

Sur sulfatjord – egenskaper och utbredning

Marina Becher, Gustav Sohlenius & Christian Öhrling

juni 2019

SGU-rapport 2019:13



Omslagsbild: Landskap där aktiv och potentiell sur sulfatjord förekommer

Illustratör: Magdalena Thorsbrink

Författare: Marina Becher, Gustav Sohlenius och Christian Öhrling

Granskad av: Sarah Josefsson och Magdalena Thorsbrink

Ansvarig enhetschef: Anna Hedenström

Projektnamn: Markanvändning

Projekt-id: 873319

Layout: Johan Sporrang, SGU

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

fax: 018-17 92 10

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Bakgrund och inledning	5
Hur bildas sur sulfatjord?	6
Så bildas potentiell sur sulfatjord	6
Så bildas aktiv sur sulfatjord	7
Var finns sur sulfatjord?	9
Hur känner man igen sur sulfatsjord?	15
Metod för undersökning av sur sulfatjord	22
Klassificering av sur sulfatjord	23
Påverkan på miljön	24
Åtgärder för att minska miljöpåverkan från sur sulfatjord	29
Handledning	30
Referenser	34

BAKGRUND OCH INLEDNING

I många kustnära områden i Sverige, framförallt längs Norrlandskusten, finns sur sulfatjord som kan ha en negativ påverkan på närliggande ytvatten. Detta har i vissa fall lett till att vattenförekomsterna inom vattenförvaltningsarbetet inte uppfyller miljö kvalitetsnormerna (MKN) för vatten.

Sur sulfatjord är ett samlingsnamn för aktiv och potentiell sur sulfatjord. Aktiv sur sulfatjord bildas då sulfidhaltiga sediment (potentiell sur sulfatjord, även kallad sulfidjord, svartmocka) exponeras för luft vilket leder till att markens pH sjunker kraftigt. Vid kraftiga vattenflöden kan detta i sin tur leda till att flertalet, för miljön, skadliga metaller mobiliseras från jorden. Aktiv sur sulfatjord kan därmed påverka miljön i omgivande vatten negativt, och i vissa områden kännetecknas därför vattnen i anslutning till sur sulfatjord periodvis av lågt pH och höga koncentrationer av vissa metaller.

Ett av målen med EUs vattendirektiv är att skapa god ekologisk och kemisk status i sjöar och vattendrag samt god status i grundvatten. Med anledning av detta har vattenmyndigheterna i åtgärdsprogrammet för vattenförvaltningscykeln 2016–2021 uppmärksammat sur sulfatjords påverkan på vattenmiljön. Vattenmyndigheten i Bottenviken och Bottenhavets vattendistrikt har därför riktat åtgärder till Sveriges geologiska undersökning (SGU), Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen, Jordbruksverket, länsstyrelserna och Trafikverket, som syftar till att minska miljöbelastningen från sur sulfatjord. Vattenmyndighetens riktade åtgärder (se Länsstyrelsen i Norrbotten 2014) ska bidra till att förbättra förutsättningarna för att uppnå MKN för vatten. SGUs åtgärd syftar till att bidra med kunskapsunderlag om sur sulfatjords egenskaper och utbredning till berörda myndigheters vägledningar. De underlag SGU tagit fram ska kunna användas av myndigheter och berörda verksamhetsutövare för att formulera tillräckliga krav vid de vattenförekomster som inte når MKN. Detta kan ske genom att undvika en markanvändning som leder till att aktiv sur sulfatjord bildas, men även genom åtgärder som syftar till att minska miljöbelastningen från befintliga områden med aktiv sur sulfatjord. Denna rapport är en del av avrapportering av åtgärden riktad till SGU från Vattenmyndigheten. Rapporten behandlar främst sur sulfatjord längs Norrlandskusten men eftersom sådan jord även förekommer i andra vattendistrikt kan detta material komma till användning utanför de distrikt som åtgärden avser.

Syfte med denna rapport är att redovisa:

- var i landskapet som sur sulfatjord förekommer, vilka egenskaper de har och hur de påverkar vattenmiljön
- kartor som visar i vilka områden sur sulfatjord sannolikt förekommer, samt en beskrivning till hur kartorna kan användas
- en metodik som kan användas för att identifiera sur sulfatjord, samt bedöma om de utgör en risk för miljön

De kartor som redovisas kommer finnas tillgängliga som öppna data vilka kan laddas ner från SGUs webbplats (www.sgu.se).

SGU har i flera projekt använt olika metoder för att identifiera sur sulfatjord samt dokumenterat områden där sådan jord förekommer (Sohlenius m.fl. 2004, Sohlenius m.fl. 2007, Sohlenius m.fl. 2015), och har därmed byggt upp kunskap om dess egenskaper och förekomster. Under de senaste åren har SGU deltagit i två Interreg-projekt: ett Interreg Nord-projekt i Norrbotten (www.interregnord.com) och ett Interreg Botnia Atlantica i Västerbotten (www.botnia-atlantica.eu). I dessa projekt har förekomster av sur sulfatjord dokumenterats i

utvalda kustnära avrinningsområden. Projekten har inneburit kunskapsutbyte med länsstyrelser, Skogsstyrelsen i Sverige och med Finlands geologiska undersökning (GTK), som har utfört utförlig dokumentation av sur sulfatjord i Finland. Inom projekten har SGU och GTK gemensamt fastställt metoder för att dokumentera och klassificera sur sulfatjord i de två länderna. En stor del av de resultat som presenteras i denna rapport har tagits fram inom de två Interreg-projekten.

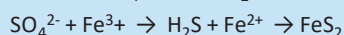
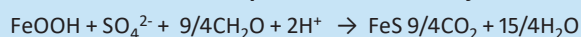
HUR BILDAS SUR SULFATJORD?

Så bildas potentiell sur sulfatjord

Potentiell sur sulfatjord som förekommer i Sverige utgörs av sulfidhaltiga sediment vilka i de flesta fall har avsatts i bräckt vatten på Östersjöns botten och som därefter torrlagts genom den landhöjningen som pågått sedan den senaste istiden (fig. 1). Sedimenten har i vissa fall avsatts för flera tusen år sedan på stort vattendjup och i andra fall i grunda skyddade vikar där vattenblandningen är begränsad, vilket minskar syretillförseln och gör att en hög sedimentation av organiskt material kan ske. I Sverige är landhöjningen störst längs Norrlandskusten vilket gjort att stora arealer sulfidhaltiga sediment där har torrlagts, vilket förklarar varför sur sulfatjord är vanligt förekommande i det området. Sulfidhaltiga sediment kan även avsättas i sjöar och förekommer därför i hela landet.

Sulfidmineralen har bildats i sedimenten eller på bottenarna i samband med att de avsattes (se faktaruta 1). Sedimenten innehåller organiskt material som oxideras av bakterier. I första hand använder bakterierna syre vid denna oxidation men när syret tar slut reduceras istället sulfat till sulfid och trevärt järn reduceras till tvåvärt. Järn och sulfid kan sedan reagera varvid järnsulfider bildas. Längs Norrlandskusten utgörs sulfiderna ofta av järnmonosulfider vilka färgar sedimenten svarta. Längre söderut i Sverige är sulfidmineralet pyrit vanligare, vilket inte ger jorden den karaktäristiska svarta färgen. Sulfidmineral är relativt stabila i syrefattiga miljöer där de inte kan oxidera. Eftersom sulfidhaltiga sediment ofta kan bilda aktiv sur sulfatjord kallas de potentiell sur sulfatjord. Potentiell sur sulfatjord förekommer främst i terrängens lägsta partier där grundvattenytan är belägen nära markytan. Om sådana områden inte påverkas av diken eller annan markanvändning kommer de att utgöra våtmarker där potentiell sur sulfidhaltigt sediment med tiden kommer täckas av ett torvlager (Boman m.fl. 2010).

Faktaruta 1. Så bildas potentiell sur sulfatjord



I sediment som avsätts på botten av sjöar och hav bryts organiskt material ner av bakterier som i första hand använder syre för att bryta ner, oxidera, det organiska materialet. När syret tar slut börjar bakterierna använda sulfat (SO_4^{2-}) och trevärt järn (Fe^{3+}) vilka reduceras och kan reagera med varandra och bilda järnsulfider, t.ex. pyrit (FeS_2). I många fall bildas monosulfider (FeS) som ger sedimenten en karaktäristisk svart färg. Under vissa förhållanden kan dessa monosulfider reagera med svavel och bilda pyrit. Det är dessa sulfidmineral, vilka om de oxiderar, kan ge upphov till de låga pH-värden som kännetecknar aktiv sur sulfatjord.

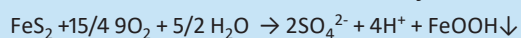


Figur 1. Illustrationen visar en tänkbar miljö för några tusen år sedan då potentiell sur sulfatjord avsätts på botten av Östersjön, det svarta lagret. Sulfidmineralen har bildats då organiskt material i en syrefrimiljö bryts ner bakteriellt (se faktaruta 1). Ofta har de sulfidhaltiga sedimenten en svart färg vilket illustreras i figuren. I figur 3 visas hur området ovan kan förändras då det genom landhöjningen torrläggts. Illustratör: Magdalena Thorsbrink.

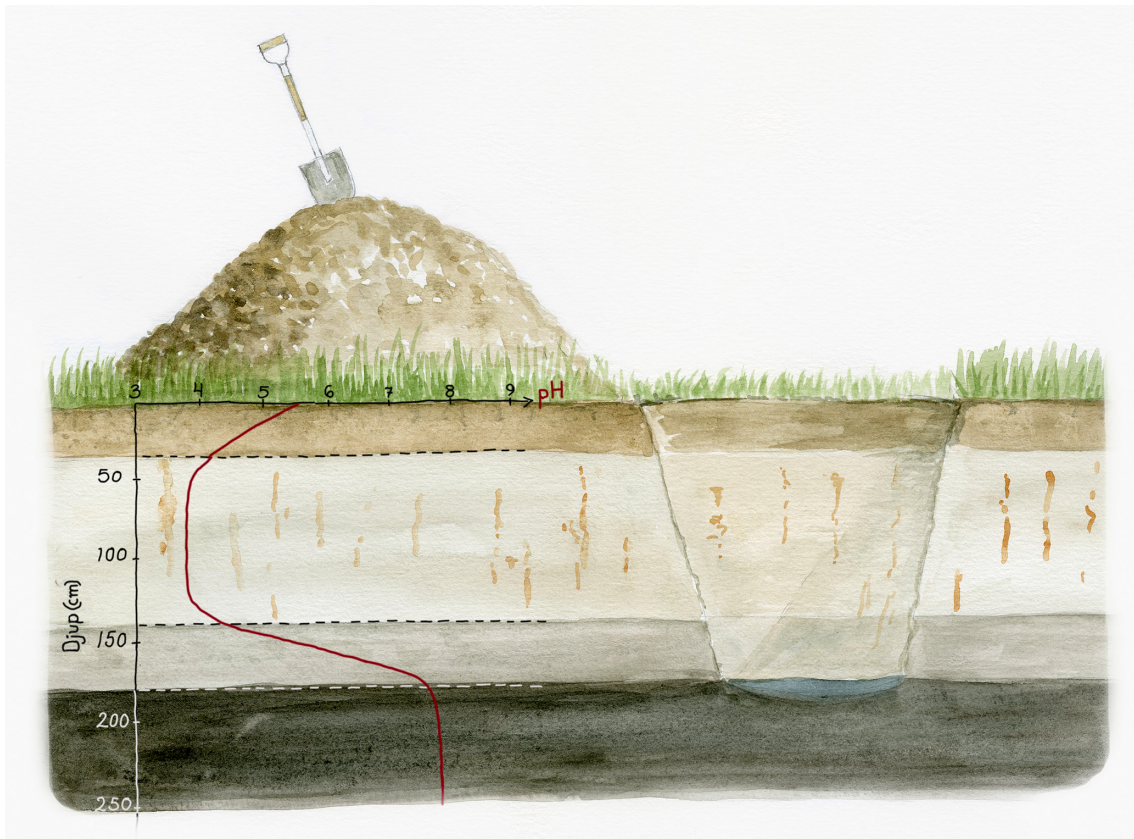
Så bildas aktiv sur sulfatjord

Om potentiell sur sulfatjord exponeras för luftens syre oxiderar de varvid svavelsyra bildas, vilket leder till att aktiv sur sulfatjord uppkommer (se faktaruta 2). Det är oxidation av sulfidmineral som är orsaken till de miljöproblem som förorsakas av sur sulfatjord. De sulfidhaltiga sedimenten innehåller inte högre halter av metaller än annan lerjord. Orsaken till att metaller mobiliseras från aktiv sur sulfatjord är istället att mineralen i jorden utsätts för en kraftig kemisk vittring vid de låga pH-värden som uppkommer i jorden, vilket leder till att för miljön skadliga ämnen går i lösning och därefter kan läcka ut från jorden. Aktiv sur sulfatjord (fig. 2) bildas främst då grundvattenytan sänks artificiellt genom dikning av våtmarker men på vissa platser förekommer även aktiv sur sulfatjord som bildats då sulfidhaltiga sjösediment torrläggts i samband med utdikningsprojekt. Sänkning av grundvattenytan leder till att den utdikade jorden torkar varvid öppna spricksystem uppstår. Luft kan relativt enkelt tränga ner

Faktaruta 2. Så bildas aktiv sur sulfatjord



När grundvattennivån sänks kan luft tränga ner i de sulfidhaltiga sedimenten och reagerar med järnsulfiden som oxiderar till svavelsyra (H_2SO_4) och järnutfällningar. Denna process underlättas av att jordarna spricker upp då de dränerats vilket gör att luft relativt snabbt kan tränga ner i marken.



Figur 2. Exempel på en aktiv sur sulfatjord och hur pH-värden uppmätta i fält typiskt kan se ut. Aktiv sur sulfatjord har pH under 4 medan pH i underliggande sulfidhaltiga potentiell sur sulfatjord ligger över 7. Mellan aktiv och potentiellt sura jorden finns en övergångszon med mot djupet successivt ökande pH-värden. I områden med jordbruksmark har ofta den översta markhorisonten ett högre pH än underliggande jord. Detta eftersom marken kalkats. Illustratör: Magdalena Thorsbrink.

i jorden via dessa sprickor vilket påskyndar oxidationen av sulfidmineral. Dessutom kan vatten lätt röra sig genom sprickorna vilket gör att surt metallrikt vatten snabbt kan röra sig från de sura jordarna ut till omgivande vatten. I samband med exempelvis snösmältningen eller kraftiga regn transporteras surt metallrikt vatten ut från aktiv sur sulfatjord vilket kan förorsaka s.k. surstötter, vilket i vissa fall kan leda till fiskdöd. Det är speciellt stor risk att sådana surstötter uppstår efter en period med torka då grundvattenytan stått lågt och syre därmed trängt djupt ner i marken och förorsakat oxidation av sulfidhaltig jord. I vissa områden, t.ex. i Uppland, förekommer sulfidjord vilken innehåller kalk som buffrar den surhet som uppstår då sulfidmineralen oxiderar. Sådan sulfidjord benämns följaktligen inte potentiell sur sulfatjord.

Som nämnts ovan bildas aktiv sur sulfatjord ofta då sulfidhaltiga, ofta ler- och silthaltiga, sediment exponeras för luft som en effekt av olika mänskliga aktiviteter, så som dikning (Österholm & Åström 2002, Boman m.fl. 2010). Eftersom ler- och siltjordar är lämpade för jordbruk har potentiell sur sulfatjord i många områden dikats varefter aktiv sur sulfatjord bildats. Idag är etablering av ny markavvattning ovanligt i Sverige men täckdikning, dikesrensning och skyddsdikning kan leda till att potentiell sur sulfatjord exponeras för syre. Efter dikning av torvmarker sjunker torvlagren långsamt ihop, och oxiderar med tiden bort helt, vilket leder till att diken måste fördjupas för att bibehålla markavvattningen. I de fall torven underlagras av potentiell sur sulfatjord kan den exponeras för luft. Det innebär att ny aktiv sur sulfatjord kan bildas även i områden som varit dikade under en längre tid. Även om helt

ny markavvattning idag är ovanlig förekommer den i samband med t.ex. etablering av torvtäkt, och det är i sådana fall viktigt att fastställa att potentiell sur sulfatjord inte riskerar att exponeras för luft. Dessutom kan potentiell sur sulfatjord exponeras för luft i samband med byggnationer och vid muddring av farleder (Pousette 2007, Trafikverket 2018). Muddermassor från sjöar och hav kan innehålla relativt höga halter av för miljön skadliga metaller och miljögifter och det är därför av speciellt stor vikt att dessa massor hanteras på ett sätt så att läckage av surt, metallhaltigt vatten undviks. För att undvika en markanvändning som leder till att potentiell sur sulfatjord exponeras för luft är det viktigt att det finns planeringsunderlag som visar var i landskapet som aktiv och potentiell sur sulfatjord förekommer.

VAR FINNS SUR SULFATJORD?

Det är främst i norra Bottenhavets och Bottenvikens kustområden som sur sulfatjords påverkan på vattenmiljön har uppmärksammats. Det finns dock studier som visar att sådan jord även förekommer längre söderut i Sverige. Exempelvis finns det flera kända områden med aktiv sur sulfatjord i Mälarenregionen (Bayard & Mood 2014, Sohlenius & Öborn 2004), och i Skåne har aktiv sur sulfatjord nyligen påträffats i ett område med sjösediment nära Kristianstad (Åbjörnsson m.fl. 2018). Eftersom i stort sett hela den svenska kusten är påverkad av landhöjningen är det högst sannolikt att potentiell sur sulfatjord är mer eller mindre vanligt förekommande längs alla kuster. I vissa områden kan dock de potentiellt sura jordarna vara täckta av yngre sulfidfria avsättningar. Då sulfidmineral dessutom kan bildas i sjösediment kan aktiv sur sulfatjord ha bildats var som helst där sjösänkningar ägt rum.

På många platser förekommer potentiell sur sulfatjord under andra yngre sulfidfria jordarter så som älvsediment, torv eller sandjord vilken avsatts av vågor och strömmar. Dessa sulfidfria yngre jordarter kan i vissa fall vara flera meter mäktiga (SGU 2019, Jordlagerföljder – databas).

Sur sulfatjord i Norrbotten och Västerbotten förekommer främst i kustområden som på SGUs jordartskartor utgörs av lera och silt (fig. 3), och som genom landhöjningen torrlagts under de senaste 5 000 åren (Sohlenius m.fl. 2015). Ofta har den s.k. Littorinagränsen angetts som den övre gränsen för förekomsten av sulfidhaltiga sediment (Öborn 1994). Den gränsen motsvarar den högsta nivå som täckts av bräckt eller marint vatten efter den senaste istiden, och bildades för ca 8 500 år sedan (Lambeck 1999, Andrén m.fl. 2011). Enligt Sohlenius m.fl. (2015) påträffades ingen sur sulfatjord i områden som torrlagts för mer än 6 500 år sedan. Det kan dock inte uteslutas att sur sulfatjord lokalt förekommer i dessa äldre områden. I Finland har GTK under sina karteringar t.ex. påträffat sur sulfatjord upp till Littorinagränsen, och det finns även studier som visar att sådan jord kan förekomma ovanför denna gräns (Mäkelä 2013).

I södra Sverige förekommer sur sulfatjord ofta i områden vilka på SGUs jordartskartor redovisas som olika typer av gyttejordar, t.ex. lergyttja. På de mer översiktliga jordartskartorna från norra Sverige har i de flesta områden inte gyttejordar identifierats. Resultat från de analyser av bäckvattenväxter som SGU utfört inom ramen för den geokemiska karteringen visar att det ofta finns sur sulfatjord i områden med lerjord, där bäckvattenväxterna innehåller höga halter av ämnen som t.ex. kobolt och nickel (Lax 2005).

Det är främst i låglänta områden med ler och siltjord vilka ofta innehåller organiskt material, som sur sulfatjord påträffas. Under senare år har det emellertid uppmärksammats att sur sulfatjord även kan bildas i områden med sand- eller moränjord (Mattbäck m.fl. 2017) samt att torv i vissa fall kan bilda aktiv sur sulfatjord efter oxidation. De stora arealerna aktiv sur sulfatjord som långvarigt påverkar vattenmiljön negativt förekommer dock i områden med dikade finkorniga sediment ofta avsatta på Östersjöns botten men i vissa fall i sjöar.



Figur 3. Illustrationen visar ett område med potentiell sur sulfatjord som lyfts upp till följd av landhöjningen. I det uppodlade området har aktiv sur sulfatjord (rostfärgat lager) bildats som en följd av att grundvattenytan sänkts genom dikning. I myrområdet har ingen markavvattning skett och därmed har den potentiellt sura sulfatjorden inte exponerats för luft utan ligger kvar under ett lager av torv. Närmast kusten har marken inte påverkats av markavvattning och den potentiellt sura sulfatjorden är opåverkad av oxidation. Genom landhöjningen kommer dock dessa områden i framtiden att kunna utgöras av dikad jordbruksmark. Illustratör: Magdalena Thorsbrink.

Även om aktiv sur sulfatjord kan bildas i t.ex. sandjord är det i områden med ler- och siltjord som miljöproblem kopplade till aktiv sur sulfatjord uppmärksammas, och då främst områden som dikats. Denna jord hittas främst i landskapets lågpunkter i områden som om de inte avvattnats skulle utgöras av våtmarker. I våtmarker som inte alls eller i mindre utsträckning är påverkade av markavvattning saknas ofta sur sulfatjord och potentiell sur sulfidjord ligger direkt under ett lager med torv (fig. 3). På många platser finns potentiell sur sulfatjord under andra jordarter vilka skyddar dem från att oxidera även om en markavvattning sker. Längs de stora älvarna finns exempelvis på många platser tjocka lager av fluviala sediment vilka i många områden underlagras av sulfidhaltig jord.

SGUs undersökningar av sur sulfatjord har till stor del fokuserat på detaljerade fältundersökningar i fyra avrinningsområden: Hertsångerälven i Västerbotten, samt Alån, Rosån och Alterälven i Norrbotten. De tre sistnämnda ligger i anslutning till varandra och är i studien hopslagna till ett område, vilket har undersökts i Interreg Nord-projektet *Kustmynnande vattendrag*. Hertsångerälven undersöktes inom Botnia-Atlantica-projektet *VIMLA*. Dessutom har sur sulfatjord i Västerbotten och Norrbottens kustområden undersökts tidigare under 2012 och 2013 (Sohlenius m.fl. 2015), men den mer omfattande provtagningskampanjen i de utpekade avrinningsområdena har genomförts under 2016 och 2017. Även om det finns relativt få observationer som visar var i Sverige sur sulfatjord förekommer så har samarbetet med GTK i Finland lett till att kunskapen om jordarnas utbredning och egenskaper ökat även på den svenska sidan. Detta eftersom sur sulfatjord i de två länderna är bildade av samma processer och på en landskapsnivå som har samma geografiska fördelning. Det finns även data från

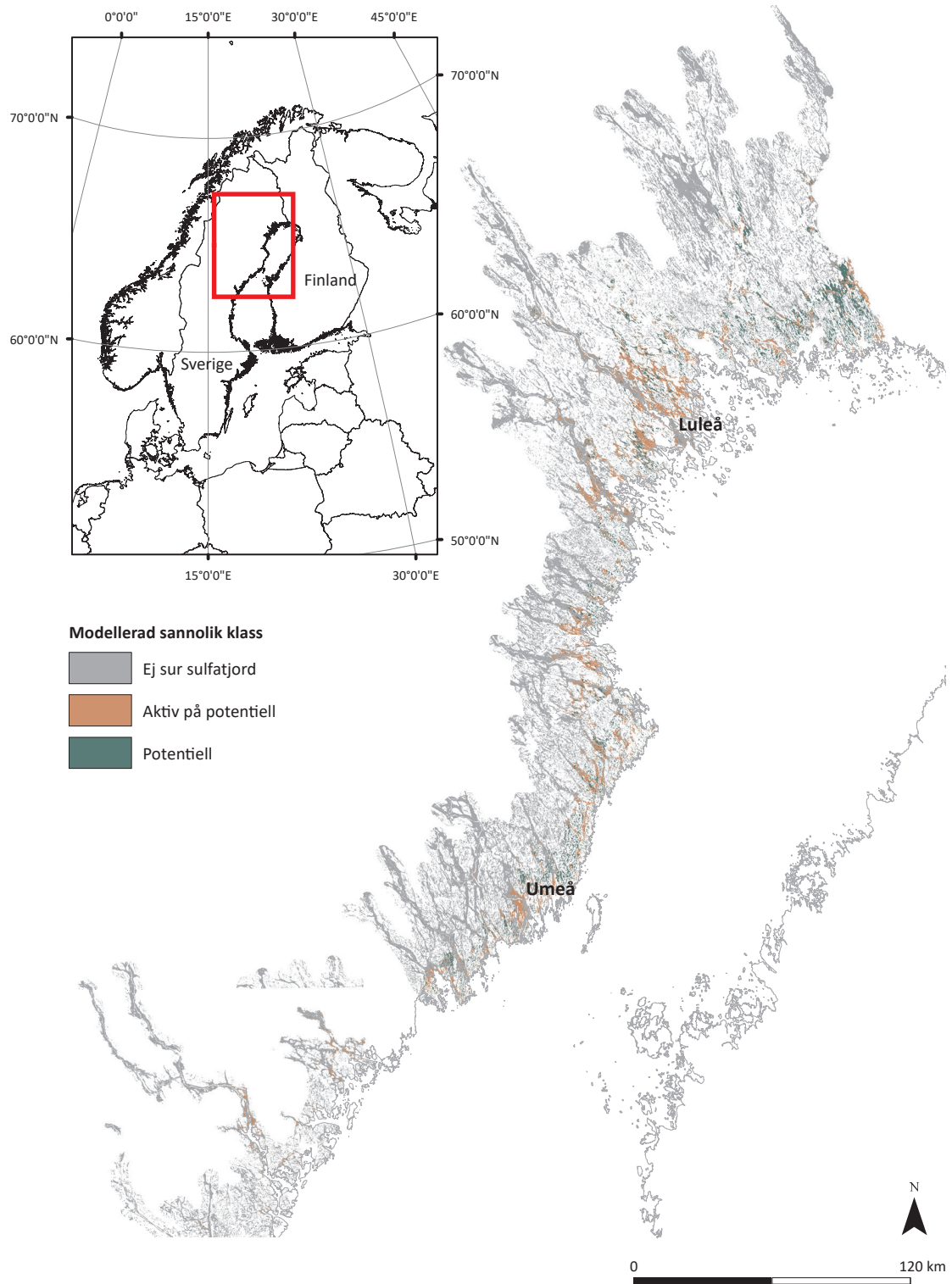
externa aktörer och tidigare undersökningar vid SGU som redovisar områden med sur sulfatjord. Exempelvis beskriver Granlund (1943) fiskdöd förorsakad av sur sulfatjord och Fromm (1965) beskriver översiktligt områden i Norrbotten där sur sulfatjord förekommer. Informationen som tagits fram av SGU under de senaste åren har använts som underlag, för att genom maskininlärning ta fram kartor, som visar förekomsten av aktiv och potentiell sur sulfatjord (se faktaruta 3, fig. 4). Modellerna bygger dels på de observationer som gjorts i samband med SGUs dokumentation av sur sulfatjord och dels på annan tillgänglig information, såsom jordartskartor och nationella marktäckedata från Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2019), samt Lantmäteriets nationella höjdmodell (Lantmäteriet 2019) och parametrar från den som t.ex. lutning och terrängens heterogenitet. Kartorna visar både områden där det är sannolikt att aktiv och potentiell sur sulfatjord förekommer och områden där det sannolikt bara är potentiell sur sulfatjord. Dessutom har tester gjorts för att beräkna tjockleken på lagret vilket utgör aktiv sur sulfatjord. Dessa beräkningar har gjorts för tre små kustnära avrinningsområden i Norrbotten och kan användas för att beräkna volymen aktiv sur sulfatjord. Det krävs dock mer tester för att ta fram sådana kartor med tillräcklig tillförlitlighet, därför presenteras inte dessa kartor här.

Kartan som redovisar var det är sannolikt att sur sulfatjord förekommer är användbar för att identifiera områden där det är viktigt att undvika sådan markanvändning som leder till en negativ påverkan från sur sulfatjord, samt för att identifiera områden där det är lämpligt att vidta åtgärder för att minska miljöbelastningen från jordarna. Det är dock viktigt att komma ihåg att kartan inte visar områden där det är säkert att sur sulfatjord förekommer utan områden där det är sannolikt att sådan jord förekommer. På samma sätt kan det inte helt uteslutas att sur sulfatjord förekommer på vissa platser där det enligt kartan är osannolikt att sådan jord förekommer. För att säkert bedöma förhållandena på en viss plats är det därför viktigt att karaktärisera jordarna på plats i fält (se avsnittet *Hur känner man igen sur sulfatjord?*). Kartan kan dock användas för att bedöma om en sådan karaktärisering är motiverad (se avsnittet *Handledning* för en mer utförlig beskrivning).

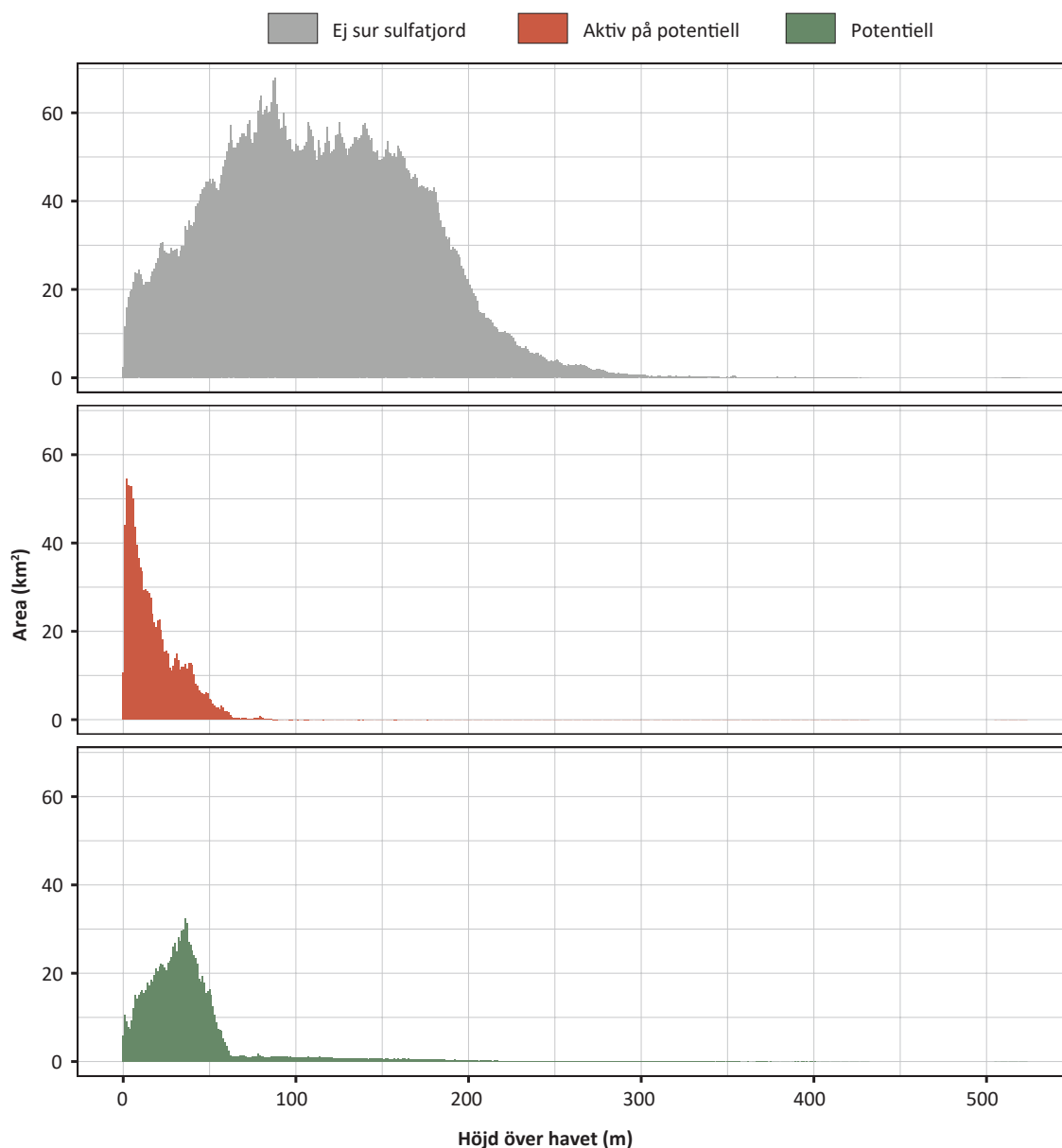
Modelleringen visar att sur sulfatjord främst hittas på nivåer lägre än 65 m ö.h. (fig. 5). Aktiv sur sulfatjord på potentiell sur sulfatjord är vanligast nära kusten inom stora flacka uppodlade områden med lera och silt (fig. 5 och 6). Områden med potentiell sur sulfatjord utan aktiv sur sulfatjord ovanpå är vanligast förekommande lite högre upp i terrängen. Det beror på att

Faktaruta 3. Modellering av förekomstkartor

För att göra det möjligt att ta fram förekomstkartor över sura sulfatjordars utbredning har övervakad maskininlärning använts. Sambandet mellan responsvariabeln (förekomsten av sura sulfatjordar på en specifik plats) och miljövariabler (t.ex. nationella höjdmodellen, variabler på höjdmodellen, nya nationella marktäckedata och jordartskartan) har använts för att förutspå sannolik klass på platser som inte undersökts genom att träna en algoritm. Inom detta projekt har modelleringssmetoden Random Forest använts med hjälp av verktyget randomForest i statistikprogrammet R (R Core Team 2014). Random Forest är en klassificeringsalgoritm (Breiman 2001) som bygger ett stort antal klassificeringsträd som vägs samman till ett slutresultat. För att utföra en validering av modellerna delades observationerna från responsvariabeln i två delar där 70 % av observationerna användes till träning av modellen och 30 % till validering av modellen. Metodiken för att ta fram kartor genom modellering utvecklades inom två Interreg-projekt där SGU bl.a. samarbetade med GTK. SGU avser att fortsätta arbetet med att genom modellering ta fram kartor som visar var det finns risk att sur sulfatjord förekommer.

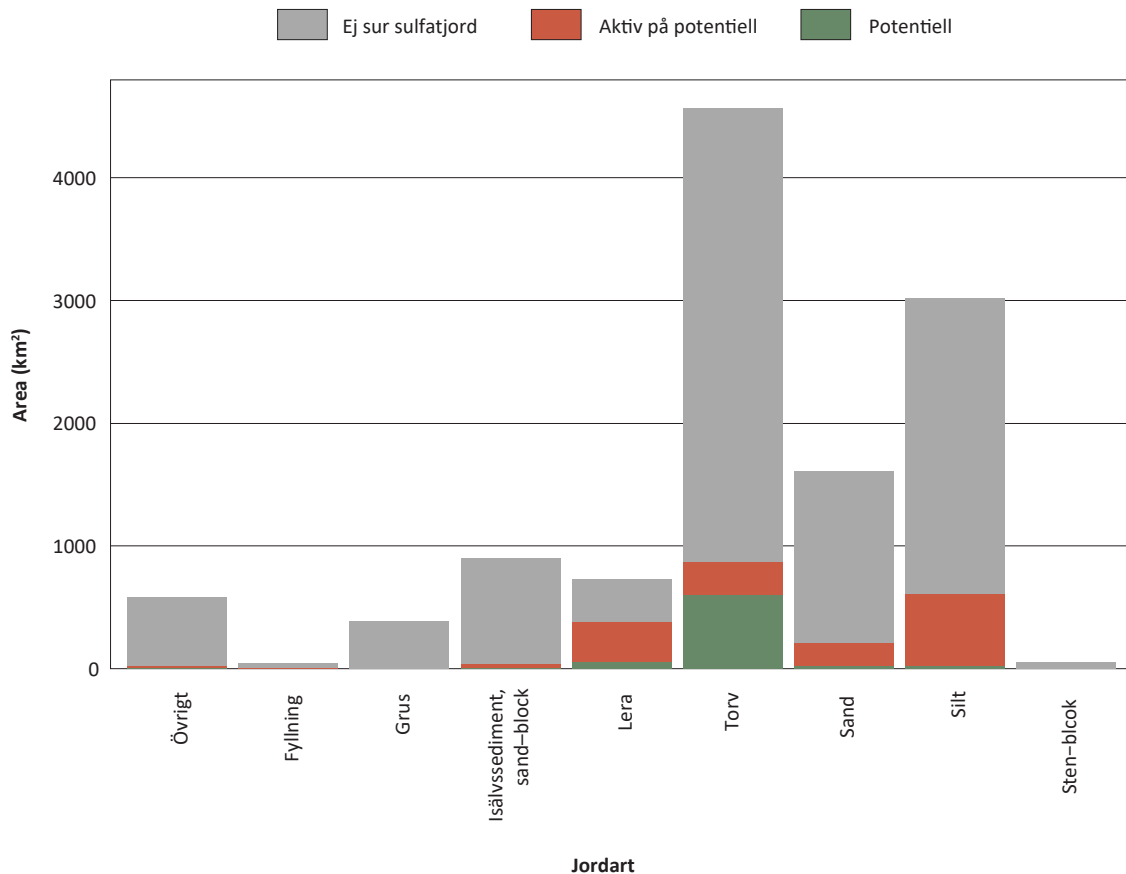


Figur 4. Svenska områden kring norra Bottenhavet där det är sannolikt att sur sulfatjord förekommer. Varje pixel/plats i landområden under Littorinagränsen har tilldelats den klass som med högst sannolikhet finns på platsen utifrån den numeriska modelleringen.



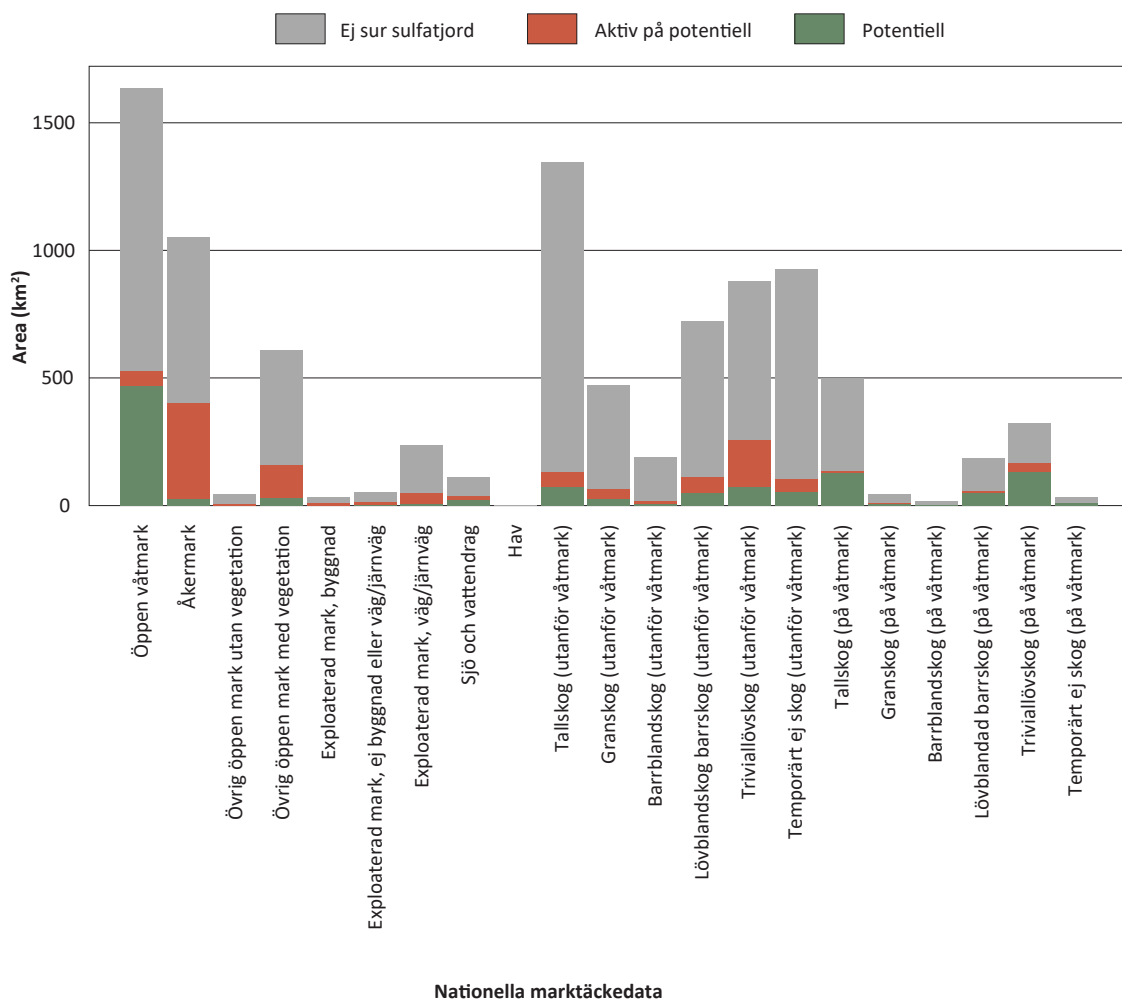
Figur 5. Fördelningen av de tre klasserna: Ej sur sulfatjord, Aktiv på potentiell och Potentiell, i förhållande till höjd över havet.

områden med sura sulfatjordar i större utsträckning odlats upp i kustområdena vilket lett till att aktiv sur sulfatjord bildats. Aktiv sur sulfatjord på potentiell sur sulfatjord förekommer upp till ca 100 m ö.h. (fig. 5). Däremot förekommer mindre områden med potentiell sur sulfatjord ända upp till ca 230 m ö.h., exempelvis i små våtmarker där sulfidjorden överlagras av torv. Aktiv sur sulfatjord på potentiellt sur sulfatjord hittas mestadels på åkermark och i trivialskog som ej är våtmark (fig. 7). Denna typ av skog utgör sannolikt i stor utsträckning områden vilka tidigare varit uppodlade. Potentiell sur sulfatjord hittas mestadels i områden med öppen våtmark och i trivialskog som utgör våtmark (fig. 7).



Figur 6. Fördelningen av de tre klasserna: Ej sur sulfatjord, Aktiv på potentiell och Potentiell, över respektive jordart (enligt SGUs jordartskarta) i det modellerade området.

Modellens tillförlitlighet beror på mängden fältobservationer, upplösningen och kvaliteten av data som används (indata). De parametrar som kommer från höjdmodellen har en mycket hög kvalitet eftersom den baseras på täta mätningar som utförts överallt i modellområdet. Annan geografisk information, så som jordartskartan, baseras däremot i stor omfattning på tolkningar och har därför en lägre kvalitet och geografisk noggrannhet. Syftet med de fältarbeten SGU genomfört har varit att undersöka sur sulfatjord kopplat till postglaciala finsediment och därför har fältobservationer framförallt utförts i områden där sådana jordar förekommer. Torv inkluderas i modelleringen då den ofta underlagras av finsediment, medan morän, tunt jordtäck, vatten och berg har exkluderats ur analysen. I det modellerade området under den högsta postglaciala marina gränsen har ca 1 000 observationer använts som indata från en yta på 14 209 km². Jordartskartan är en viktig parameter men eftersom jordartskartan är en generalisering av verkligheten och gränserna inte är exakta stämmer inte provpunkternas klass i fält och i jordartskartan alltid överens. Tillförlitligheten hos modellen varierar också mellan olika jordarter och typer av markanvändning. Det är exempelvis hög sannolikhet att aktiv sur sulfatjord förekommer inom de stora flacka områdena med dikad och uppodlad postglacial lera och silt som förekommer nära kusten, vilket också framgår av den modellerade kartan. Det är däremot svårare att förutsäga i vilken utsträckning potentiell sur sulfatjord förekommer under andra, yngre jordarter såsom torv och sand. Exempelvis kan vissa torvmarker i ett område underlagras av potentiell sur sulfatjord medan andra torvmarker inte underlagras av sådana material. Vidare kan vissa reducerade (syrefria) sandjordar utgöras av



Figur 7. Fördelningen av de tre klasserna: Ej sur sulfatjord, Aktiv på potentiell och Potentiell, över vegetationstyper enligt Nationella marktäckedata (Naturvårdsverket 2019) i de modellerade områdena.

potentiell sur sulfatjord medan andra sandjordar inte utgör potentiell sur sulfatjord. Modellen har dock endast i undantagsfall indikerat att det är sannolikt att områden med sand utgörs av sur sulfatjord.

Enligt den modellerade kartan finns aktiv sur sulfatjord i vissa flacka områden som enligt jordartskartan utgör isälvs sediment. Dessa områden har dock inte ingått i dokumentationen av sur sulfatjord och det går därför inte att bedöma om sur sulfatjord förekommer. De har antagligen modellerats som sannolik sur sulfatjord eftersom de har liknande topografiska egenskaper som de finkorniga jordar där dessa sura jordar är vanligt förekommande.

HUR KÄNNER MAN IGEN SUR SULFATJORD?

Eftersom aktiv sur sulfatjord kan påverka miljön negativt är det viktigt att identifiera områden där sådan jord kan eller har bildats. Detta för att undvika en markanvändning som leder till att ytterligare aktiv sur sulfatjord bildas, samt för att identifiera områden där det kan vara lämpligt att sätta in åtgärder för att minska miljöpåverkan från sådan jord. Flera svenska studier (Fromm 1965, Sohlenius & Öborn 2004, Sohlenius m.fl. 2015) har därför varit inriktade på

att bestämma egenskaper och förekomster av aktiv och potentiell sur sulfatjord. I Finland har GTK i fält dokumenterat områden där sur sulfatjord förekommer och i Sverige har delvis samma metodik använts. SGU och GTK har därför nu utvecklat en metodik och ett klassificeringssystem tillsammans för att säkerställa att klassificeringen och karteringen av sur sulfatjord utförs på samma sätt i båda länderna. Som nämnts ovan finns de jordar som dokumenterats med denna metodik främst inom vissa kustnära avrinningsområden i Västerbotten och Norrbotten. Vidare finns det även motsvarande observationer från andra områden längs Norrlandskusten samt från några platser i södra Sverige.

Många gånger kan aktiv och potentiell sur sulfatjord kännas igen direkt i fält (Sohlenius m.fl. 2015, Pousette 2007). Sulfidhaltig potentiell sur sulfatjord har ofta en svart eller mörkgrå färg (fig. 8). I många fall kännetecknas sulfidjorden av svarta band eller en grå färg (fig. 9 och 10). Det förekommer dock svartfläckiga jordar med låga svavelhalter som inte blir sura efter oxidation, och således inte klassas som potentiellt sura. Vidare finns det, framförallt i



Figur 8. Sulfidhaltiga svarta sediment är vanliga längs Norrlandskusten. Efter att ha exponerats för luft under ett par timmar bleknar de och pH sjunker markant och de kan därför klassificeras som potentiell sur sulfatjord. Foto: Gustav Sohlenius, SGU.



Figur 9. Gråa sulfidhaltiga sediment från lokalen Ersmark i Västerbotten (undersökt av Sohlenius m.fl. 2015). Hela profilen ner till ett djup av 180 cm såg ut på detta sätt, och ett prov med pH 6,9 i fält uppvisade efter oxidation i laboratorium ett pH på 3,7, och klassificeras därför som potentiell sur sulfatjord. Foto: SGU.

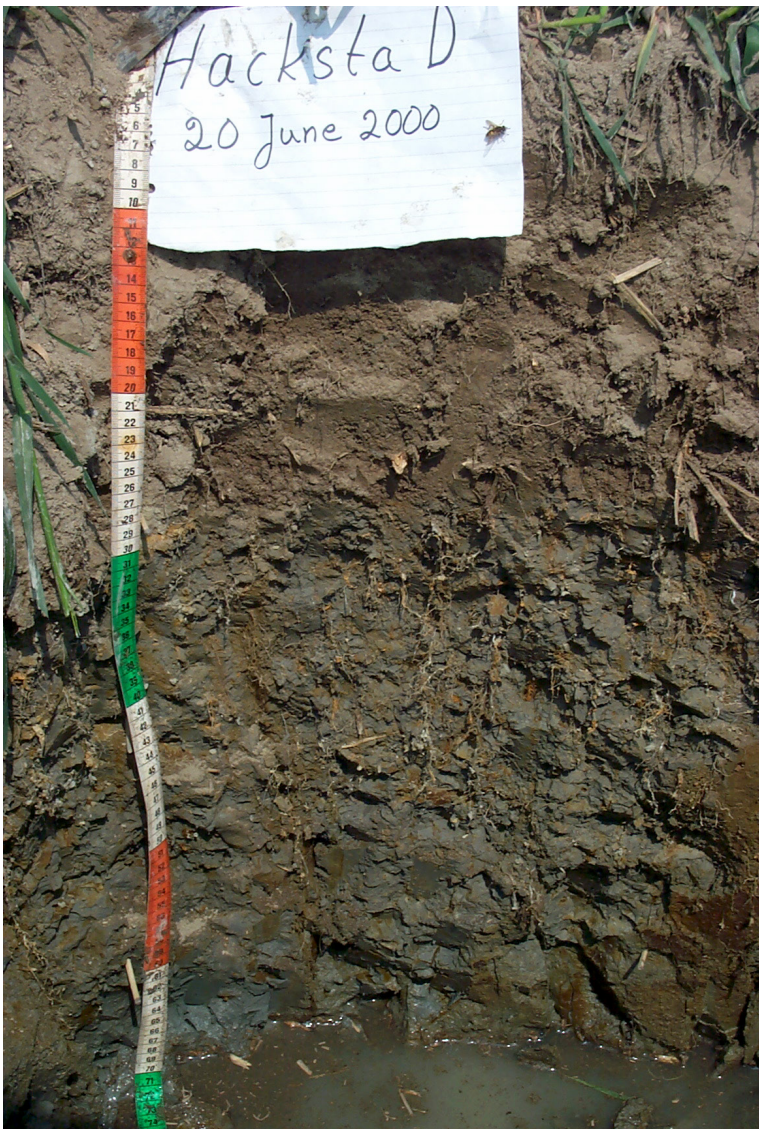


Figur 10. Sulfidbandad potentiell sur sulfatjord från lokalen Stockarsmyren i Norrbotten (innehåller 0,6 % svavel). Foto: SGU.

södra Sverige, sulfidhaltig potentiell sur sulfatjord som inte uppvisar den svarta eller mörkgrå färgen (fig. 11). Många gånger kan sulfidhaltig jord kännas igen eftersom den har en lukt som påminner om ruttet ägg. Oftast innehåller de sulfidhaltiga jordarna en eller ett par procent organiskt material, vilket ibland ger jorden en grönaktig färg. I de fall sjösediment är sulfidhaltiga är halten organiskt material betydligt högre, vilket påverkar jordarnas fysikaliska egenskaper och de har exempelvis en betydligt lägre densitet jämfört med minerogena jordar. Det finns även vissa sandjordar vilka utgör potentiell sur sulfatjord (Mattbäck m.fl. 2017). Dessa innehåller dock mycket låga halter av sulfidmineral och organiskt material och kan, även om de ibland karaktäriseras av en mörkt grå färg, vara svåra att känna igen visuellt i fält. De kan dock vara möjliga att identifiera genom den karaktäristiska lukten av ruttet ägg. De kännetecknas dock av att pH sjunker kraftigt om de oxiderar. Det finns kalkhaltiga sulfidhaltiga jordar som förekommer i södra Sverige och som inte karaktäriseras av att pH sjunker vid oxidation (Lax & Sohlenius 2006), de klassificeras följaktligen inte som potentiell sur sulfatjord. Dessa jordar innehåller tillräckligt med kalk för att buffra den försurning som uppstår då sulfidmineralen oxiderar. Ibland är det möjligt att se rester av snäck- och musselskal i dessa

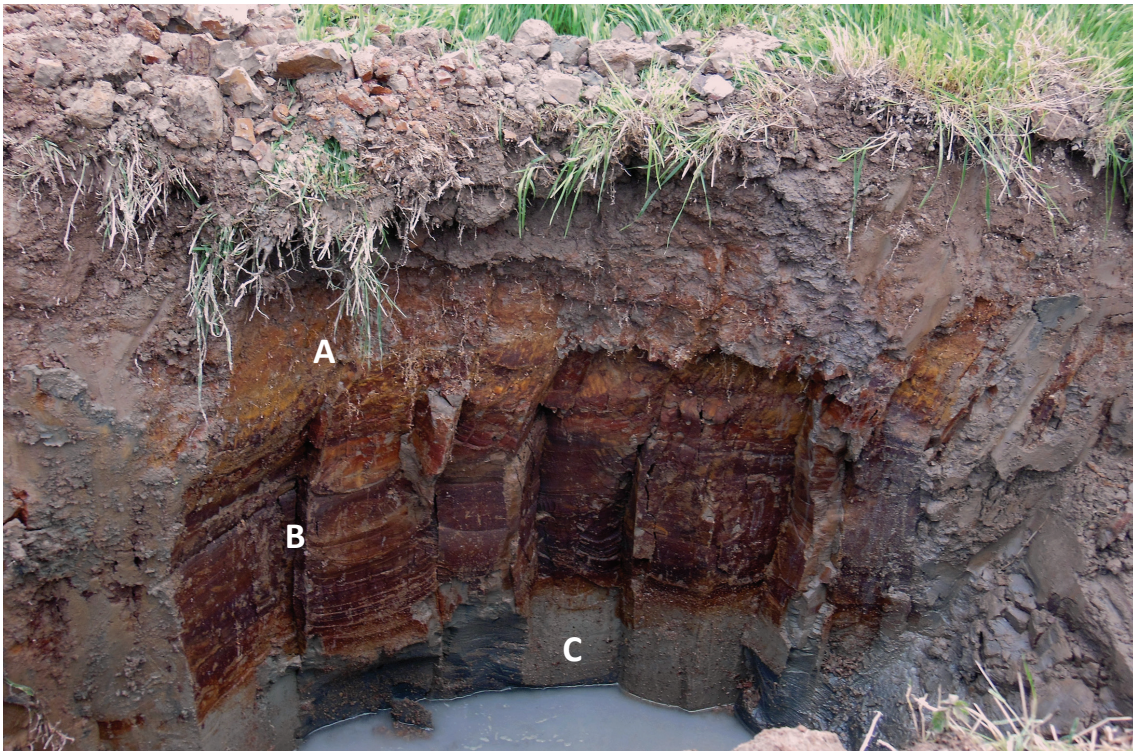


Figur 11. Sulfidhaltig gyttjehaltig jord (potentiell sur sulfatjord) provtagen nära Mälaren (undersökt av Sohlenius & Öborn 2004). Dessa sediment har ofta en svagt grönaktig färgton. I södra Sverige karakteriseras sällan potentiell sur sulfatjord av den svart färg som ofta är ett kännetecken längs Norrlandskusten. Orsaken är att jordarna i norra Sverige färgas svarta av monosulfider (FeS). Längre söderut dominerar jordarna istället av pyrit (FeS_2) vilket inte färgar jorden svart.
Foto: Gustav Sohlenius, SGU.



Figur 12. Aktiv sur sulfatjord i ett område med lergyttja nära Mälaren. I södra Sverige kännetecknas aktiv sur sulfatjord ofta av högre lerhalt och inte lika markanta spricksystem som i norra Sverige. Dock finns spricksystem med rikligt förekommande järnutfällningar även här. Just denna profil beskrivs närmare i en artikel av Sohlenius & Öborn (2004).
Foto: Gustav Sohlenius, SGU.

kalkhaltiga sulfidjordar. Aktiv sur sulfatjord kännetecknas ofta av rikligt förekommande rostutfällningar och en mycket uppsprucken jord (fig. 12 och 13). Ibland förekommer det ljusgula sulfatmineralet jarosit som endast faller ut vid pH-värden lägre än 3,7 (van Breemen 1973) (fig. 14). Ibland är det möjligt att i diken som finns i anslutning till aktiv sur sulfatjord hitta belägg för att sådan jord förekommer i närområdet. Många gånger kännetecknas dessa av rikliga förekomster av järnutfällningar (fig. 15), eller så kan det sura vattnet i diket vara väldigt klart eftersom suspenderade finpartiklar i vattnet flockulerat (klumpat ihop sig) och sjunkit till botten (fig. 16). Ibland förekommer aluminiumutfällningar i vattnet vilket ger det en mjölkaktig karaktär (fig. 17). Detta beror på att aluminium faller ut då pH stiger i samband med att surt markvatten blandas med vatten med högre pH.



Figur 13. Aktiv sur sulfatjord som underlagras av potentiell sur sulfatjord. Bilden är tagen på jordbruksmark i Djäkneboda, ca 30 km nordöst om Umeå i Västerbotten (undersökt av Sohlenius m.fl. 2015). **A.** Den övre delen av den aktivt sura sulfatjorden har en mer grymig karaktär än underliggande oxiderad jord vilket sannolikt är en följd av frostprocesser. **B.** Den undre delen av den aktivt sura sulfatjorden kännetecknas av markanta spricksystem med hög genomsläpplighet för vatten. **C.** Under den rostfärgade sura sulfatjorden syns, strax ovanför grundvattenytan, de svartgrå sulfidhaltiga sedimenten, vilka klassificerats som potentiell sur sulfatjord. Notera att den svartgrå färgen snabbt oxideras och blir ljusgrå vid kontakt med luft. Grundvattenytan ligger på denna lokal en dryg meter under markytan. Mätningar av pH i jord provtaget ovan grundvattenytan (**A** och **B** i bilden) låg mellan pH 3,3 och 4, medan mätningar vid och under grundvattenytan (**C**) låg mellan pH 4,4 och 6,2. Efter oxidation hade pH för ett prov taget på 140 cm djup sjunkit från 6,2 till 2,8. Det låga pH-värdet visar att jorden försurats som en följd av att sulfid-mineral helt eller delvis oxiderat. Foto: Gustav Sohlenius, SGU.



Figur 14. Aktiv sur sulfatjord kännetecknas ofta av rost-beklädda sprickor (rostfärgade fällningar) och ibland även jarosit (ljusgula fällningar).

Foto: Christian Öhrling, SGU.



Figur 15. Rostutfällningar i ett dike som ligger i ett område i Västerbotten där det finns aktiv sur sulfatjord i direkt anslutning till diket.

Foto: Gustav Sohlenius, SGU.



Figur 16. I vissa fall är vattnen i områden med sur sulfatjord kristallklart. Vattnets låga pH gör att suspenderat material flockulerar och sjunker till botten. Bilden kommer från ett område med sur sulfatjord i närheten av Vasa i Finland.

Foto: Gustav Sohlenius, SGU.



Figur 17. Aluminiumutfällningar i ett vattendrag nära Mälaren. När det sura vattnet från aktiv sur sulfatjord möter dikesvattnet, som har ett högre pH, faller aluminiumhydroxider ut. Området med sur sulfatjord är invallat och har torrlagts genom att vatten pumpas ut. I bakgrunden syns en pumpstation.

Foto: Gustav Sohlenius, SGU.

Metod för undersökning av sur sulfatjord

Provtagningslokaler väljs ut så att provtagningsplatsen ligger minst ca 20 m från dike och minst 20 m från åker-, skogs- och våtmarkskant. Jordprofiler borrar upp med hjälp av en förlängningsbar Edelmannborr, som ger en kärna uppdelad i knappt 20 cm långa delar och som är ca 5 cm i diameter. Proven placeras på marken utmed en tumstock och pH mäts med en pH/konduktivitetmätare (fig. 18). I regel mäts pH var 10:e cm. pH-värdet antecknas tillsammans med jordart och färg längs jordkärnan, förekomster av t.ex. järnutfällningar, mineralet jarosit eller sulfidutfällningar noteras. De jordar som i fält har pH under 4 klassificeras i de flesta fall som aktiv sur sulfatjord. Från utvalda lokaler tas ett antal prover till analyser av svavel, kol, kväve samt ett antal andra grundämnen. Från varje lokal samlas dessutom minst ett jordprov in för pH-mätning efter oxidation. Dessa prover tas primärt från material längst ner i jordprofilen där reducerade förhållanden råder och ett pH-värde över 6 uppmätts. Proverna förvaras i labbet och efter nio veckor mäts pH på nytt med samma instrument (Creeper m.fl. 2012). Syftet med detta är att undersöka om den provtagna jorden utgör potentiellt sur sulfatjord, vilket bestäms genom att fastställa om pH sjunkit när eventuella sulfidmineral oxiderats. Om pH sjunkit till värden under 4 indikerar det att det reducerade provet innehållit sulfidmineral som då de oxiderat gett upphov till sura förhållanden. Om pH sjunkit till under 4 efter nio veckors inkubationstid betraktades analysen som slutförd. Om pH sjunkit markant men ej tillräckligt förlängdes inkubationstiden med 10 veckor eller tills det att pH stabiliserats.



Figur 18. För att få en uppfattning om förhållandena på plats mäts pH direkt på jordprover i fält. Prover från djupare liggande horisonter, som inte exponerats för luft, tas med till laboratoriet för att fastställa om pH sjunker vid oxidation. Foto: Gustav Sohlenius, SGU.

Klassificering av sur sulfatjord

Efter provtagning i fält och pH-mätning i laboratoriet klassificeras jordlagren eller horisonterna på varje provtagningslokal utifrån särskilda pH-kriterier (tabell 1) (Sullivan m.fl. 2010). Lagret definieras dels med utgångspunkt från jordart och dels med utgångspunkt från om lagret är oxiderat eller reducerat (syrefritt) i fält. På vissa lokaler har endast en jordart observerats men profilen har delats upp i två horisonter: en övre oxiderad och en nedre reducerad. På andra lokaler kan det finnas flera jordarter i den övre oxiderade horisonten, vilken då exempelvis kan bestå av lera och sand. Om båda dessa jordarter kan klassificeras som sur sulfatjord kommer hela den oxiderade zonen att klassas som sur sulfatjord. Om endast den ena jordarten kan klassas som sur sulfatjord kommer endast delar av den oxiderade zonen att klassas som sådan. Zonen mellan aktiv sur sulfatjord och potentiell sur sulfatjord benämns övergångszon. Denna zon kännetecknas av att pH stiger markant med djupet. Övergångszonen känns ofta igen genom att de rostutfällningar som är rikligt förekommande i aktiv sur sulfatjord successivt försvinner och jorden övergår till den mörka vanligtvis svarta färg som ofta kännetecknar potentiell sur sulfatjord. I områden som används för jordbruk kännetecknas matjorden av högre pH-värde än underliggande jord vilket då oftast beror på att jorden kalkats för att den ska gå att odla. På samma sätt som den oxiderade jorden kan den reducerade, syrefria, jorden bestå av både jordarter som utgörs av potentiell sur sulfatjord och sådana som inte kan klassas som sådan jord. Potentiell sur sulfatjord klassificeras med utgångspunkt från de pH-värden som uppmätts i laboratorium efter det att proverna oxiderat. I de flesta fall sjunker pH kraftigt i sulfidjordar som exponeras för luft. I vissa områden finns kalkhaltiga sulfidjordar vilka inte blir sura då de oxiderar. Därför används termen potentiell sur sulfatjord endast för sulfidjordar som blir sura då de oxiderat. Detta för att särskilja sulfidjordar som potentiellt kan påverka vattenmiljön negativt från sådana som inte förväntas ha den påverkan.

I tabell 2 redovisas hur lagerklasserna använts för att klassificera de undersökta lokalerna. Denna klassificering har sedan använts för att genom modellering ta fram kartor som visar i vilka geografiska områden det är sannolikt att de olika klasserna förekommer.

Tabell 1. Lagerklasser med beskrivning.

Lagerklass	Beskrivning
Ej sur sulfatjord	Oxiderad horisont där pH vid mätning i fält är > 4
Ej potentiell sur sulfatjord	Reducerad horisont där pH efter oxidation i laboratoriet inte är < 4
Aktiv sur sulfatjord	Oxiderad horisont där pH i fält är < 4 eller i de fall horisonten underlagras av sulfidjord < 4,5
Övergångszon	Horisont i övergången mellan oxiderad och reducerad jord där pH i fält är mellan 4,5 och 6, och efter inkubation i laboratoriet är < 4
Potentiell sur sulfatjord	Reducerad horisont där inkubations-pH i laboratoriet är < 4 och pH i fält > 6

Tabell 2. Lokalklasser med vilka lagerklasser som ingår.

Lokalklass	Lagerklass
Ej sur sulfatjord	Varken "aktiv sur sulfatjord" eller "potentiell sur sulfatjord" förekommer i profilen
Aktiv på potentiell sur sulfatjord	"Aktiv sur sulfatjord" och "potentiell sur sulfatjord" förekommer i profilen
Potentiell sur sulfatjord	Bara "potentiell sur sulfatjord" förekommer i profilen

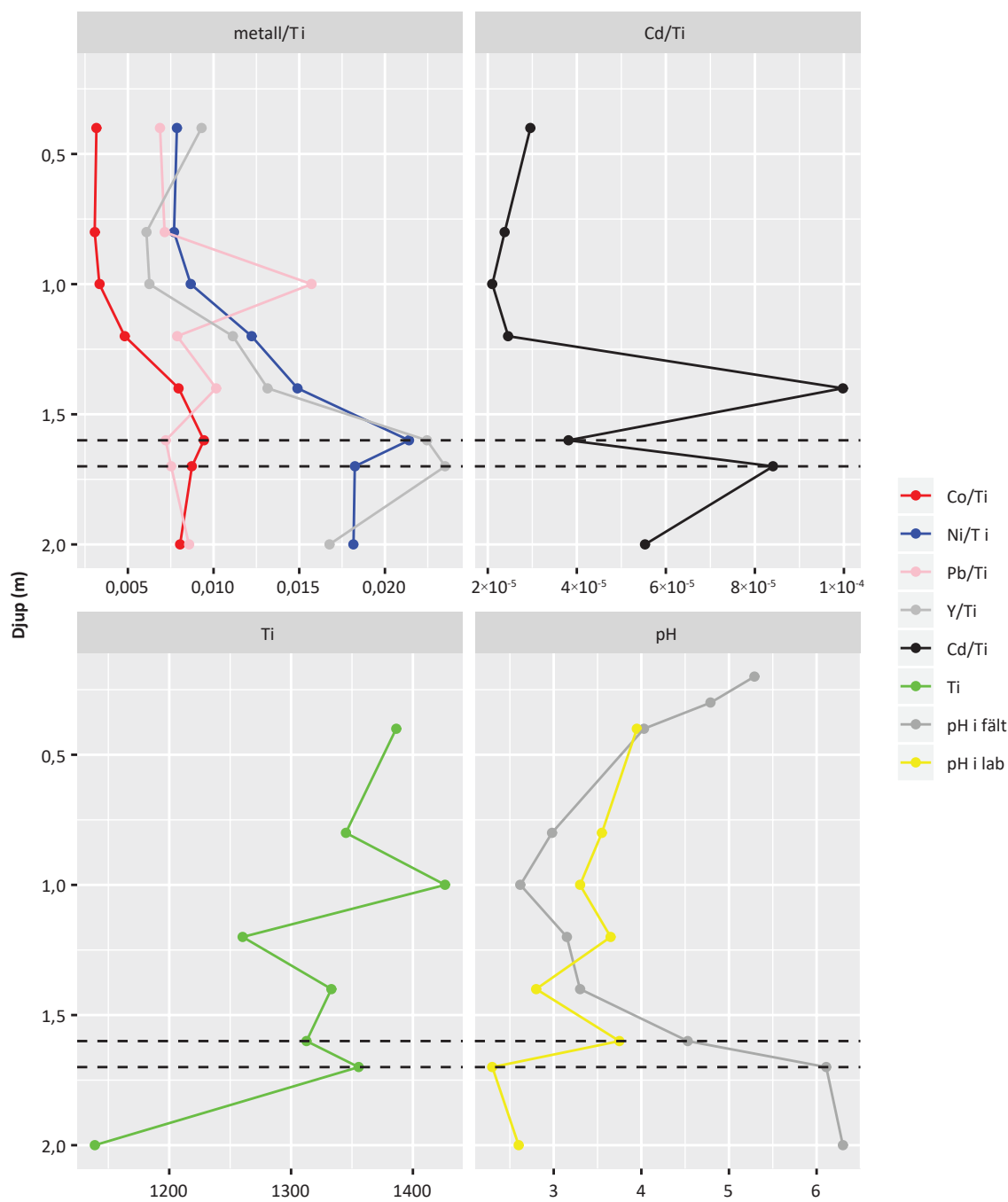
PÅVERKAN PÅ MILJÖN

De sura förhållandena i aktiv sur sulfatjord leder till en kraftig kemisk vittring vilket i sin tur gör att många för miljön skadliga grundämnen frigörs från jordarna. Resultat från kemiska analyser av sur sulfatjord visar att många miljöskadliga grundämnen mobiliseras från områden med aktiv sur sulfatjord. Flera studier från både Sverige och Finland (t.ex. Åström 1997, Sohlenius & Öborn 2004) har visat att halterna av ett stort antal ämnen (t.ex. kobolt, kadmium, nickel och sällsynta jordartsmetaller) är betydligt lägre i aktiv sur sulfatjord än i underliggande reducerad potentiell sur sulfatjord (fig. 19), vilket visar att en mobilisering har skett. Många av de grundämnen som mobiliseras från den sura jorden återfinns i höga koncentrationer i övergången mellan aktiv och potentiell sur sulfatjord (se t.ex. Sohlenius & Öborn 2004, Åström 1997). Det innebär att lättroliga för miljön skadliga ämnen till viss del ännu finns kvar i profilerna. Metallerna i dessa koncentrationstoppar förekommer i en lättlöslig fas och kan därmed lätt lakas ut till omgivande vatten. I Finland har man visat att de sammanlagda utsläppen av vissa metaller (aluminium, kadmium, kobolt, mangan, nickel och zink) från områden med sur sulfatjord är större än hela den finska industrins utsläpp (Sundström m.fl. 2002).

Inom Interreg Nord-projektet i Norrbotten har SGU genom maskininlärning tagit fram kartor vilka visar sannolikheten för att aktiv sur sulfatjord förekommer i tre kustnära avrinningsområden. Enligt den modellen finns i de tre avrinningsområdena 9,8 km² aktiv sur sulfatjord i uppodlade områden. I tabell 3 redovisas resultaten från ett försök att beräkna hur stora mängder av olika grundämnen som kan ha mobiliserats från aktiv sur sulfatjord inom dessa uppodlade områden. I beräkningarna har vi antagit att den aktivt sura jorden där urlakning av metaller skett är en meter mäktig, vilket baseras på resultaten från de kemiska analyserna (t.ex. fig. 19). Det är dock viktigt att påpeka att ämnen som mobiliserats från aktiv sur sulfatjord i viss uträkning kan finnas kvar i marken (i övergångszonen mellan aktiv och potentiell sur sulfatjord), men som nämnts tidigare i en relativt lättlöslig form (se Sohlenius & Öborn 2004). Data från dessa koncentrationstoppar i övergångszoner användes inte för att beräkna medelvärdena för aktiv och potentiell sur sulfatjord och utlakningen kan därför vara överskattad. Även om de värden som redovisas i tabellen kan vara för höga har med all sannolikhet stora mängder av, för organismer, skadliga metaller mobiliserats från aktiv sur sulfatjord till omgivande vatten som en följd av att grundvattenytan i många områden med potentiell sur sulfatjord under det senaste århundradet sänkts. Exempelvis har stora mängder kobolt, nickel och kadmium mobiliserats från jordarna (tabell 3), medan andra för miljön skadliga ämnen inte mobiliserats (t.ex. bly). Resultat från ett examensarbete där koncentrationen av metaller i diken och vattendrag vid sur sulfatjord i kustnära områden i Norrbotten sammanställts visar också att koncentrationerna av kobolt, nickel, kadmium, zink, aluminium och mangan är betydligt högre i dessa vatten jämfört med koncentrationerna i svenska medelvattendrag (Wennström 2017), vilket ytterligare stödjer tolkningen att aktiv sur sulfatjord i detta område är en signifikant källa för dessa ämnen.

Flera studier i både Finland och Sverige har, som ovan nämnts, visat att vattenkvaliteten i avrinningsområden med en hög andel aktiv sur sulfatjord periodvis påverkas negativt (t.ex. Åström & Björklund 1995, Åström 2001a och 2001b, Filppa 2012). Lågt pH och höga metallkoncentrationer kan då påverka många organismer negativt och kan i vissa fall leda till fiskdöd. Öring och mört är exempelvis mycket känsliga för lågt pH i vattenförekomster (t.ex. Milbrink & Johansson 1975, Åberg 2017b). Höga koncentrationer av metaller skapar dessutom ytterligare belastning för akvatiska organismer (Hudd 2000). Det finns exempel i både Sverige och Finland där aktiv sur sulfatjord gjort att fisket i ett vattendrag på kort tid helt slagits ut (Wick-

Sjulsmark



Figur 19. Fördelningen av kobolt (Co), nickel (Ni), bly (Pb), yttrium (Y), titan (Ti) samt pH mätt i fält och på laboratorium i en lerjord från Norrbotten. Lokalen har klassats ha aktiv och potentiell sur sulfatjord. Övre delen av jordprofilen är klassad som aktiv sur sulfatjord (över det övre strecket) och undre delen som potentiell sur sulfidjord (under det undre strecket). Lagret mellan de två strecken har klassats som övergångszon. Halterna för de redovisade grundämnena har dividerat med halten titan (Ti). Detta eftersom titan kan betraktas som ett stabilt ämne som inte påverkas av den kraftiga vittringen i den aktiva sura sulfatjorden.

Tabell 3. Medelhalterna av en rad metaller i aktiv och potentiell sur sulfatjord i jordbruksmark (9,8 km²) från tre kustnära avrinningsområden i Norrbotten. Skillnaderna i halter mellan de två lagren har använts för att beräkna hur mycket av dessa metaller som mobiliserats från aktiv sur sulfatjord.

Grundämne	Aktiv sur sulfatjord			Potentiell sur sulfatjord			Ton utlakat från de tre avrinningsområdena
	Antal	Medel (mg/kg)	Standardavvikelse	Antal	Medel (mg/kg)	Standardavvikelse	
Krom (Cr)	39	32,1	8,72	25	33,2	6,0	17
Kobolt (Co)	39	4,18	1,56	25	9,71	2,69	84
Nickel (Ni)	39	9,95	2,91	25	20,0	4,6	152
Koppar (Cu)	39	14,0	8,4	25	18,6	4,4	69
Zink (Zn)	39	32,3	10,2	25	58,6	8,90	400
Kadmium (Cd)	39	0,074	0,171	25	0,109	0,033	0,5
Bly (Pb)	39	8,61	4,00	25	8,32	1,30	-4
Magnesium (Mg)	39	4 340	1 090	25	6 830	940	38 000
Aluminium (Al)	39	9 530	2110	25	12 100	2 020	39 000
Kalium (K)	39	2 580	774	25	3 310	463	11 000
Kalcium (Ca)	39	2 060	426	25	4 360	534	35 000
Titan (Ti)	39	1 160	195	25	1 210	106	760
Mangan (Mn)	39	163	50	25	618	293	6 900
Järn (Fe)	39	32 900	13 200	25	37 300	6 160	67 000
Yttrium (Y)	39	11,3	5,85	25	34,0	8,2	340
Lantan (La)	39	26,0	15,1	25	37,3	9,7	170
Cerium (Ce)	39	47,8	23,1	25	67,4	12,4	298

ström 1939, 1940, Byrsten & Sandberg 2005). De höga koncentrationerna av vissa metaller i vattendragen har även förorsakat höga halter av dessa metaller i bäckvattenväxter (Lax 2005). Resultat från undersökningar i Finland visar att sediment i vikar utanför områden med aktiv sur sulfatjord kan innehålla höga halter av metaller (Nordmyr m.fl. 2008). Det finns även studier som visar att vissa grödor i områden med aktiv sur sulfatjord innehåller höga halter av flera metaller (Palko 1986, Fältmarsch m.fl. 2008). Det finns dock inga belägg för att detta påverkar människors hälsa negativt, även om det inte kan uteslutas. Eftersom sur sulfatjord förekommer i landskapets lågpunkter, vilka utgör utströmningsområden för grundvattnet, påverkar denna jord i första hand ytvattnen negativt även om det inte kan uteslutas att även grundvattnets kvalitet skulle kunna påverkas negativt.

I vilken utsträckning ett vattendrag kan förväntas påverkas av aktiv sur sulfatjord beror till stor del på hur stor andel av avrinningsområdet som utgörs av sådan jord. I Sverige finns flera relativt stora älvar med avrinningsområden som sträcker sig hela vägen upp till fjällkedjan, och de kustnära områdena där sur sulfatjord förekommer utgör då endast en liten andel av avrinningsområdenas yta. Det gör att vattnet från de sura jordarna späds ut och påverkan på vattnets kvalitet är liten. Biflöden till de stora älvarna med en stor andel sur sulfatjord i avrinningsområdena kan dock vara påverkade. Dessutom finns som nämnts ovan mer kustnära mindre avrinningsområden vilka helt eller till största delen är belägna under den högsta

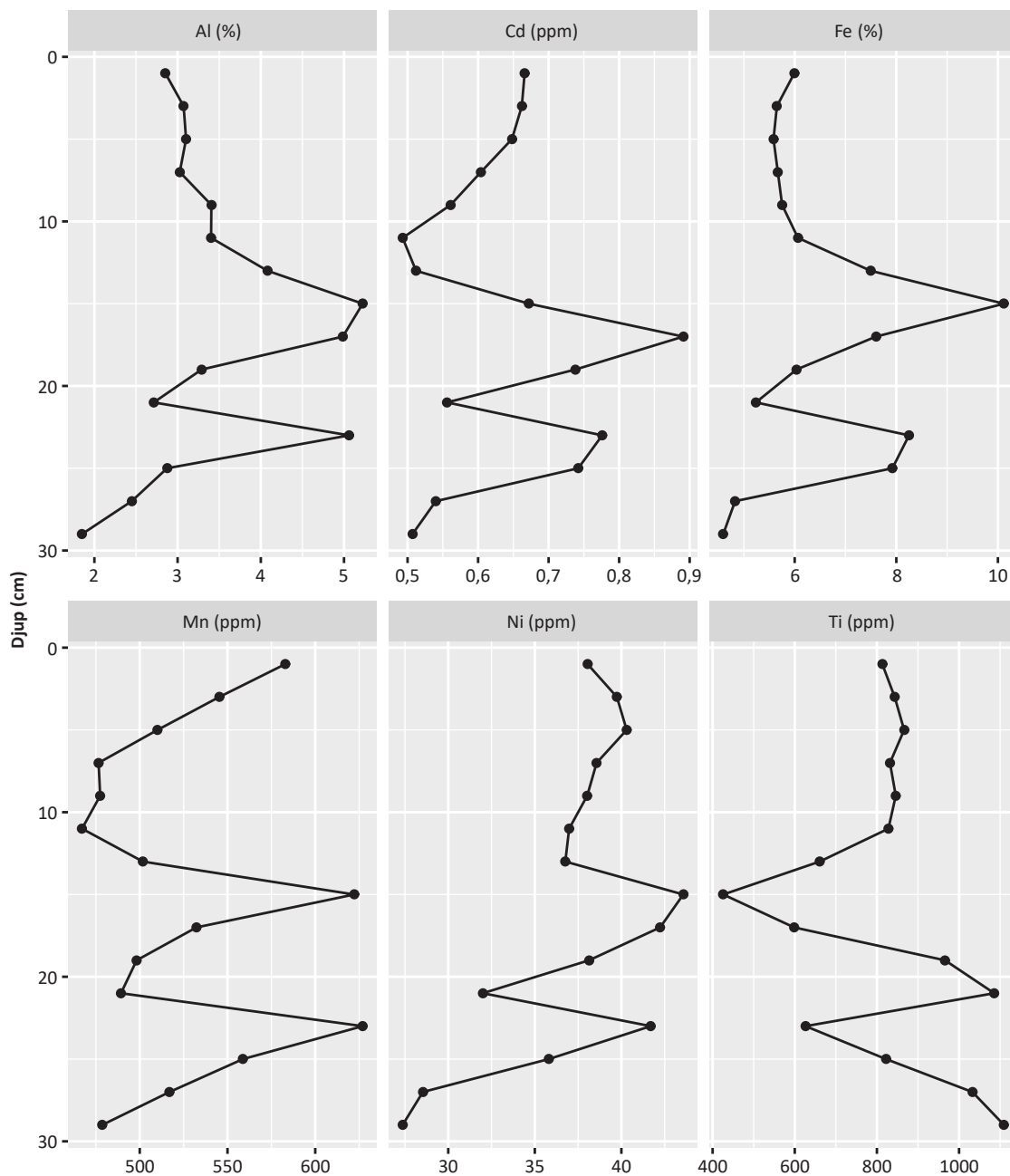
kustlinjen och därmed kan ha en stor andel sur sulfatjord i avrinningsområdet. De kustnära avrinningsområden som undersökts inom Interreg-projekten är exempel på detta. I Finland finns en större andel avrinningsområden vilka till största delen är belägna kustnära där sur sulfatjord förekommer. Detta är sannolikt en orsak till att problem med sur sulfatjord uppmärksammats i större utsträckning på den finska sidan. Det är främst i norra Sverige som problemet med surstötter uppmärksammats, medan problemet inte är känt från de områden runt Mälaren där sur sulfatjord förekommer. Det är möjligt att vattnen i det området är mer välbuffrade eftersom sur sulfatjord där ofta omges av områden med andra leror med betydligt högre pH. Även i södra Sverige kännetecknas dock vattendrag i områden med aktiv sur sulfatjord av höga halter av vissa metaller (Lax 2005).

Risken för att vattnets kvalitet påverkas negativt är troligen störst strax efter det att markavvattningen ägt rum. I Västerbotten slogs exempelvis många fiskarter helt ut i samband med stora markavvattningsföretag under början av 1900-talet. Många av dessa fiskarter har idag åter etablerat sig (Åberg 2017a). Det finns därför skäl att anta att risken för allvarliga surstötter avtar med tiden och eftersom det idag är sällsynt med nya markavvattningsföretag är troligen den negativa påverkan från aktiv sur sulfatjord mindre än tidigare. Det finns dock exempel som visar att vatten i dikade områden med aktiv sur sulfatjord även idag är kraftigt påverkade (Öhlander m.fl.2013, Wennström 2017).

Studier från Finland har visat att de grundämnen som mobiliseras från aktiv sur sulfatjord till stor del ackumuleras i sediment som avsatts utanför mynningen på vattendrag vilka är påverkade av sådan jord (Nordmyr m.fl. 2008, Nystrand m.fl. 2016). Undersökningar i Rosåns avrinningsområde i Norrbotten visar att grundämnen som mobiliseras från sur sulfatjord till viss del blir fast i sjösediment i anslutning till vattendraget (fig. 20) istället för att helt transporteras ut med vattendraget till havet (Lindström 2017). Sjösedimenten kännetecknas delvis av höga halter av vissa grundämnen som mobiliseras från sur sulfatjord (Fe, Al, sällsynta jordartsmetaller m.m.). De högsta halterna uppmättes i enskilda prover som också kännetecknas av höga halter av organiskt material. Det går dock inte att från den undersökningen avgöra hur stor andel av metallerna som ackumuleras i sedimenten och hur stor andel som eventuellt transporteras längre ut i Östersjön. För vissa grundämnen är det också svårt att avgöra om de förhöjda halterna är en effekt av påverkan från sur sulfatjord. En studie från Persöfjärden strax norr om Luleå visar att under vissa perioder kännetecknas vattnet av lågt pH varvid organiskt material flockuleras tillsammans med järn och sjunker till botten (Erixon 2009). Detta leder till att vattnet blir mycket klart. På samma sätt har perioder med mycket klart, surt vatten observerats i Rosån (Erixon 2009). Processen som beskrivs av Erixon (2009) kan alltså förklara de toppar med hög organisk halt och höga halter av bl.a. Al och Fe som förekommer i sjösediment i anslutning till Rosån. Dessa surstötter sker under perioder då en låg grundvattenyta, som förorsakat sulfidoxidation i överliggande jord, följs av en period med höga flöden varvid surt metallrikt vatten kan mobiliseras från jordarna.

Även om vissa grundämnen förekommer i relativt höga halter i sjösedimenten från Norrbotten är halterna av alla ämnen som mobiliseras från sur sulfatjord långt ifrån lika höga som de som påträffas på den finska sidan (t.ex. Nordmyr 2008). I en studie av sediment utanför mynningen till Hertsångerälven i Västerbottens län påträffades inte höga halter av några av de metaller som mobiliseras från aktiv sur sulfatjord (Thomas 2016). För att fastställa hur effektivt metaller från sur sulfatjord fastnar i sjö- och kustsediment skulle därför ytterligare undersökningar av sediment från fler avrinningsområden med aktiv sur sulfatjord behövas.

Övre träsket



Figur 20. Fördelningen av aluminium (Al), kadmium (Cd), järn (Fe), mangan (Mn), nickel (Ni) och titan (Ti) från olika sedimentdjup i sjön Övre träsket i Rosåns avrinningsområde i Norrbotten. Halterna av järn (Fe) och aluminium (Al) redovisas som procent i torrsvikt, medan övriga halter redovisas som ppm, dvs. mg/kg. Sediment med höga halter av t.ex. aluminium och järn har troligen avsatts under perioder med lågt pH och höga metallkoncentrationer.

Åtgärder för att minska miljöpåverkan från sur sulfatjord

Aktiv sur sulfatjord har bildats då grundvattenytan sänkts på platser som i många fall naturligt skulle utgöras av våtmarker. Genom att återskapa våtmarker på sådana platser bör det finnas förutsättning att minska utflödet av surt vatten från den oxiderade jorden samt att på sikt återskapa reducerande förhållanden i marken. Eftersom många områden med aktiv sur sulfatjord utgörs av jordbruksmark eller produktiv skogsmark har de ett ekonomiskt värde för de som äger marken. Det finns dock dikade områden som inte är produktiva, exempelvis övergiven jordbruksmark. I sådana områden bör förutsättningarna för att återskapa våtmarker vara bättre. Ett annat sätt att minska miljöpåverkan från aktiv sur sulfatjord är att genom reglerad dränering se till att grundvattenytan hålls uppe under perioder med torka. Syftet med den åtgärden är att undvika att ytterligare potentiellt sur sulfatjord exponeras för luft. Det görs idag både försök med att i områden med aktiv sur sulfatjord återställa våtmark och att installera reglerad dränering i jordbruksområden med sådan jord. I Västerbotten och Norrbotten har inom ovan nämnda Interreg-projekt en våtmark återställts (Västerbotten) och en jordbruksmark med reglerad dränering installerats (Norrbotten). Dessa försök har dock endast pågått under en kort tid och det går därför ännu inte att avgöra om de lett till en minskad påverkan från aktiv sur sulfatjord. I Finland pågår sedan flera år försök med att genom reglerad dränering minska miljöpåverkan från aktiv sur sulfatjord. Där testas dessutom metoder där finkornig kalk injiceras i aktiv sur sulfatjord. Resultaten visar att kalken leder till att pH stiger i jorden vilket ger förutsättning för en minskad miljöbelastning (Högfors-Rönholm m.fl. 2018). För att kunna genomföra sådana åtgärder i större skala krävs det dock sannolikt någon sorts system med bidrag till markägarna. I texten nedan diskuteras möjliga åtgärder ytterligare.

I Sverige har Trafikverket testat flera metoder vilka syftar till att undvika negativ miljöpåverkan från schaktmassor som uppstår i samband med grävningar i sur sulfatjord. Resultat från dessa tester visar att det genom att tillsätta organiskt material och skapa reducerade förhållanden kan vara möjligt att höja pH i aktiv sur sulfatjord (Bergknut 2017). Dessa resultat baseras dock på relativt få prover där svavelhalten låg under en procent. Trafikverket har även testat att stabilisera sur sulfatjord med finkornig kalk (Trafikverket 2018). Även resultaten från dessa försök indikerar att det är möjligt att undvika negativ påverkan från jordarna.

För att aktiv sur sulfatjord inte ska nybildas kan åtgärder sättas in så att potentiell sur sulfatjord inte oxiderar. I områden där torvmarker dikats finns en risk att underliggande potentiell sur sulfatjord oxiderar då torvlagren sjunker ihop som en följd av avvattningen. För att undvika detta är det viktigt att se till att diken inte fördjupas ytterligare, speciellt i områden som ligger i anslutning till mindre vattendrag där vattnets kvalitet kan komma att påverkas av ytterligare oxidation.

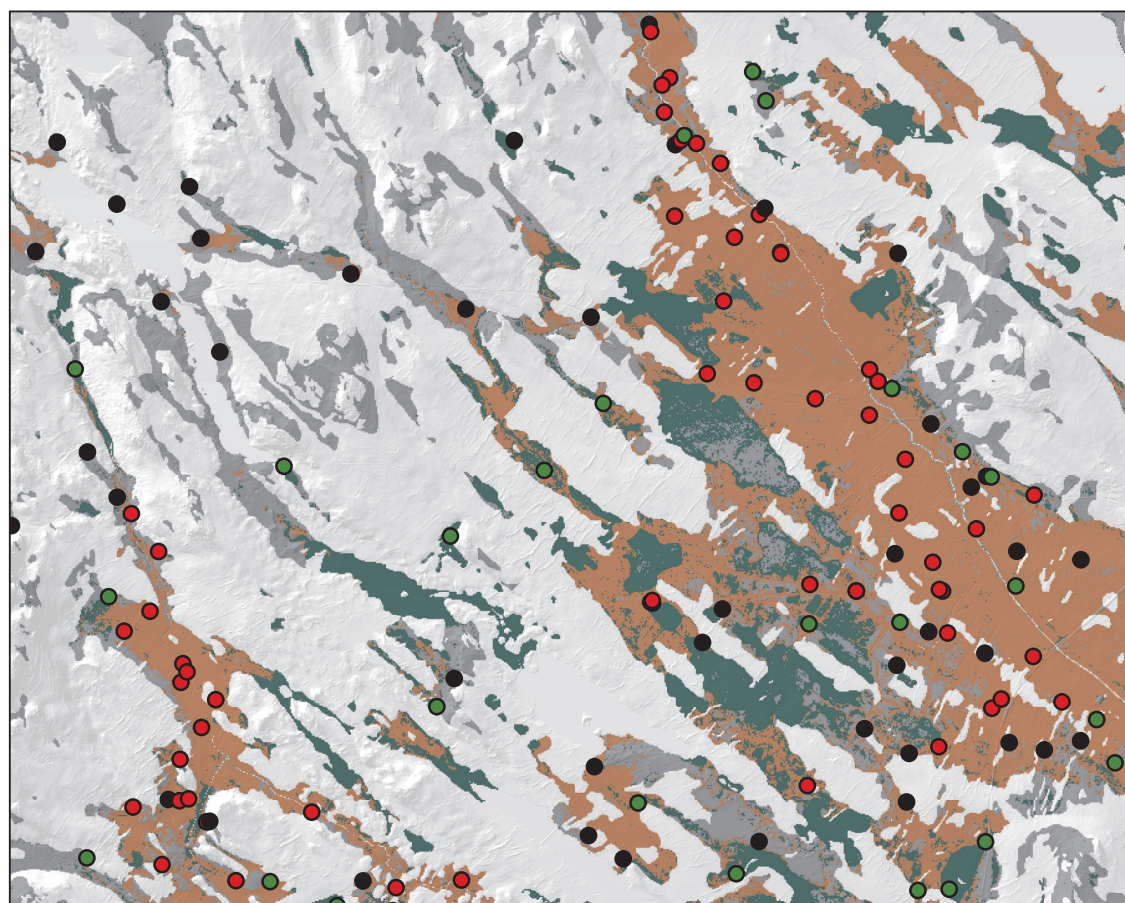
HANDLEDNING

I detta avsnitt ges förslag på ett arbetssätt som kan användas för att först identifiera områden där det finns risk för att sur sulfatjord förekommer, för att sedan på plats undersöka om det förekommer och om dessa riskerar att påverka miljön negativt vid en förändrad markanvändning.

1. Finns det risk att aktiv eller potentiell sur sulfatjord förekommer i ett område?

Studera kartan som visar områden där det är sannolikt att sur sulfatjord förekommer. Även annan geografisk information, så som jordartskartor, Lantmäteriets höjdmodell och kartor som visar marktäckedata kan användas för att få en uppfattning om områdets karaktär.

Karta som visar förutsättningar för sur sulfatjord (SGU): Kontrollera om det aktuella området ligger i ett område där det är sannolikt att aktiv och/eller potentiell sur sulfatjord förekommer (fig. 21). Visar kartorna att sådan jord kan förekomma finns det anledning att



Provlokaler

- Ej sur sulfatjord
- Aktiv på potentiell
- Potentiell

Modellerad sannolik klass

- Ej sur sulfatjord
- Aktiv på potentiell
- Potentiell

0 6 km



Figur 21. Område vid Ersnäs, Norrbotten, med modellerad förekomst av de tre klasserna: Ej sur sulfatjord, Aktiv på potentiell och Potentiell samt punkter med provlokaler undersökta i fält och laboratorium med respektive klass.

titta närmare på området. Det är dock viktigt att komma ihåg att kartan är en modell och att det i många områden saknas verifierade observationer som visar om sur sulfatjord förekommer eller inte. Även om det enligt kartan inte är sannolikt att sådan jord förekommer i ett visst område betyder det inte att det helt kan uteslutas. Det betyder istället att det är större sannolikhet att det inte finns sur sulfatjord där än att det finns. På samma sätt gäller det områden som utpekats som sur sulfatjord. I sådana områden är det istället större sannolikhet att där finns sur sulfatjord än att det inte finns sådan jord.

Jordartskartan (SGU): I områden vilka på jordartskartan redovisas som lera eller silt kan aktiv sur sulfatjord ha bildats. I områden som på jordartskartan redovisas som torv, älv sediment eller postglacial sand kan det finnas lera och silt under dessa jordar. Sådana finkorniga jordar kan utgöra sur sulfatjord, men då ofta potentiell sur sulfatjord eftersom ovanliggande jord skyddar jorden från att oxidera. På många platser påträffas potentiell sur sulfatjord under flera meter av andra jordarter så som älv sediment eller torv. I vissa fall kan även torv- och sandjordar utgöra sura sulfatjordar, men sådana jordars påverkan på miljön är sannolikt av mindre betydelse. De ler- och siltjordar som utgör sur sulfatjord innehåller ofta organiskt material (gyttja) men eftersom lergyttja/gyttjelera inte särskiljs från silt-lera på nuvarande jordartskartor i norra Sverige är det intressant att titta på alla ler- och siltjordar. I södra Sverige är dock ofta gyttjejordarna avgränsade på jordartskartorna. Använd gärna jordartskartan i kombination med förutsättningskartan som nämns ovan.

Höjdmodellen (Lantmäteriet): Sur sulfatjord förekommer ofta i flacka områden i terrängens lågpunkter (fig. 21). I höjdmodellen syns diken ofta tydligt vilket indikerar att grundvattenytan sänkts artificiellt vilket kan ha lett till att aktiv sur sulfatjord bildats. Notera dock att täckdiken inte syns i höjdmodellen. Områden med sur sulfatjord ligger ofta på relativt låg altitud och aktiv sur sulfatjord förekommer ofta under 65 m ö.h. nivån. I områden där sjöar sänkts och gyttjejordar därmed oxiderat kan dock sur sulfatjord sannolikt förekomma på högre altituder.

Marktäckedata (Naturvårdsverket): Aktiv sur sulfatjord förekommer ofta i områden som används som åkermark eller i områden med dikad skogsmark medan våtmarker kan utgöras av potentiell sur sulfatjord. Åkermark som är belägen i områden med ler- eller siltjordar är ofta mer eller mindre påverkade av dikning. I områden där marköverytan lutar eller undulerar (se höjdmodellen) kan dock dessa jordar i högt belägna områden ha dränerats naturligt i samband med landhöjningen och kan därmed ha neutraliserats med tiden.

Annan information: I SGUs databas "Lagerföljder" finns information från borrhningar och grävningar vilka redovisar om sur sulfatjord/sulfidjord förekommer. I denna databas finns både information från SGUs egen verksamhet och data som samlats in av andra aktörer (t.ex. Trafikverket). Höga halter av vissa ämnen såsom nickel (Ni) och kobolt (Co) i bäckvattenväxter kan indikera att sur sulfatjord förekommer i ett område (Lax 2005). SGUs Biogeokemiska karta kan därför användas för att identifiera vissa områden där det är sannolikt att aktiv sur sulfatjord har bildats. Höga halter av ovan nämnda ämnen kan dock även orsakas av andra faktorer, så som anomalier i berggrunden. Dessutom finns inte prover analyserade från alla mindre vattendrag, vilket gör att det kan finnas områden med aktiv sur sulfatjord som inte framträder i denna karta.

2. Vad kan man göra för undersökningar om man är i ett område där sur sulfatjord kan förväntas förekomma?

För att säkert veta om sur sulfatjord förekommer i ett visst område måste man undersöka förhållandena på den aktuella platsen.

Hur ser terrängen ut? Sur sulfatjord förekommer i terrängens lågpunkter där finkorniga jordar och torv kan förekomma. Sådana områden utgörs ofta av befintliga eller dränerade våtmarker (i vissa fall dränerade sjöar). Ofta utgörs sådana områden av flacka ytor där block och sten inte förekommer på markytan. Figur 2 visar hur det kan se ut i områden där potentiell och aktiv sur sulfatjord förekommer. Den figuren är därför en bra utgångspunkt för att identifiera sådana områden.

Vilken eller vilka jordarter finns i området? Som nämnts ovan förekommer ofta sur sulfatjord i ler- och siltjordar. Ett sätt att bedöma om det förekommer sur sulfatjord på en viss plats är att klassificera jordarna enligt den metodik som redovisas i denna rapport i avsnittet *Hur känner man igen sur sulfatjord?* Komplettera gärna med analyser av svavel för att få en uppfattning om hur mycket sulfidmineral som jorden innehåller. Dock kan sandjordar med låga sulfidhalter bilda aktiv sur sulfatjord eftersom dessa har en mycket låg buffringsförmåga (Mattbäck m.fl. 2017). För potentiell sur sulfatjord finns det även andra metoder för klassificering (t.ex. Pousette 2007). Metoden som beskrivs av Pousette (2007) skiljer sig från den som SGU och GTK använder men vi bedömer att båda metoderna på ett tillfredsställande sätt kan användas för att identifiera sådan jord.

Eftersom det tar tid för proverna att oxidera i labbet så tar det relativt lång tid att få veta om en jord kan klassas som potentiell sur sulfatjord. Det går dock genom att mäta jordens pH i fält direkt, att bestämma om det finns aktiv sur sulfatjord på en plats. Om underliggande jord inte har en helt annan kornstorlekssammansättning är det sannolikt att den utgörs av potentiell sur sulfatjord. Speciellt om jorden är svartfärgad av monosulfider är det mycket sannolikt att den utgörs av potentiell sur sulfatjord. I vissa områden med sand- och lerjordar finns det dock potentiell sur sulfatjord under oxiderad jord som inte utgörs av aktiv sur sulfatjord. I sådana områden är det därför av stor vikt att fastställa om den reducerade jorden under grundvattenytan utgörs av potentiell sur sulfatjord. Om en förändrad markanvändning riskerar att leda till att jorden kommer oxidera ner till stora djup är det viktigt att ta prover från olika djupnivåer för vidare analys. Detta eftersom halten sulfidmineral och jordens buffringsförmåga kan variera mellan olika djupnivåer.

Då det gäller klassificering av sur sulfatjord från södra Sverige finns det inte lika mycket gjort som i norra Sverige men det är tydligt att skillnader finns mellan de två områdena. I södra Sverige är det exempelvis inte lika vanligt att potentiell sur sulfatjord är svartfärgad av monosulfider. Istället är pyrit ofta det dominerande sulfidmineralet. Det är även känt att det i vissa områden i södra Sverige finns sulfidjord med höga svavelhalter som inte är potentiellt sur eftersom den innehåller kalk. Dessutom kan egenskaper för potentiell sur sulfatjord variera lokalt inom ett visst område, vilket framgår av exempelvis undersökningar från Norrbotten (Fromm 1965) där det i samma område finns sulfidjord som är svart bandad och sådan som är helsvart. På samma sätt kan potentiell sur sulfatjord med och utan klak förekomma i samma område (Lax & Sohlenius 2006).

Hur ser diken och vattendrag ut? Utfällningar av rost, aluminium eller bådadera i diken och mindre vattendrag kan indikera att sur sulfatjord förekommer i ett område. I områden där aktiv sur sulfatjord förekommer kan lågt pH och hög elektrisk ledningsförmåga (Åberg

2017b, Myrstener 2012) i dikesvatten indikera förekomsten av sådan jord. De vattenkemiska förhållandena kan dock variera över året, och ett högt pH vid en provtagning behöver därmed inte betyda att ett vatten är opåverkat av aktiv sur sulfatjord. En hög elektrisk ledningsförmåga verkar dock vara en bra indikator för att aktiv sur sulfatjord förekommer i närområdet (Myrstener 2012).

3. Finns det risk att ytterligare aktiv sur sulfatjord kan komma att bildas?

Genom att utvärdera resultaten från ovanstående punkter går det att fastställa om potentiell sur sulfatjord förekommer på en aktuell plats. Om sådan jord förekommer är det viktigt att utvärdera om framtida aktiviteter riskerar att leda till att grundvattenytan sänks och att aktiv sur sulfatjord därmed bildas, och därför bör djupnivån för övergången till potentiell sur sulfatjord bestämmas. I områden med torv kan markavvattningen på sikt leda till att torven oxiderar bort och exponerar underliggande potentiellt sura sulfatjord för luft, vilket kan leda till att aktiv sur sulfatjord bildas. Det är därför viktigt att utvärdera om framtida markanvändning kan leda till att befintliga torvlager oxiderar bort.

Om det planeras för grävarbeten till relativt stora djup i ett område med potentiell sur sulfatjord är det som nämnts ovan viktigt att fastställa hur tjocka lager av potentiellt sur jord som finns på platsen. Detta kan göras genom borrhningar och provtagning med påföljande analys.

Tidigare studier har visat att sulfidhaltig jord har en bättre elektrisk ledningsförmåga än andra finkorniga jordar (Sohlenius m.fl. 2007). Geofysiska metoder kan därför användas för att snabbt få en uppfattning om utbredningen av potentiell sur sulfatjord. Sådana undersökningar måste dock alltid verifieras med resultat från borrhningar.

4. Kan närliggande vattendrag påverkas negativt?

Ligger området med potentiell sur sulfatjord i anslutning till ett vattendrag? Det är störst risk att aktiv sur sulfatjord ska påverka vattnets kvalitet i vattendrag med en hög andel av sådan jord i tillrinningsområdet. Risken för en negativ påverkan (t.ex. perioder med lågt pH) vid oxidation av sulfidjord (potentiell sur sulfatjord) är därför störst i små kustnära avrinningsområden. Det är dock svårt att ange någon nedre gräns för när ett vattendrag riskerar att påverkas negativt. I många områden med aktiv sur sulfatjord är mindre vattendrag redan negativt påverkade och om ytterligare sådan jord bildas kan det givetvis leda till att problemet förvärras. Läckaget av miljöskadliga ämnen såsom kadmium påverkas dock inte av tillrinningsområdets storlek och uppkomsten av aktiv sur sulfatjord kan därför alltid bidra med att tillföra miljöskadliga ämnen till vattendrag, sjöar och hav.

Schaktmassor vid grävarbeten i potentiell sur sulfatjord kan oxidera och därmed bidra till en negativ påverkan på miljön i närliggande vatten vilket exempelvis beskrivs i en rapport av Pousette (2007). I den rapporten redovisas olika alternativ för att minska risken för att schaktmassor vilka utgörs av potentiell sur sulfatjord oxiderar. Ett sätt att undvika att sulfidjord oxiderar är deponering under grundvattenytan. Ett annat sätt kan vara att täcka den potentiellt sura sulfatjorden med andra jordarter och därmed förhindra att den oxiderar. Ofta läggs massorna på deponi men det finns också exempel där potentiell sur sulfatjord täcks med andra jordar och exempelvis används för att skapa bullerskydd vid vägar. Det är dock viktigt att massorna placeras på platser där de inte kan påverka känsliga vattendrag eller grundvatten.

Aktiv sur sulfatjord förekommer främst i områden vilka utgör utströmningsområden för grundvatten. Det är dock möjligt att grundvattnets kvalitet påverkats i områden med aktiv sur sulfatjord vilken ligger i direkt anslutning till grundvattenmagasin. För att minimera den risken är det av speciell vikt att undvika en markanvändning som leder till att aktiv sur sulfatjord bildas i anslutning till sådana magasin.

5. Var kan man sätta in åtgärder för att minska påverkan från sur sulfatjord?

Relativt stor andel av de områden med aktiv sur sulfatjord utgörs av dikad jordbruksmark eller produktiv skogsmark där det inte är möjligt att med bibehållen markanvändning helt åtgärda den negativa påverkan på miljön som sådan jord utgör. Ovanstående tillvägagångssätt skulle dock kunna användas för att identifiera specifika områden där olika åtgärder kan leda till en märkbar minskad miljöpåverkan från aktiv sur sulfatjord, utan omfattande förändringar av befintlig markanvändning. Det som då är viktigt är att hitta områden där aktiv sur sulfatjord har bildats och där åtgärder kan förväntas leda till en positiv påverkan på den nuvarande vattenkvaliteten. Det handlar då om områden som påverkar relativt små vattendrag. Ett sätt att minska påverkan från områden med aktiv sur sulfatjord är att återställa våtmarker. Ett annat sätt är att genom reglerad dränering minska förutsättningarna för oxidation av potentiell sur sulfatjord. Det senare kan göras utan att markanvändningen behöver ändras. Uusi-Kämppe m.fl. (2013) beskriver hur reglerad dränering kan installeras. Då det gäller restaurering av våtmarker är det fördelaktigt om det går att identifiera områden med aktiv sur sulfatjord som utgörs av övergiven jordbruksmark eller lågproduktiv skogsmark. Jämförelser med historiska kartor och flygbilder visar att det både i Västerbotten och Norrbotten finns många områden med aktiv sur sulfatjord som tidigare utgjorts av jordbruksmark men som idag är övergiven. Både i Sverige och Finland pågår som ovan nämnts idag försök där effekterna av olika typer av åtgärder testas. Även om dessa försök inte pågått under tillräckligt lång tid för att möjliggöra en utvärdering är det sannolikt att åtgärder som leder till att grundvattenytan höjs också leder till att påverkan från aktiv sur sulfatjord minskar.

REFERENSER

- Andrén, T., Björck, S., Andrén, E., Conley, D., Zillén, L. & Anjar, J., 2011: The Development of the Baltic Sea Basin During the Last 130 ka. 75–97. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5_4
- Bayard, C. & Mood, L., 2014: Förekomsten av sura sulfatjordar i Mälardalen - en pilotstudie utförd åt SGU. Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper.
- Bergknut, M., 2017: Resultat från projektet ”Testmetodik för behandling av sulfidjord och sur sulfatjord”. *Trafikverket 2016/49825*. Miljötekniskt Center AB. 12 s.
- Boman, A., Åström, M., Fröjdö, S. & Backlund K., 2010: Impact of isostatic land uplift and artificial drainage on oxidation of brackish-water sediments rich in metastable iron sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 1268–1281.
- Breiman, L., 2001: Random Forests. *Machine Learning*, 4, 5–32.
- van Breemen, N., 1973: Acid Soil forming processes in acid sulphate soils. I: Dost, H. (ed.). Proceedings of the International Symposium on Acid Sulphate Soils, 13-20 August 1972. Wageningen, the Netherlands: *ILRI Publication* 18. 66–130.
- Byrsten, S. & Sandberg A., 2005: Metaller och fisk i Persöfjärden. Avd för kvalitets & miljöledning. Examensarbete 2005, Höskoleingenjörsprogrammet, Luleå tekniska universitet. 64 s.
- Creeper, N., Fitzpatrick, R & Shand, P., 2012: A simplified incubation method using chip-trays as incubation vessels to identify sulphidic materials in acid sulphate soils. *Soil Use and Management*, 1-8.
- Erixon, P., 2009: Klimatstyrda sulfidoxidationer som orsak till surhet och höga metallhalter i vattendrag i norra Sverige. Luleå: Luleå tekniska universitet (Forskningsrapport). 72 s.

- Filppa, E., 2012: Identifiering av riskområden där sulfidsediment oxideras till följd av grundvattensänkning – Fallstudie av fem vattendrag vid Norrbottenskusten. *Länsstyrelsens rapportserie nr 11/2012*. Examensarbete i samarbete med Lunds universitet. 61 s.
- Fromm, E., 1965: Beskrivning till jordartskartan över Norrbottens län nedanför lappmarksgränsen. *Sveriges geologiska undersökning Ca 39*, 236 s.
- Fältmarsch, R., Åström, M. & Vuori K.-M., 2008: Environmental risks of metals mobilised from acid sulphate soils in Finland: a literature review. *Boreal Environment research 13*, 444–456.
- Granlund, E., 1943: Beskrivning till jordartskarta över Västerbottens län nedanför odlingsgränsen. *Sveriges geologiska undersökning Ca 26*, 165 s.
- Högfors-Rönholm, E., Christel, S., Dalhem, K., Lillhonga, T., Engblom, S., Österholm, P. & Dopson, M., 2018: Chemical and microbiological evaluation of novel chemical treatment methods for acid sulfate soils. *Science of the Total Environment 625*, 39–49
- Hudd, R. 2000: Springtime Episode Acidification as a Regulatory Factor of Estuary Spawning Fish Recruitment, mars. <<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/22344>> åtkommen 2019-06-03.
- Lantmäteriet, 2019: Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+. 10 s.
- Lambeck, K., 1999: Shoreline displacements in southern-central Sweden and the evolution of the Baltic Sea since the last maximum glaciation. *Journal of the Geological Society, London*. 465–486
- 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. *SGU-rapport 2006:05*. Sveriges geologiska undersökning. 19 s.
- Lindström C., 2017: Acid Sulfate Soils and Metal Accumulation in Sediments in the Rosån Catchment, Northern Sweden. Department of Earth Sciences, Uppsala University. 70 s.
- Länsstyrelsen i Norrbotten, 2014: Förvaltningsplan 2016-2021 Bottenvikens vattendistrikt. Länsstyrelsen i Norrbotten. 135 s.
- Mattbäck, S., Boman, A. & Österholm, P., 2017: Hydrogeochemical impact of coarse-grained post-glacial acid sulfate soil Materials. *Geoderma 308*, 291–301.
- Mäkelä, J., 2013: Pärnänsuo: the characteristics of an organic agricultural land with an acid sulfate subsoil. University of Helsinki. Department of Food and Environmental Sciences. 67 s.
- Milbrink, G. & Johansson, N., 1975: Some effects of acidification on roe of roach, *Rutilus rutilus* L., and perch, *Perca fluviatilis* L. with special reference to the Åvaå lake system in eastern Sweden. Rep. Inst. Freshwater Res. Drottningholm 54: 52–62.
- Myrstener, M., 2012: Konduktivitet i vattendrag som indikator på sura sulfatjordar. Examensarbete i geovetenskap/naturgeografi. Umeå universitet. 18 s.
- Naturvårdsverket, 2019: Nationella marktäckedata 2018 basskikt. 57 s.
- Nordmyr, L., Åström, M. & Peltola P., 2008: Metal pollution of estuarine sediments caused by leaching of acid sulphate soils. *Estuarine, Coastal and Shelf Science 76*, 141–152.
- Nystrand, M., Österholm, P., Yu, C. & Åström, M., 2016: Distribution and speciation of metals, phosphorus, sulfate and organic material in brackish estuary water affected by acid sulfate soils. *Applied Geochemistry 66*, 264–274.
- Palko, J., 1986: Mineral element content of timothy (*Phleum pratense* L.) in an acid sulphate soil area of Tupos village, northern Finland. *Acta Agriculturae Scandinavica 36*, 399–409.

- Pousette, K., 2007: Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor. Luleå tekniska universitet. Institutionen för Samhällsbyggnad. Avdelningen för Geoteknologi. *Teknisk rapport 2007:13*, 38 s.
- R Core Team, 2014: A Language and Environment for Statistical Computing (Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing) (<http://R-project.org>).
- SGU, 2019: Jordlagerföljder – databas. Norrbottens, Västerbottens och Västernorrlands kustområden. 2019-03-01.
- Sohlenius, G. & 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.
- Sohlenius, G., Aroka, N., Wåhlén, H., Uhlbäck, J. & Persson, L., 2015: Sulfidjordar och sura sulfatjordar i Västerbotten och Norrbotten. *SGU-rapport 2015:26*. Sveriges geologiska undersökning.
- Sohlenius, G., Persson, L., Lax, K., Andersson, L. & Daniels, J., 2004: Förekomsten av sulfidhaltiga postglaciala sediment. Slutrapport FoU projekt. *SGU-rapport 2004:09*. Sveriges geologiska undersökning.
- Sohlenius, G., Persson, L. & Bastani, M., 2007: Geofysiska metoder för att identifiera områden med sulfidhaltiga sediment. *SGU-rapport 2007:31*. Sveriges geologiska undersökning.
- Sullivan, L.A., Fitzpatric, R. W., Bush, R.T., Burton, E. D., Shand, P. & Ward, N. J., 2010: The classification of acid sulfate soil materials: further modifications. *Southern Cross GeoScience Technical Report No. 310*. Southern Cross University, Lismore, NSW, Australia.
- Sundström, R., Åström, M. & Österholm, P., 2002: Comparison of the metal content in acid sulphate soil runoff and industrial effluents in Finland. *Environmental Science & Technology* 36, 4269–4272.
- Thomas, J., 2016: Inverkan av dikning av sulfidjordar på metallkoncentrationer i havssediment. En studie av hur metallhalten i havssediment i Gumbodafjärden (Norra Sverige) har förändrats över tid. Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap (EMG) Umeå Universitet. 30.
- Trafikverket, 2018: PM – Tester av sulfidjord i stor skala. *Trafikverket 2017/115461*.
- Uusi-Kämpä, J., Virtanen, S., Rosendahl, R., Österholm, P., Mäensivu, M., Westberg, V., Regina, K., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Edén, P. & Turtola, E., 2013: Minskning av miljörisker orsakade av sura sulfatjordar - Handbok för reglering av grundvattennivån. *MTT Raportti 89*, LUKE (Naturresursinstitutet). Finland.
- Wennström, S., 2017: Förekomst av metaller i diken och vattendrag vid sura sulfatjordar i kustnära områden i Norrbotten: Examensarbete Linnéuniversitetet. 27 s.
- Wickström, L., 1939: Västerbotten 1939: *Västerbottens läns hembygdsförenings årsbok 20*. Nyheternas tryckeri Umeå. 260 s.
- Wickström, L., 1940: Västerbotten 1940: *Västerbottens läns hembygdsförenings årsbok 21*. Nyheternas tryckeri Umeå. 200 s.
- Åberg, J., 2017a: Miljöproblemet sura sulfatjordar Ett kunskapsunderlag och en beskrivning av Länsstyrelsen Västerbottens och Länsstyrelsen Norrbottens strategiska arbete. Länsstyrelsen Västerbotten. 43 s.
- Åberg, J., 2017b: Sulfatjordspåverkan i kustmynnande småvattendrag i Västerbotten – tolkningar av nuläget med hjälp av en kemisk bedömningsmodell och provfiske. Länsstyrelsen Västerbotten. 41 s.

- Åbjörnsson, K., Stenberg, M & Sohlenius, G., 2018: Järn- och aluminiumurlakningar från invallningar – en undersökning av tre områden i Skåne. På uppdrag av Länsstyrelsen Skåne.
- Åström, M., 1997: Partitioning of transition metals in oxidised and reduced zones of sulphide-bearing fine-grained sediments. *Applied Geochemistry* 5, 607–617.
- Åström, M., 2001a: Abundance and fractionation patterns of rare earth elements in streams affected by acid sulphate soils. *Chemical Geology* 175, 249–258.
- Åström, M., 2001b: The effect of acid soil leaching on trace element abundance in a medium-sized stream, W. Finland. *Applied Geochemistry* 16, 387–396.
- Åström, M. & 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 s.
- Öhlander, B., Nordblad, F., Lax, K., Frauhe, E. & Ingri, J., 2013: Biogeochemical mapping of stream plants to trace acid sulphate soils: a comparison between water geochemistry and metal content in macrophytes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. <http://dx.doi.org/10.1144/geochem2013-206>
- Österholm, P. & Åström, M., 2002: Spatial trends and losses of major and trace elements in agricultural acid sulphate soils distributed in the artificially drained Rintala area, W. Finland. *Applied Geochemistry* 17, 1209–1218.