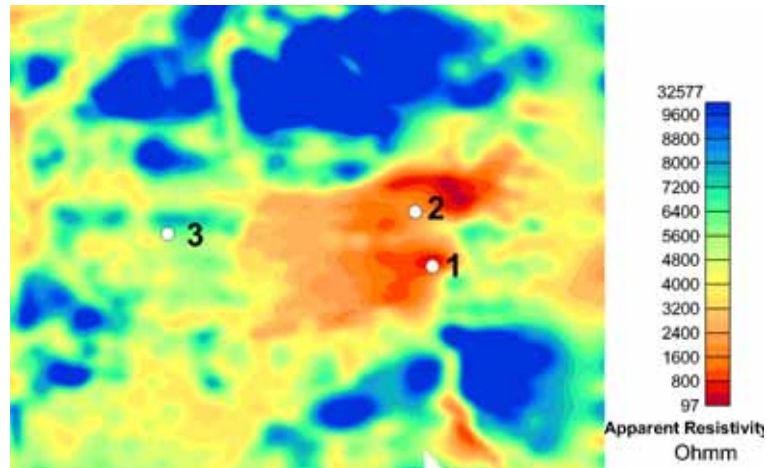
Figur 10. Elektrisk sondering vid Fiholm, väster om Sörfjärden, beläget mellan Strängnäs och Eskilstuna.

Mälardalen

I maj 2003 utfördes elektriska sonderingar på sex platser i Mälardalen (Figur 10). Vid mätningen användes instrumentet SAS 400 (ABEM) med Schlumbergerkonfiguration och det maximala elektrodavståndet ($AB/2$) var 100 meter för samtliga sonderingar (Figur 11). Syftet var att fastställa om de sulfidhaltiga sedimenten har en lägre resistivitet i jämförelse med andra sediment. Vi var därför i första hand intresserade av att bestämma resistiviteten på de finkorniga sedimenten och i andra hand att bestämma jorddjupet. Vid tolkningen av den elektriska sonderingen användes programvaran 4POLE (Luleå Tekniska Universitet). Vid samtliga lokaler erhöles en bra anpassning mellan uppmätta data och den modell som programmet beräknat. På varje plats bedömdes jordarten och prover togs.



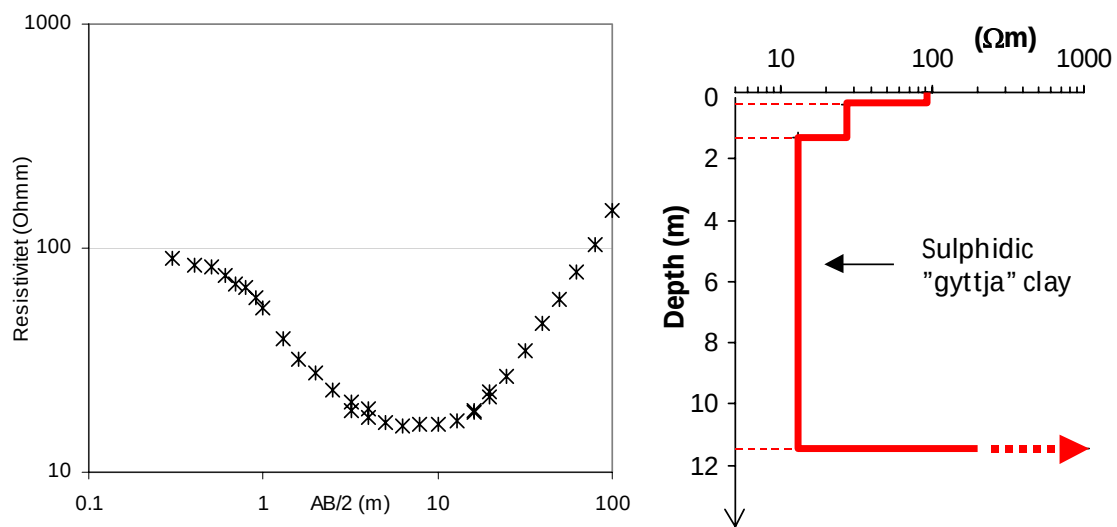
Figur 11. Elektrisk sondering med Schlumbergerkonfiguration. A och B är strömelektroder och M och N är potentialelektroder. Avståndet $MN/2 \ll AB/2$.



Figur 12. Delförstoring av Figur 9 som visar läget för tre av de elektriska sonderingar som utfördes söder om Eskilstuna. Punkt ett ligger i ett område med gyttjelera (Uddetorp), punkt två i ett område med glacial lera (Stenkvista), punkt tre (Gröndal) ligger i ett område med morän.

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

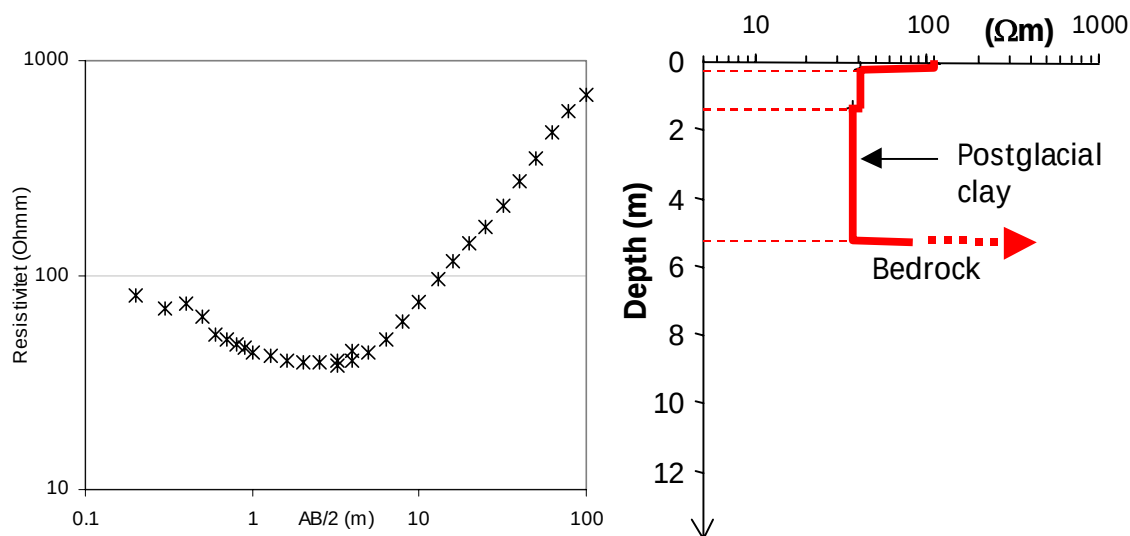
Denna lokal ligger på en plats som på jordartskartan angivits som tunt torvlager på lergyttja. Resistivitetskartan visar på en mycket låg resistivitet i detta område (Figur 9 samt Figur 12). Området är idag en åkermark där grundvattenytan sänkts genom dikning. Närmast markytan finns 40 cm torv, som underlagras av lergyttja. Där rötter trängt ner finns i lergyttjan rikligt med rostutfällningar. Lergyttjan har en låg densitet, vilket tyder på relativt hög organisk halt. Grundvattenytan ligger ca 1,5 meter under markytan (observation av vattenytans läge i ett dike). Prover från denna lokal innehåller höga halter av både kol och svavel (Tabell 1). Troligtvis är svavlet delvis bundet i sulfidmineral. Figur 13 visar resultat och tolkning från den elektriska sonderingen. Tolkningen till höger visar en 4-lagersmodell med ett tunt relativt högresistivt skikt i överytan motsvarande torv ovan grundvattenytan. Detta lager följs av ett ca 1 m mäktigt lager med en resistivitet av 27 Ωm motsvarande gyttjelera 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 Ωm). Det understa lagret motsvaras av berggrunden eller mer troligt av en morän med hög resistivitet som överlagras berggrunden. Enligt tolkningsmodellen är det totala jorddjupet i mätpunkten minst 11,5 m.



Figur 13. Resultat (tv) och tolkningsmodell (th) från elektrisk sondering vid Uddetorp. Läget för sonderingen framgår av Figur 12.

Stenkvista (1544474N, 6577465E; ca 30 m ö. h. y.)

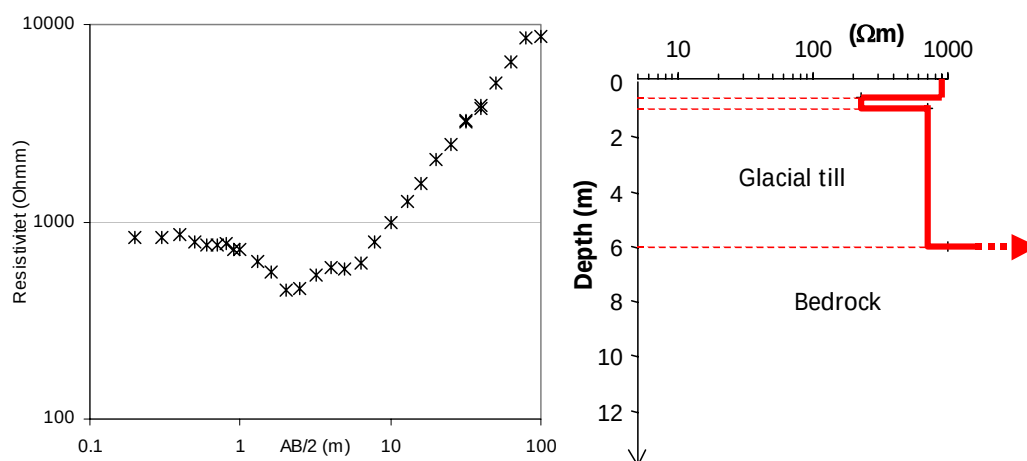
Denna lokal ligger inom samma uppodlade område som föregående lokal (Figur 14 och 16). Även här visar resistivitetskartan en låg resistivitet. Enligt jordartskartan finns postglacial lera på denna plats. Ett jordprov som togs i närheten av den elektriska sonderingen visar att denna lera endast innehåller låga halter av kol och svavel och därmed inte kan karakteriseras som en sulfidhaltig jord (Tabell 1; Stenkvista 1). Ytterligare ett prov (Stenkvista 2) togs ca 100 m söder om sonderingspunktent, vilket även det uppvisade låga halter av kol och svavel (Tabell 1). Den senare provtagningsplatsen ligger på svagt sluttande åkermark ca 30 meter från en moränkulle. På platsen där den elektriska sonderingen utfördes finns lera med torv ovanpå. Figur 14 visar resultatet och tolkningsmodell från den elektriska sonderingen. Tolkningen till höger visar en 4-lagermodell med samma lagerföljd som på föregående lokal. Resultatet visar dock att leran i denna punkt har betydligt högre resistivitet (ca. 40 Ωm) och mindre mäktighet (ca. 5 m) i jämförelse med gyttjeleran i Uddetorp.



Figur 14. Resultat (tv) och tolkningsmodell (th) från elektrisk sondering vid Stenkvista. Läget för sonderingen framgår av Figur 12.

Gröndal (1540189N, 6577076E; ca 35 m ö. h. y.)

Denna lokal ligger i ett moränområde nordväst om de två ovan beskrivna lokalerna. Resistivitetskartan (Figur 9 och Figur 12) visar att resistiviteten i denna punkt är betydligt högre än i Uddetorp och Stenkvista. Här gjordes en elektrisk sondering dels för att få en uppfattning om korrelationen mellan resistivitetskartan, beräknad från VLF-data och bestämning av resistiviteten i fält. Vi ville även bestämma resistiviteten i den morän som troligtvis underlagrar lerorna på de tidigare undersökta lokalerna. Figur 15 visar resultatet och tolkningsmodell från den elektriska sonderingen. Den uppmätta resistiviteten är här betydligt högre (ca en dekad) än i de två föregående lokalerna. Sonderingskurvan är något ojämn men resistivitetsmodellen visar ett ca 5 m mäktigt lager med en resistivitet på 700 Ωm motsvarande morän som överlagrar berggrund med mycket hög resistivitet (>10000 Ωm).



Figur 15. Resultat (tv) och tolkningsmodell (th) från elektrisk sondering vid Uddetorp. Läget för sonderingen framgår av Figur 12.

Denna lokal ligger i Almbygraven där tidigare undersökningar av sulfidhaltiga sediment utförts (Manngård 1997; Öborn och Andersson 1999). Gyttjelera och postglacial lera är de vanligaste jordarterna på de åkrar som dominerar detta område. Tidigare resultat från Manngård (1997) och SGU:s biogeokemiska kartering (Figur 5) visar på en relativt stor mobilisering av vissa metaller från detta område.

Inom detta område finns endast äldre VLF-data uppmätta mot en sändare. Försök har gjorts beräkna den skenbara resistiviteten även från dessa data (Persson och Daniels, 2004). **Figur 16** visar resistivitetskartan beräknad från VLF-data. Eftersom endast en sändare använts vid VLF-mätningen uppvisar kartan ett tydligt riktningsberoende där strukturer i nordöstlig riktning framhävs medan strukturer i nordvästlig riktning undertrycks.

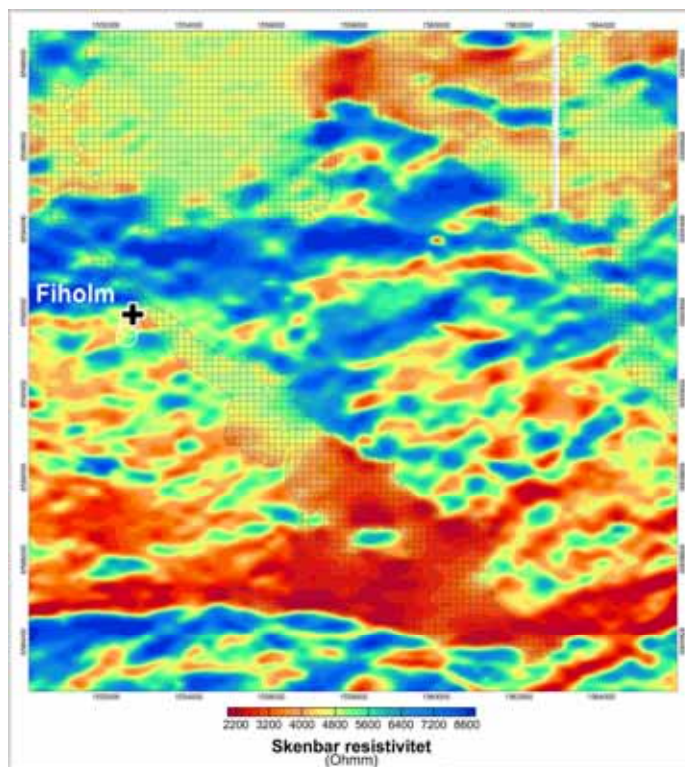
På denna lokal gjordes två elektriska sonderingar. Den första sonderingen (Fiholm 1) utfördes parallellt med ett diket som går söder om den allé som korsar området (*Figur 17*). Borrningar visar att det här finns en typisk gyttjelera ner till ett djup av minst två meter under dikets botten.

Den andra sonderingen (Fiholm 2) utfördes norr om allén i riktning mot Mälaren (*Figur 18*). Borrningar utfördes ner till 2,5 meter under dikets botten. Den översta metern är tydligt FeS bandad och underlagras jämngrå lera. Den nedre delen av borrkärnan har bitvis den ljus bruna färg som ofta karaktäriserar glaciallera.

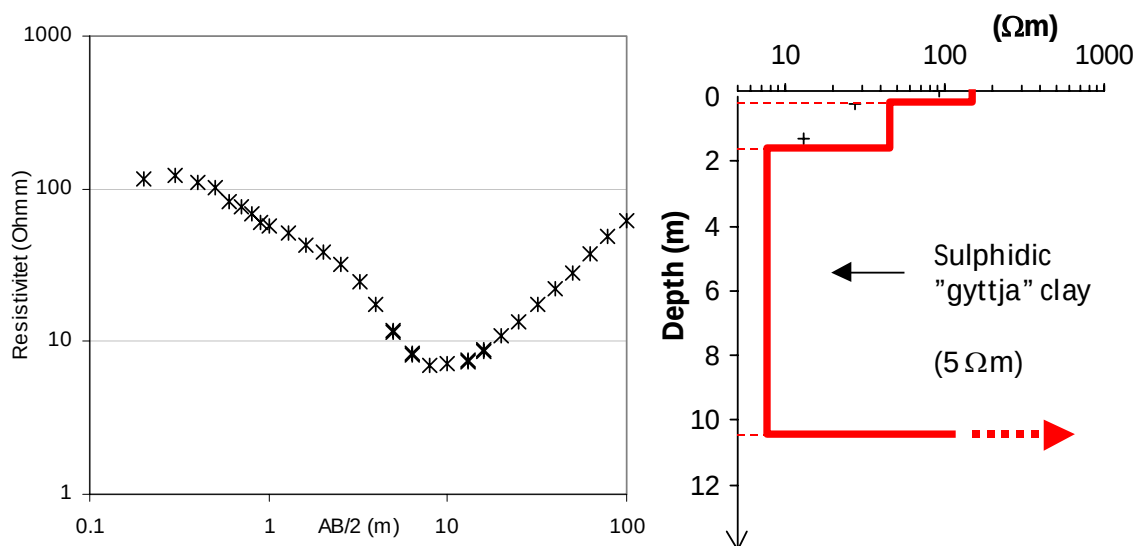
Resultaten från analyserna visar att det på platsen för den första sonderingen finns sulfidhaltig gyttjelera (Tabell 1). Halterna av svavel och kol är lägre på platsen för den andra sonderingen (Tabell 1).

Resultaten från de elektriska sonderingarna visar på väldigt låga resistiviteter på båda lokalerna. Vid Fiholm 1 uppmättes den lägsta resistiviteten och tolkningsmodellen (*Figur 17*) ger en resistivitet på ca. 5 Ωm och en lermäktighet på ca 8 m. Modellen från Fiholm 2 ger en resistivitet på ca 10 Ωm och en lermäktighet på ca 6 m.

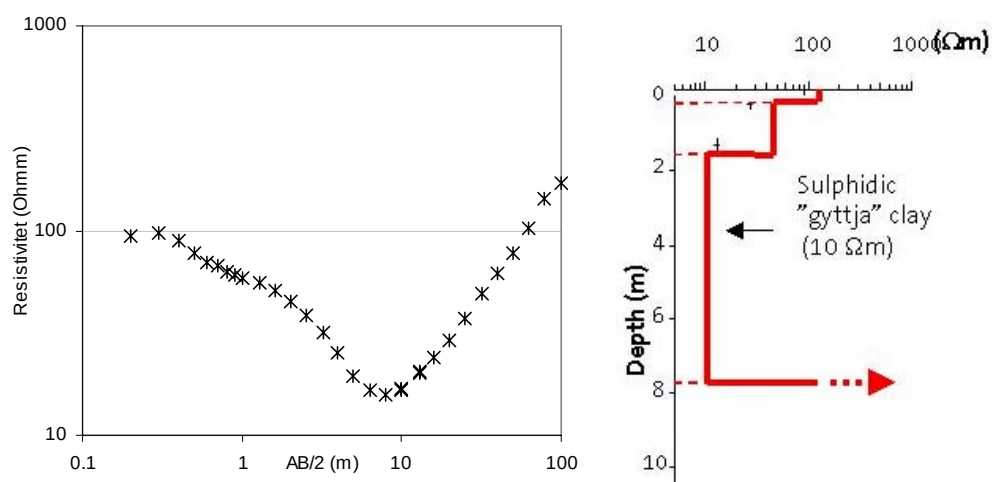
Den lägsta resistiviteten erhålls alltså vid Fiholm 1 där halterna av svavel och kol var högst. Dessa resultat överensstämmer även med resultaten från Uddetorp och Stenkvista.



Figur 16. Skenbar resistivitet beräknad från VLF-data. Eftersom endast en sändare använts vid VLF-mätningen uppvisar kartan ett tydligt riktningsberoende där strukturer i nordöstlig riktning framhävs medan strukturer i nordvästlig riktning undertrycks.



Figur 17 Resultat (tv) och tolkningsmodell (th) från elektrisk sondering vid Fiholm 1. Läget för sonderingen framgår av Figur 16.



Figur 18. Resultat (tv) och tolkningsmodell (th) från elektrisk sondering vid Fiholm 2. Läget för sonderingen framgår av Figur 16.

Tabell 1. Halterna av kol, svavel och kväve i jordar från Mälardalen.

Lokal	Djup under markytan (m)	C%	N%	S%
Fiholm2	1 meter under diket	0,593	0,081	0,142
Fiholm2	1,5 meter under diket	0,463	0,063	0,059
Fiholm2	2	0,358	0,058	0,030
Fiholm2	2,5	0,446	0,065	0,025
Fiholm1	1	2,236	0,256	1,260
Fiholm1	1,5	2,075	0,242	1,320
Fiholm1	2	1,900	0,225	1,100
Uddetorp	0,2	24,270	1,371	0,535
Uddetorp	0,5	7,857	0,912	0,500
Uddetorp	1	1,934	0,203	0,428
Uddetorp	1,7	2,831	0,337	1,160
Uddetorp	2	3,278	0,396	1,202
Stenkvista 1	0,9	0,148	0,025	0,000
Stenkvista 2	0,5	0,195	0,030	0,013
Löten	0,45-0,55	0,332	0,023	0,042
Löten	0,9-1	0,245	0,012	0,048
Löten	1,5	0,455	0,032	0,108
Löten	2	0,241	0,015	0,047

Västerbotten

I början av september 2003 utfördes fältarbete i Västerbotten. Syftet med arbetet var att studera de sulfidhaltiga sedimentens stratigrafi samt hur högt över dagens havsytta som dessa sediment förekommer. Det finns endast mätningar med envägs VLF från detta område. Det var ofta inte möjligt att med manuell provtagning penetrera de närmast markytan ofta upptorkade jordarna. Detta var speciellt svårt på de lokaler som ligger en bit upp i Umeälvens dalgång. De flesta borrhinar utfördes därför i botten av diken där grundvattenytan stod nära markytan.



Figur 19. Skärning genom sulfidhaltiga sediment vid Norrfors beläget väster om Umeå längst Umeälv. Jorden har tidigare varit svartfärgad av FeS men har i kontakten med luftens syre oxiderat. Närmast markytan ligger ett drygt två meter mäktigt lager av sand. Därunder finns 5,5 meter mäktigt lager med sulfidhaltig svartmocka.

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 (*Figur 19*). Enligt jordartskartan ligger platsen inom ett område som täcks av silt. På sydsidan av vägen börjar sluttningen ner mot Umeälv. Marken på platsen används idag som jordbruksmark.

De överst ca 2,5 metrarna av schaktet består av skiktad sand som troligen avsatts av älven. Sanden underlagras av sammanlagt 5,5 meter lerig silt. Detta fastslogs efter en borrhning utfördes ner till 1,8 meter under botten på schaktets. De understa ca 7 dm av borrhkärnan utgjordes av lerig silt som tillskillnad från ovanliggande sediment ej färgats svar av FeS. Borrhningen avbröts pga stopp mot en annan jordart, troligtvis sand.

Schaktet stod öppet under hela sommaren 2003 vilket gjorde att de svarta FeS mineral, som karakteriserar svartmocka, sedan länge oxiderat. I spadgrävda gropar kunde det konstateras att nästan hela den sedimentpacke som underlagrar sanden utgörs av svartmocka. De allra överst och understa delarna av siltpackan är dock ej svartfärgade av järnsulfid. Skärningen genomkorsas av två horisontella band som mellanlagras av ett brunt band (*Figur 19*). 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. Under den torra delen av sommaren observerades rikligt med vita utfällningar, troligen gips, på de ljusa banden (muntlig information från Curt Fredén, SGU).

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 2) visar att alla prover tagna i silten, utom det nedersta, troligtvis innehåller sulfidbundet svavel. Halterna av kol och svavel är något högre i de ljusa och bruna banden jämfört med omgivande sediment.

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.



Figur 20. Gytjig sulfidhaltig silt från Västerslätt utanför Umeå.

Västerslätt (7090718N, 1715567E; 20 m ö. h. y.)

Denna plats ligger strax nordväst om Umeå inom ett område med vidsträckta dikade åkermarker. Borring utfördes ner till ett djup av fyra meter från botten av ett 1,5 meter djupt dike med vatten i botten (troligen grundvattenytan). De översta två metrarna provtogs med ryssborr. Därefter provtogs ytterligare två meter med en smalare sonderingsborr. Sonderingen avslutades i svartmocka eftersom det ej var möjligt att med handkraft driva ner sonden ytterligare.

De översta två metrarna består av gytjig silt med ljusa mm tunna horisontella skikt, som ej är tydligt svartfärgad av FeS (*Figur 20*). De understa två metrarna består däremot av svartmocka.

De oxiderade lagren ovanför dikets botten har ett 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 2). 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%.

Några prover från denna plats analyserades med avseende på HNO₃ (7M) lösliga metaller (Tabell 3). Resultatet visar att provet tagit närmast markytan uppvisar lägre halter av de analyserade metallerna jämfört med prover som tagits längre ner. Detta kan bero på att metaller mobiliserats från de ytnära delarna av jorden pga ökad vittring orsakad av den ytnära jordens låga pH.

Rödbäcksslätten (7083652N 1718749E; 10 m ö. h. y.)

Detta område ligger strax söder om Umeå och tillhör samma uppodlade slättområde som den ovan beskrivna lokalen Västerslätt. Två borrhningar utfördes från botten av vattenfyllda diken. På den första platsen togs en borrhkärna ner till ett djup av en meter. Denna kärna bestod av gyttjig silt som ej var svartfärgad av FeS. På den andra platsen borrade ner till två meters djup. Denna kärna utgjordes till största delen av gyttjig silt men de understa 2 dm bestod av svartmocka.

Lagerföljden på Rödbäcksslätten är den samma som på Västerslätt, dvs gyttjig silt som underlagras av svartmocka. Även prover från denna plats innehåller sulfidbundet svavel (Tabell 2). Resultatet tyder på att hela den uppodlade siltslätten, som utbreder sig norr och söder om Umeå, har en likartad stratigrafi.

En pH mätning i den reducerade jorden gav resultatet 7,1. Denna mätning utfördes, till skillnad från den på Västerslätt (se ovan), omedelbart efter provtagningen. Resultatet tyder på att det lägre pH värde som svartmockan på Västerslätt uppvisade var en effekt av att järnsulfiderna delvis hunnit oxidera innan pH mätningen utfördes.

Två prover analyserades med avseende på metaller (Tabell 3). Det ytnära provet uppvisar lägre metallhalter än provet som tagits från den sulfidhaltiga jorden. Skillnaden mellan det ytnära och djupare provet är dock inte lika stor som i proverna från Västerslätt.

Vännäs (7097096 1694636; 90 m ö. h. y)

Strax nordost om Vännäs utfördes tre borrhningar i diken som ligger på en åker, vilken sluttar svagt mot väster. Grundvattenytan verkade vid provtagningstillfället ligga långt under dikenas botten vilket gjorde det svårt att trycka ner borrhtrustningen. Samtliga borrhningar nådde ett djup av ca två meter under dikenas botten. Det provtaget material består av silt som till största delen är oxiderad (rostfläckar). De nedersta delarna av borrhkärnorna har dock en blågrå färg och är troligtvis reducerade.

Den reducerade jorden har ett pH på 5,2 och i den oxiderade på 5,5. Ett prov från den reducerade jorden analyserades med avseende på kol och svavel (Tabell 2). Provet har en låg svavelhalt och sedimenten på platsen innehåller därför troligtvis inga större mängder sulfidmineral.

Bråsjön (7093882N 1698460E; 70 m ö. h. y.)

En borrhning i en våtmark vid Bråsjön sydost om Vännäs. Sammanlagt provtogs fyra meter blågrå silt. Sedimenten har en låg kol och svavelhalt (Tabell 2) och innehåller därför troligtvis inga större mängder sulfidmineral.

Kulbergsliden (7126909N 1682797E; 170 m ö. h. y.)

Platsen ligger ca 7 km väster om Vindeln inom ett område som tidigare karterats som silt (SGU:s Ak-karteringen). En fyra meter djup borrhning utfördes vid en åkant som ligger 1,5 meter under omgivande markyta. Hela den provtagna sekvensen består av finsand. De två analyserade proverna innehåller nästan inget kol eller svavel vilket visar att jorden inte är en sulfidhaltig gyttjejord (Tabell 2)

Västerfjärden

(7078417N 1720395E; 1 m ö. h. y.)

Platsen ligger vid en kanal i en våtmark strax innanför Västerfjärden som är en vik från Bottenhavet. Närmast under markytan finns här ett lager på ett par cm med organiskt material. Det underlagrande sedimenten utgörs till stor del av helt svartfärgad svartmocka (Figur 1). De översta 2-3 decimetrarna har dock oxiderat och har ett pH på 5,1. Svavelhalten i svartmockan ligger i de flesta prover kring 0,5% (Tabell 2). Det understa delen av de provtagna sedimenten (ca 2,5-3 m under markytan) är ej svartfärgad och har en låg svavel och kolhalt (Tabell 2).

Tre prover analyserades med avseende på metaller (Tabell 3). Det översta av dessa prover (taget 0,2 m under markytan) uppvisar de högre halterna av flera metaller jämfört med djupare liggande sediment. Detta prov är taget vid övergången mellan reducerad och oxiderad jord. Tidigare undersökningar av sura sulfatjordar har visat att metaller som lakats ut från ovanliggande jord ofta ansamlas i denna övergångszon (tex Sohlenius och Öborn 2004). Troligtvis sker dock ingen omfattande oxidation och mobilisering av tungmetaller från dessa våtmarker med sulfidhaltiga sediment (cf. Sohlenius och Öborn 2003).

Tavelsjö

(7109060N 1706188E; 115 m ö. h. y.)

Platsen ligger på en yta som på jordartskartan anges som silt. Två borrhningar utfördes i botten på ett 1 meter djupt dike. De översta 4,5 metrarna består av gråblå silt som har en liknande karaktär som den som beskrivs från lokalen nedan (Gubböle). Närmast markytan finns ett tunt sandlager. I siltens övre delar (decimetrar) finns inslag av rostfläckar. Ungefär 20 cm under markytan är pH ungefär 4 (jorden är här gråblå med enstaka rostfläckar). Två meter under markytan ligger pH runt 6,0.

En borrhning utfördes ner till ett djup av 5 meter. Den understa halvmetern består här av bandad (varvig) silt, troligtvis av glacialt ursprung. 4,7 meter under markytan pH 5,6

Resultaten av analyser visar att silten på denna plats uppvisar låga svavelhalter och därför inte innehåller några signifikanta sulfidhalter (Tabell 2).



Figur 21. Blågrå silt vid ett vägbygge i Gubböle mellan Umeå och Vännäs. Den närmast markytan liggande jorden har oxiderat och har en roströd färg. Denna jord har dock låga svavelhalter och den oxiderade jorden uppvisar ej de låga pH värden som karakteriserar de sura sulfatjordarna.

Gubböle (7094072N 1704857E; 90 m ö. h. y.)

Vid ett vägbygge, vid E12, gjordes observationer på tre i närheten av varandra liggande platser.

- 1) Den första platsen ligger i botten på en närmare 3 meter djup siltravin. Här borrades ner till ett djup på 1,7 meter. Hela lagerföljden utgörs av blågrå silt.
- 2) Den andra platsen är ett schakt som grävts i samband med vägbygget på nordsidan av E12 (Figur 21). Silten har oxiderat ner till ca en meter under markytan (pH är 4,7 i denna horisont). Den understa metern av schaktet består av blågrå, reducerad silt av samma karaktär som på plats ett (pH 6,3). I den oxiderade jorden framgår det att silten är skiktad (laminerad).
- 3) I ett schakt på den motsatta sidan av vägen observerades blågrå silt med samma utseende som på de föregående två platserna.

Resultaten av analyser visar att silten på denna plats (Gubböle) inte innehåller några signifikanta sulfidhalter (Tabell 2). Trots detta ligger pH i den oxiderade jorden på denna och föregående lokal (Tavelsjö) relativt lågt (runt 4). Orsaken till detta är inte känd.

Flera metaller (tex Cr, Fe och Al) uppvisar lägre halter i den oxiderade jorden jämfört med den underliggande blågrå silten (Tabell 3). Flera av dessa metaller är dock inte ämnen som enligt tidigare undersökningar mobiliseras från sura sulfatjordar (tex Sohlenius och Öborn 2004). Skillnaden mellan de två proverna har därför troligen en annan orsak tex olika mineralogi eller kornstorlekssammansättning.

Sörfors

(7092150N 1708627E; 40 m ö. h. y.)

Här gjordes en observation i en spadgrävd grop i en liten ravin som ligger i slutningen ner mot Umeälv. Det gick ej att trycka ner borrhultningen i marken eftersom det var för torrt. Troligtvis är detta en s.k. sur sulfatjord vilken bildats genom oxidation av svartmocka. Detta stöds av det låga pH värdet 25-30 cm under markytan (pH 3,7-3,8) samt att det i sprickor finns utfällningar av järnhydroxid och jarosit.

Sammanfattning av resultaten från Västerbotten

Områden där de sulfidhaltiga sedimenten ligger nära markytan verkar i första hand vara koncentrerade till de större kustnära slättområdena. Det är troligtvis här som en ökad mobilisering av metaller sker tex efter dikning. Det finns rapporter som visar att det finns sulfidhaltiga sediment högre upp längst Umeälvs dalgång (Ivarsson mfl 1996). De flesta lokaler med sulfidhaltiga sediment ligger enligt tidigare undersökningar under nivån för Litorinahavets högsta nivå (tex Fromm 1965). Vilket i Västerbotten motsvarar en nivå som ligger drygt hundra meter ovanför dagens havsyta (Appendix 2). Inom detta arbete har vi dock inte lyckats provta sulfidhaltiga sediment på högre höjder än ca 60 m ö.h.y. (Norrfors). Det är dock troligt att det finns sulfidhaltiga sediment under sulfidfria postglaciala sediment på högre höjder (se tex Fromm 1965 och lokalen Norrfors), dessa sulfidfria sediment kunde dock inte penetreras med de handrivna sonder som användes inom detta arbete. Under 2004 kommer geofysiska metoder att testas för att fastställa om dessa kan användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. Dessa metoder kan förhoppningsvis användas för att identifiera sulfidhaltiga sediment vilka är täckta av yngre sulfidfria sediment. Dessutom kommer de arkivstudier som utförs inom Geonatprojektet förhoppningsvis att kunna ge besked om huruvida sulfidhaltiga sediment förekommer under älvsedimenten.

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

<i>Lokal</i>	<i>Djup under markytan (m)</i>	<i>C%</i>	<i>N%</i>	<i>S%</i>
Bråsjön	1,8	0,431	0,033	0,021
Bråsjön	2,8	0,591	0,048	0,030
Bråsjön	3,8	0,720	0,057	0,029
Tavelsjö 2	2	0,671	0,033	0,110
Tavelsjö 2	3,7	0,351	0,039	0,027
Tavelsjö 2	4,7	0,252	0,021	0,013
Västerfjärden	0,2	1,273	0,097	0,192
Västerfjärden	0,5	1,177	0,112	0,570
Västerfjärden	1	1,259	0,118	0,533
Västerfjärden	1,5	0,806	0,081	0,426
Västerfjärden	2,3	1,446	0,148	1,024
Västerfjärden	2,6	0,394	0,041	0,060
Vännäs	2,25	0,154	0,015	0,004
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	(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
Kulbäcksliden	3,5	0,465	0,027	0,003
Kulbäcksliden	4,5	1,140	0,030	0,072
Gubböle	1	0,205	0,009	0,005
Gubböle	2	0,213	0,019	0,010
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
Röbäcksslätten	0,20-0,22	1,006	0,108	0,875
Röbäcksslätten	1,8	1,209	0,138	0,900

Tabell 3. Metallhalter i siltjordar från Västerbotten

<i>Lokal</i>	<i>Djup under markytan (m)</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>
Västerfjärden	0,2	21,64	14930	9695	210	18,97	27,74	12,05	143,2	0,28	54,79
Västerfjärden	0,5	29,69	28047	12769	520	9,79	20,71	16,96	95,74	0,07	9,48
Västerfjärden	1	43,64	26137	12275	344	8,83	19,27	16,49	79,2	0,11	8,99
Gubböle	1	20,38	12189	8764	274	6,57	11,38	13,8	47,39	0,09	5,48
Gubböle	2	35,71	24608	14170	290	9,64	21,93	23,41	87,57	0,1	13,04
Västerslätt	0,05-0,06	25	24240	8476	150	3,71	9,72	12,38	38,11	0,03	6,69
Västerslätt	0,28-0,29	26,61	23380	10882	246	8,03	18,73	18,87	82,73	0,1	8,59
Västerslätt	0,75-0,76	24,86	19816	9590	247	6,59	15,74	16,41	66,75	0,07	6,56
Västerslätt	1,25-1,26	30,03	26391	11874	385	8,73	19,92	21,44	78,82	0,09	8,69
Västerslätt	1,75-1,76	31,08	25803	11980	401	8,74	21,4	25,47	84	0,06	9,15
Röbäcksslätten	0,20-0,22	20,05	17757	7623	227	5,8	13,34	15,27	55,76	0,06	5,8
Röbäcksslätten	1,8	24,85	21358	10197	288	7,02	16,5	19,18	64,97	0,09	7

7. Diskussion och slutsatser

Denna undersökning visar att det är möjligt att använda resultaten 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 troligen användas för att identifiera dessa jordar.

I Mälardalen sammanfaller förekomsterna av sulfidhaltiga sediment med områden som på jordartskartan (serie Ae) karterats som gyttjelera. Dessvärre har inte gyttjelera skiljts ut från postglacial lera på samtliga de kartor som finns kring Mälardalen (Uppsala NO, Ae 113).

Längst Norrlandskusten förekommer sulfidmineral främst i gyttjiga siltsediment. Vid SGU's jordartskartering i Norrland har gyttjejordar inte avgränsats från andra finkorniga vattenavsatta sediment (Länkartor serie Ca och jordartskartor serie Ak). I många områden utgör dessa sulfidhaltiga sediment säkert en stor andel av de finkorniga sedimenten närmast kusten. Exempelvis verkar de uppodlade slättområdena kring Umeå till största delen underlagras av sulfidhaltiga sediment. Detta verkar även vara fallet i Norrbottens kustland (Fromm 1965). I dessa områden kan därför SGU's jordartskartor ge en grov uppfattning om var sulfidhaltiga sediment troligtvis förekommer. I Norrland överlagras ofta de mest finkorniga sedimenten ofta 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. 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 kartorn.

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. Mindre områden med sura sulfat jordar kan därför falla bort om de hamnar utanför eller nedströms i dräneringsområdet vid den biogeokemiska karteringen.

De kartor som visar resultaten från flygmätningar med tvåvägs VLF verkar kunna användas för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. Dessa flygmätningar finns dock endast i begränsade delar av Sverige. Även resultaten från mätningar med envägs VLF visar att stora områden med sulfidhaltiga sediment avspeglas som områden med låg skenbar resistivitet (**Figur 16**). Orsaken till detta samband är ej känd. En möjlighet är att förekomsten av sulfider direkt påverkar markens elektriska ledningsförmåga. Eftersom de sulfidhaltiga sedimenten troligen är avsatta i bräckt vatten är det möjligt att porvattnet i dessa jordar har en hög kloridhalt, vilket i sin tur kan leda till en låg resistivitet.

Framtida undersökningar

Under 2004 påbörjas ett nytt SGU-finansierat FoU projekt: Geofysiska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment (Gustav Sohlenius, Lena Persson och Mehrdad Bastani). Målsättningen med detta projekt är att med geofysiska metoder identifiera områden med sulfidhaltiga postglaciala sediment. Resultaten kan bli ett underlag för att i framtiden lättare kunna identifiera var dessa problemjordar förekommer. Studien kommer att inriktas på tre områden, ett i Västerbotten, ett i Mälardalen och ett i Norrbotten.

Vid Luleå Universitet har ett SGU finansierat projekt påbörjats: Sambanden mellan biogeokemisk kartering och vattenkvalitet, och användbarheten av biogeokemisk kartering för att identifiera områden med sulfidförande sediment. Resultaten från detta projekt kommer att förhoppningsvis leda till en ökad kunskap om hur de biogeokemiska kartorna kan användas för att identifiera områden med sura sulfatjordar.

Inom Geonat projektet kommer alla resultat från arkivstudierna att sammanställas, vilket kommer att ge en bra bild av förekomsterna av sulfidhaltiga sediment i delar av Västerbotten.

Presentationer av resultat

Resultat från det här rapporterade projektet har presenterats muntligt och skriftligt vid flera tillfällen:

- På det geologiska vintermötet i Uppsala januari 2004 presenterades en poster med titeln: *Sulphidic postglacial sediments - Methods that can be used to identify*

areas where sulphidic sediments occur (Gustav Sohlenius, Lena Persson, Kaj Lax, Leif Andersson and Johan Daniels)

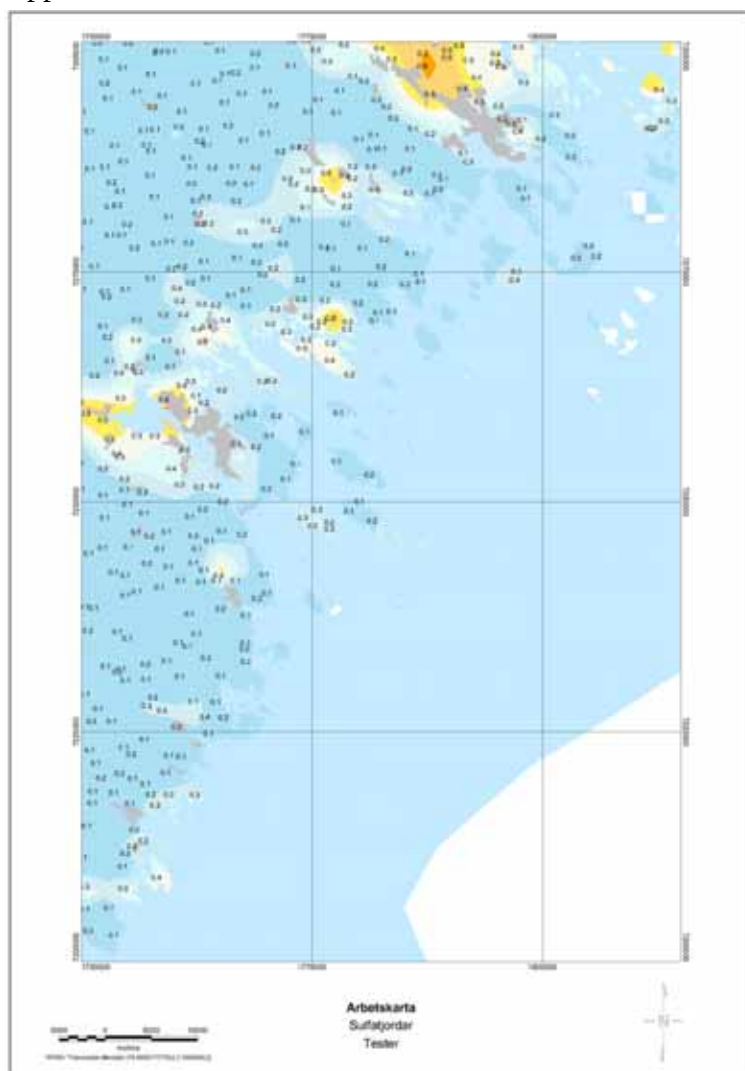
- På det geologiska vintermötet i Uppsala januari 2004 hölls även ett föredrag med titeln: *Apparent resistivity maps derived from airborne VLF data applied to geological mapping* (Lena Persson, Johan Daniels, Gustav Sohlenius och Laust B. Pedersen). Presentationen innehöll delvis resultat som uppnåts inom det här rapporterade projektet.
- Under våren 2003 hölls en muntlig presentation på en endags kurs för SGU:s maringeologer. Kursen hölls för att förbereda sommarens fältarbete inom det just påbörjade Geonatprojektet.
- På ett Geonatmöte (2003-10-07) presenterades preliminära resultat från undersökningarna av sulfidhaltiga sediment i Västerbotten
- På SGU's FoU dagar, 10-11 mars 2004, presenterades resultat från detta projekt och från projektet: "Geokemisk karaktärisering av sulfidhaltiga sediment".
- Vid ett besök på GTK 18-19 mars 2004 presenterades resultat från detta projekt och från "Geokemisk karaktärisering av sulfidhaltiga sediment".
- På Nordiska föreningen för lerborsknings årsmöte i Tartu (september 2004) presenterades resultat från projektet: Geokemisk karaktärisering av sulfidhaltiga sediment".
- Ett manuskript med inriktning mot sulfidleror och effekter på biogeokemiska prov är under granskning (Lax, K. 2004: Analysis of stream plants as indicators of acid sulphate soils in Sweden. Submitted to Agricultural and Food Science (2004-08-28))
- Resultat från projektet: "Geokemisk karaktärisering av sulfidhaltiga sediment" har presenterats skriftligt i
 - a) Sohlenius, G & Öborn, I., Geochemistry and partitioning of trace metals in acid sulphate soils in Sweden and Finland before and after sulphide oxidation. (Geoderma).
 - b) Sohlenius G & Öborn I., 2001: Slutrapportering av projektet "Geokemisk karaktärisering av sulfidhaltiga jordar". Slutrapport av SGU-finansierat FoU projekt (SGU).

8. Referenser

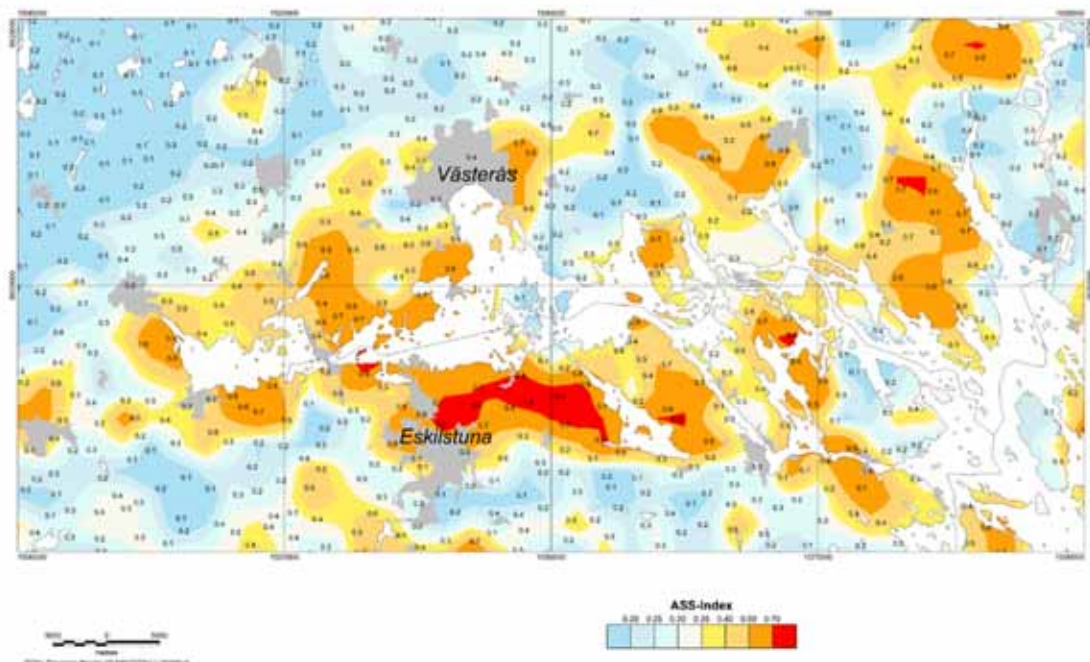
- Andersson, A., Gustafsson, A. och Torstensson, G. 1988. Utlakning av spårelement från odlad jord. *Ekohydrologi* 26:13-22.
- Chanton, J. P., Martens, C. S. and Goldhaber, M. B. 1987: Biogeochemical cycling in an organic rich coastal-marine basin 7. Sulfur mass balance, oxygen uptake and sulfide retention. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51. 1187-1199.
- Ekelund, L., Nilsson, C.A. and Ressar, H. 1993: Biogeokemiska kartan, Tungmetaller i bäckvattenväxter. Geological Survey of Sweden 75, 32 pp.
- Fromm, E. 1965: Beskrivning till jordartskartan över Norrbottens län nedanför lappmarksgränsen. Sveriges Geologiska Undersökning Ca 39, 236 pp.
- Georgala, D., 1980. Palaeoenvironmental studies of post-glacial black clays in north-eastern Sweden. Stockh. Contrib. Geol., XXXVI, 151 pp.
- Ivarsson, H. Persson, A. Andersson, T. & Bergqvist, A. 1996: Sulfidjordar i norra och mellersta Sverige. Umeå universitet, Inst. För ekologi och miljövärd. 21 pp.
- Jerbo, A. 1965: Bottniska lersediment en geologisk-geoteknisk översikt. Meddelande från statens järnvägars centralförvaltning geotekniska kontoret. Nr 11, 159pp.
- Lax, K. 2004: Analysis of stream plants as indicators of acid sulphate soils in Sweden. Submitted to Agricultural and Food Science (2004-08-28).
- Mácsik, J. 1999: Soil Improvements Based on Environmental Geotechnics. Luleå University of Technology. 48 pp.
- 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.
- Nystrand, B.-Å. 1980: Some properties of sulphide-bearing sediments on the coast of northern Sweden. *Striae* 13, 52 pp.
- Persson, L. och Daniels, J. 2004. Utveckling av tolkningsmetoder för VLF-data. SGU-rapport 2002:41. Sveriges Geologiska Undersökning.
- Puranen, R, Mäilä, M, Sulkanen, K & Grundström, A. 1997: A new apparatus for electric conductivity and temperature logging of soft sediments. Geological Survey of Finland, Special Paper 23, 149-155.
- Påsse T. 2001 An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. Svensk kärnbränslehantering, R-01-41
- Sohlenius G & Öborn I., 2004: Geochemistry and partitioning of trace metals in acid sulphate soils in Finland and Sweden before and after sulphide oxidation. *Geoderma* 122, 167-175.
- Sohlenius G & Öborn I., 2001: Slutrapportering av projektet "Geokemisk karakterisering av sulfidhaltiga jordar". Slutrapport av SGU-finansierat FoU projekt (SGU).
- 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.
- Yli-Halla, M. Puustinen, M. och Koskiahho, J. 1999: Area of cultivated acid sulfate soils in Finland. *Soil Use and Management* 15, 62-67

- 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. 1998: Partitioning of transition metals in oxidised and reduced zones of sulphide-bearing fine-grained sediments. *Applied Geochemistry* 13, 607-617.
- Åström, M, och Åström, J. 1997. Geochemistry of stream water in a catchment in Finland affected by sulphidic fine sediments. *Geochemistry – exploration, environment, analysis*, 3: 197-203.
- 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.
- Åström, M. och Björklund, A. 1996. Hydrogeochemistry of a stream draining sulfide-bearing postglacial sediments in Finland. *Water, Air and Soil Pollution* 89, 233-246.
- Öborn, I. 1989: Properties and classification of some acid sulfate soils in Sweden. *Geoderma* 45, 197-219
- 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.
- Öborn, I. och Andersson, P. 1999: Sulfidlerornas betydelse för stora tungmetallflöden i vissa sedimentområden. Slutrapport till Sveriges Geologiska Undersökning, 30 pp.

Appendix 1

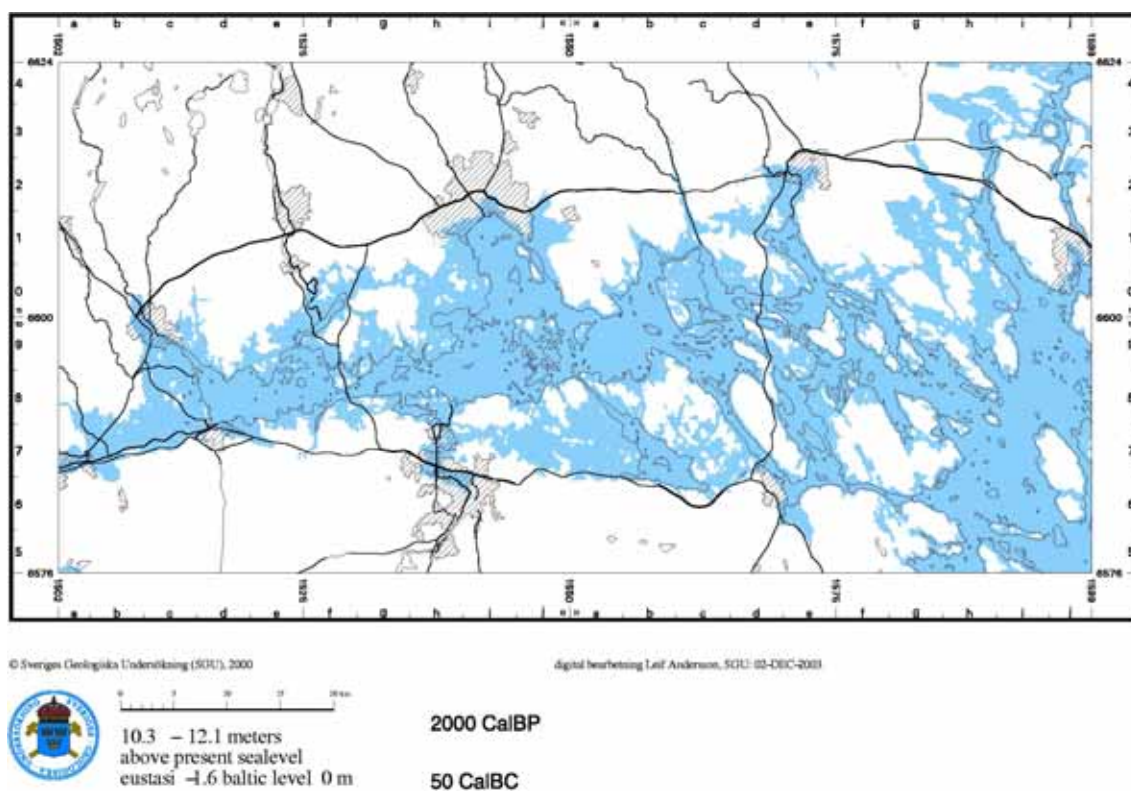


Biogeokemiska data från Norrbottens kustland. Ett index räknades ut med utgångspunkt från halterna av S, Ni, U, Y och Zn i bäckvattensväxter (rötter och mossor) vilka samlats in under SGU:s biogeokemiska kartering. Index baseras på normaliserade data mellan 0,1 och 1,0. Högst index finns i områden med vattenavsatt silt.

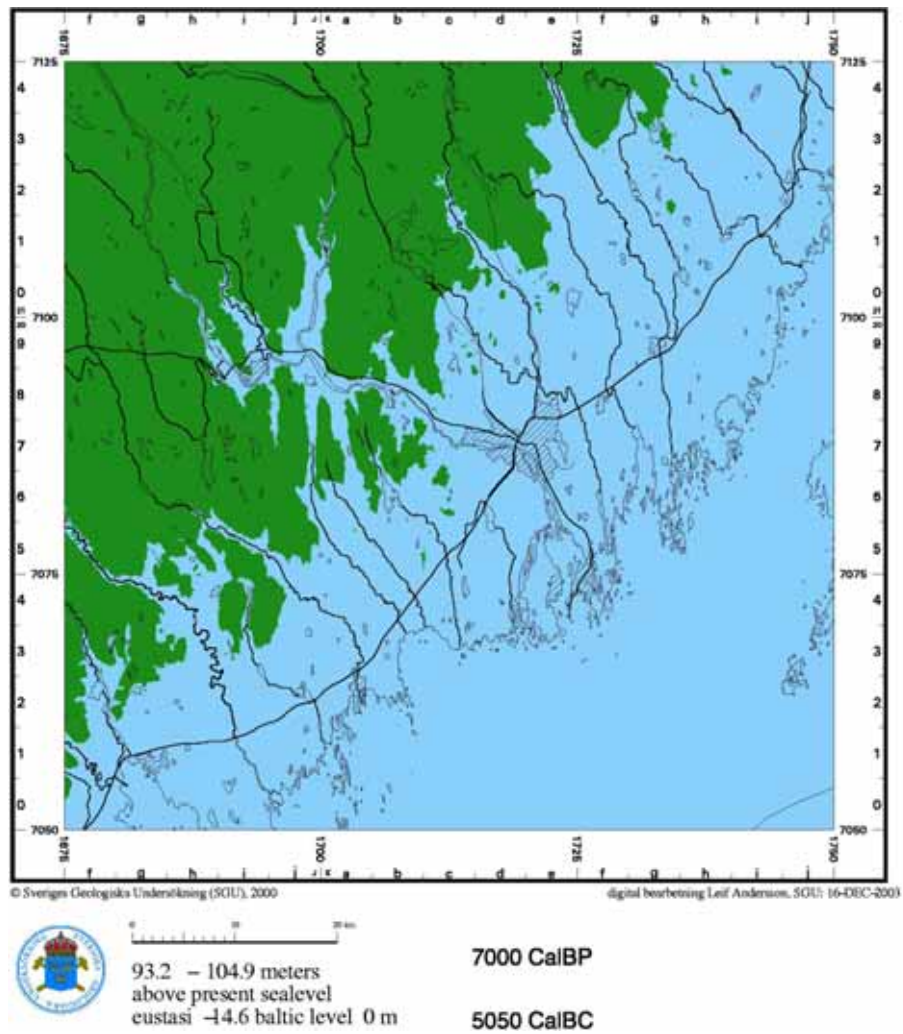


Biogeokemiska data från området kring Mälaren. Ett index räknades ut med utgångspunkt från halterna av S, Ni, U, Y och Zn i bäckvattensväxter (rötter och mossor) vilka samlats in under SGU:s biogeokemiska kartering. Index baseras på normaliserade data mellan 0,1 och 1,0. Högst index finns i områden med gyttjeleralergyttja.

Appendix 2



Strandlinjens utseende i Mälardalen för 2000 år sedan. De flesta områden som idag täcks av lergyttja utgjordes vid denna tidpunkt av grunda fjärdar och vikar.



Strandlinjen i Västerbotten för 7000 år sedan.