

Sura sulfatjordar i Sverige

Ny kunskap och underlag för åtgärder

Mats Åström, Gustav Sohlenius,
Alexandra Nyman, Anders Johnson,
Sina Shahabi Ghahfarokhi,
Changxun Yu, Mark Dopson

RAPPORT 7150 | JUNI 2024



Sura sulfatjordar i Sverige

Ny kunskap och underlag för åtgärder

av Mats Åström, Linnéuniversitetet
Gustav Sohlenius, Sveriges geologiska undersökning
Alexandra Nyman, Linnéuniversitetet
Anders Johnson, Linnéuniversitetet
Sina Shahabi Ghahfarokhi, Linnéuniversitetet
Changxun Yu, Linnéuniversitetet
Mark Dopson, Linnéuniversitetet

NATURVÅRDSVERKET

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-7150-9

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2024

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2024

Omslagsfoto: Mats Åström



Förord

Här presenteras resultaten från forskningsprojektet "Sura sulfatjordar i Sverige". Projektet är ett av åtta projekt som genomförts inom forskningssatsningen Våtmarkers ekosystemtjänster.

Med forskningsområdet ville Naturvårdsverket och Havs- och vattenmyndigheten stödja forskning som kunde stärka möjligheterna att på bästa sätt restaurera och anlägga våtmarker i landskapet för att skapa så stor nytta som möjligt för ekosystemen och samhället. Projektet har finansierats med medel från Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag.

Rapporten har skrivits av Mats Åström, Linnéuniversitetet, Gustav Sohlenius, Sveriges geologiska undersökning, och Alexandra Nyman, Anders Johnson, Sina Shahabi Ghahfarokhi, Changxun Yu och Mark Dopson, alla från Linnéuniversitetet.

Rapporten har granskats för vetenskaplig kvalitet av Sarah Conrad (Luleå tekniska universitet) samt för praktisk relevans av Jenny Lonnstad (Naturvårdsverket).

Författarna svarar för rapportens innehåll.

Stockholm i juni 2024

Marie Uhrwing
Avdelningschef, Hållbarhetsavdelningen

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	5
Summary	7
1. Inledning	9
2. Projektresultat	10
2.1 Förekomst och utbredning av sura sulfatjordar i Sverige	10
2.2 Historiska och framtida läckage av grundämnen från sura sulfatjordar	13
2.3 Aciditet och vattenlösliga grundämnen i sura sulfatjordar	15
2.4 Mikrobiologin i sura sulfatjordar	17
2.5 Återvätning av sur sulfatjord: inverkan på järnhydroxider och pH	19
2.6 Återvätning av sur sulfatjord: frisättning och läckage av järn och toxiska spårämnen	20
2.7 Inverkan av sur sulfatjord på närliggande våtmark	22
2.8 Al-baserad undersökning av sur sulfatjord kring sjön Hjälmarenen	24
2.9 Åtgärder för att minska läckaget från sura sulfatjordar	26
2.10 Restaurering av sur sulfatjord till våtmark: risker och rekommendationer	32
2.11 Framtida behov	32
Källhänvisning	33

Sammanfattning

Målsättningen med projektet har varit att öka kunskapen om sura sulfatjordars utbredning och karaktär i Sverige. De viktigaste resultaten är:

- Sura sulfatjordar har en betydligt större förekomst och är framförallt betydligt surare och svavelrikare i sydöstra och södra Sverige än vad som tidigare varit känt, medan däremot förekomsten kring Vänern är liten. Norröver (Västerbotten, Norrbotten) är förekomsten hög, vilket varit känt sedan tidigare.
- Den nationella karteringen som gjordes i studien baserades på gles provtagning, vilket var vad projektets omfattning tillät. Detta innebär emellertid att för mellan- och sydsverige finns ännu ingen detaljkarta över förekomst av sura sulfatjordar. För att kunna genomföra en sådan kartering så effektivt och fort som möjligt, vilket det finns behov av, testades en ny karteringsteknik i ett valt område (väster om sjön Hjälmaren). Tekniken, som gav positiva resultat, genomfördes med maskininlärning och baserades på helikopterburna resistivitetsmätningar, höjddata (Lantmäteriet), nationella marktäckedata (Naturvårdsverket) och SGU:s jordartskarta. Den testades via fältundersökningar och har potential att genomföras på större områden.
- Med avseende på pH, aciditet samt totalhalter, syralösliga (1M HCl-lakning) halter och vattenlösliga halter av grundämnen är de sura sulfatjordarna relativt likadana runt om i landet med tanke på de rätt stora regionala variationer som förekommer i temperatur, paleosedimentationsmiljöer och markanvändningen. Denna förhållandevis homogena geokemiska karaktär underlättar förståelsen av hur de sura sulfatjordarna fungerar i termer av bland annat historiska, nutida och framtida effekter (försurning och metallbelastning) på miljön. Den förenklar också planering av åtgärder för att minska syra och metalläckage från dessa jordar, och bedömning av vad som är att förvänta vid återskapande av våtmarker på dessa jordar. På lokal nivå kan skillnaderna emellertid vara stora, t.ex. kan i den reducerade zonen där svavelhalten normalt är kring 1 % vara så hög som 5–7 % med avsevärd potentiellt ökad risk för miljön.
- En betydande övergripande regional fysikalisk-kemisk skillnad finns däremot på så vis att i norr har de sura sulfatjordarna ett betydligt tjockare surt skikt (median 75 cm) än de i söder (median 40 cm). En av konsekvenserna är att de sydliga sura sulfatjordarna sannolikt är mer känsliga för framtida sänkningar i grundvattennivån, d.v.s. det finns större potential för ytterligare omfattande syrabildning och metallfrisättning till följd av grundvattensänkningar förorsakade av långa torrperioder eller effektiviserad dränering.
- Även de mikrobiella samhällena i den sura sulfatjorden är delvis annorlunda i norr än i söder. Till exempel, det finns en högre relativ förekomst av Ktedonobacteraceae i de norra delarna och Gallionellaceae i södra delarna av landet. Dessa skillnader är med största sannolikhet kopplade till temperaturskillnaderna mellan norr och söder, inklusive djup och tidsmässig längd av frost i marken. Kunskap om mer exakt vilka skillnaderna är mellan den mikrobiella aktiviteten i söder och norr kommer att belysas av en pågående mer ingående "omics" studie där fokus är på de kemiska reaktioner som mikroberna bidrar till att ske eller påskynda.

- Återvätning av sura sulfatjordar kan åstadkomma positiva miljöeffekter. Detta gäller särskilt när den sekundära järnmineralogin (bildad efter att den sura sulfatjorden uppstått) domineras av schwertmannit och ferrihydrit, vilka mikrober under reducerande förhållanden relativt enkelt förmår bryta ner (reducera) vilket leder till en förhöjning av pH. Det, i sin tur, leder till att ett flertal metaller som blir toxiska redan vid relativt låga halter, såsom kadmium, nickel, mangan och beryllium, kommer att fastläggs istället för att läcka till närmiljön.
- Återvätning av sura sulfatjordar kan också skapa negativa miljöeffekter. Detta kan ske i form av ökad mobilisering och läckage av spårämnen som arsenik, krom och uran, men i första hand av ökad frisättning och rörlighet av tvåvärt järn. Den sura sulfatjorden har ett exceptionellt stort förråd av järn som kan bidra till detta, bundet i de sekundära mineralen schwertmannit, jarosit och ferrihydrit. I nästan 20 % av de undersökta sura sulfatjordarna motsvarar detta förråd >2,0 % av hela den sura oxiderade zonens torrsvikt, vilket är anmärkningsvärt högt. Det finns därför anledning till oro över vad de stora mängder järn som potentiellt kan frigöras skulle ha på våtmarken i sig på och vattensystem nedströms restaureringen.
- Sura sulfatjordar förekommer främst i låglänta områden som återfinns under den högsta kustlinjen. Det finns därför risk att metaller som läcker från dessa jordar hamnar i våtmarker, som likaledes förekommer i dessa områden. Detta har skett på ett omfattande sätt på en plats som undersökts i södra Sverige där framförallt järn fällts ut och påverkat både floran och faunan i våtmarken. Detta är ett fenomen att vara uppmärksam på i områden med sur sulfatjord, utöver den mer välkända påverkan i form av försurning och metallkontaminering av vattendrag.
- Det finns ett antal metoder som utvecklats, framförallt i Finland, för att minska läckage av syra och metaller från sura sulfatjordar under åkermark. På basen av genomgången litteratur och diskussioner med relevanta aktörer, bedöms den bästa metoden vara en kombination av teknikerna reglerbar dränering, underbevattning och injicering av kalkstenssuspension via täckdikningssystem. Denna teknikkombination förväntas leda till: (i) minskad oxidation och högre pH i jordarna, (ii) minskat läckage av syra och metaller till närmiljön, och (iii) positiva effekter på skörden på åkrarna (bör dock undersökas mer systematiskt) och kan därför ge en vinn-vinn situation. Ytterligare rekommenderas undersökning av möjligheter med och effekter av kalkfilterdiken.
- Att förhindra en sänkning av grundvattenytan i sura sulfatjordar är den viktigaste preventiva åtgärden både på kort och lång sikt. Detta är i sig ingen ny slutsats, men projektet har tagit fram data som mer exakt visar vad som kommer att ske i termer av bildning av aciditet och frisättning av metaller när grundvattennivån når djupare ner i den sura sulfatjordens underliggande reducerade och pH-neutrala grundvattenzon. Redan en sänkning ner i övergångszonen, d.v.s. den zon som ligger strax under det sura skiktet och där pH stiger snabbt, kommer frigöra avsevärda mängder aciditet och metaller med känd giftighet.

Summary

The goal of the project has been to increase knowledge about the distribution and characteristics of acid sulfate soils in Sweden. The most important results are:

- Acid sulfate soils have a significantly greater occurrence and are notably more acidic and sulfur-rich in southeastern and southern Sweden than previously known, whereas their occurrence around Lake Vänern is small. Moving northward (Västerbotten, Norrbotten), the occurrence is high, as previously known.
- The national mapping conducted in the study was based on low-density sampling, which was within the project's scope. However, this means that there is currently no detailed map of the occurrence of acid sulfate soils for central and southern Sweden. In order to carry out such mapping as efficiently and quickly as possible, which is necessary, a new mapping technique was tested in a selected area (west of Lake Hjälmaren). The technique, which yielded positive results, was implemented using machine learning and based on helicopter-borne resistivity measurements, elevation data (from the National Land Survey of Sweden), national land cover data (from the Swedish Environmental Protection Agency), and the Geological Survey of Sweden's soil map. It was tested through field investigations and has the potential to be applied to larger areas.
- Regarding pH, acidity, as well as total, acid-soluble (1M HCl extraction) and water-soluble concentrations of elements, acid sulfate soils are relatively similar throughout the country considering the fairly large regional variations in temperature, paleo-sedimentary environments, and land use. This relatively homogeneous geochemical character facilitates understanding of how acid sulfate soils function in terms of historical, contemporary, and future effects (acidification and metal loading) on the environment. It also simplifies the planning of measures to reduce acid and metal leakage from these soils, and the assessment of what to expect when restoring wetlands on these soils. However, at the local level, differences can be significant; for example, in the reduced zone where sulfur content is normally around 1 %, it can be as high as 5–7 %, with a significantly increased potential environmental risk.
- A significant overall regional physicochemical difference exists in that, in the north, acid sulfate soils have a much thicker acidic layer (median 75 cm) than those in the south (median 40 cm). One consequence is that southern acid sulfate soils are likely more sensitive to future lowering of the groundwater level, meaning there is a greater potential for further extensive acid formation and metal release due to groundwater lowering caused by prolonged dry periods or intensified drainage.
- The microbial communities in acid sulfate soils are also partly different in the north compared to the south. For example, there is a higher relative occurrence of Ktedonobacteraceae in the northern parts and Gallionellaceae in the southern parts of the country. These differences are most likely linked to temperature differences between the north and south, including the depth and duration of frost in the soil. More precise knowledge of the differences in microbial activity between the south and north will be elucidated by an ongoing more detailed "omics" study focusing on the chemical reactions that microbes contribute to or accelerate.

- Rewetting of acid sulfate soils can have positive environmental effects, especially when the secondary iron mineralogy (formed after the formation of the acid sulfate soil) is dominated by schwertmannite and ferrihydrite, which microbes under reducing conditions can relatively easily break down (reduce), leading to an increase in pH. This, in turn, leads to the immobilization of several metals that become toxic even at relatively low concentrations, such as cadmium, nickel, manganese, and beryllium, instead of leaking into the surrounding environment.
- Rewetting of acid sulfate soils can also create negative environmental effects, such as increased mobilization and leakage of trace elements such as arsenic, chromium, and uranium, but primarily increased release and mobility of divalent iron. Acid sulfate soil has an exceptionally large reservoir of iron that can contribute to this, bound in the secondary minerals schwertmannite, jarosite, and ferrihydrite. In nearly 20 % of the examined acid sulfate soils, this reservoir corresponds to >2.0 % of the dry weight of the entire acidic oxidized zone, which is remarkably high. Therefore, there is concern about the potential impact of the large amounts of iron that could potentially be released on the wetland itself and downstream water systems after restoration.
- Acid sulfate soils mainly occur in low-lying areas found below the highest coastline. Therefore, there is a risk that metals leaking from these soils end up in wetlands, which also occur in these areas. This has occurred extensively at a site investigated in southern Sweden, where iron in particular has been deposited and affected both the flora and fauna in the wetland. This is a phenomenon to be aware of in areas with acid sulfate soils, in addition to the more well-known impacts in the form of acidification and metal contamination of watercourses.
- There are a number of methods developed, primarily in Finland, to reduce the leakage of acid and metals from acid sulfate soils in agricultural land. Based on the reviewed literature and discussions with relevant stakeholders, the best method is judged to be a combination of controlled drainage, subirrigation, and injection of limestone suspension via the drainpipe systems. This combination of techniques is expected to result in: (i) reduced oxidation and higher pH in the soils, (ii) reduced leakage of acid and metals into the surrounding environment, and (iii) positive effects on crop yields in the fields (although this should be investigated more systematically) and can therefore create a win-win situation. Further investigation into the possibilities and effects of lime-filter drains is also recommended.
- Preventing a lowering of the groundwater table in acid sulfate soils is the most important preventive measure both in the short and long term. This is not a new conclusion in itself, but the project has provided data that more precisely shows what will happen in terms of acid formation and metal release when the groundwater level reaches deeper into the underlying reduced and pH-neutral groundwater zone of the acid sulfate soil. Even a lowering into the transition zone, i.e., the zone just below the acidic layer where pH rises rapidly, will release significant amounts of acidity and metals with known toxicity.

1. Inledning

Sur sulfatjord är en jordmån som ger en stark negativ miljöpåverkan. Orsaken är att den är sur och att detta vidare leder till att metaller såsom aluminium, mangan, nickel, kadmium och beryllium frigörs från mineral i den sura miljön. Både surheten och metallerna sprids lätt till omgivningen vilket leder till märkbara negativa effekter på omgivande vattenförekomster, akvatiska ekologiska system, botten-sediment och kan även drabba marker som översvämmas. I denna jordmån finns en stor mängd potentiell surhet bunden i naturlig förekommande svavelmineral, men frigörelsen av denna potentiella surhet och med den sammanhängande metall-frisättning sker först efter att jordlager avvattnas, vilket till största delen skett genom dräneringsaktivitet inom jordbruket, skogsbruket och infrastrukturbyggnation. I norra delarna av landet genomför Sveriges geologiska undersökning omfattande och detaljerade karteringsarbeten, och lokalt runtom i Sverige har ett antal studier av sura sulfatjordar gjorts. Trots detta finns fortfarande betydande kunskapsluckor kring de sura sulfatjordarna i landet. Dessa innefattar bristfällig eller ingen kunskap om de sura sulfatjordarnas: (i) förekomst och utbredning i mellersta och södra delarna av landet, (ii) geokemiska karaktär, inklusive redan urlakade och potentiellt lakningsbara metallmängder, i olika delar av landet, (iii) reaktivitet och omvandling vid återvätning vilka hypotetiskt kan leda till negativa effekter på närmiljön, och (iv) mikrobiologisk sammansättning och hur denna samspelar med de geokemiska processerna vilket sammantaget leder till syrabildning och metallfrisättning. Därutöver är kunskapen nästan obefintlig gällande vilka åtgärder som är mest lämpliga och effektivaste i termer av att minska endera produktioner av syran i jordmånen och/eller minska läckaget av syra och metaller från jordmånen till vattenförekomster. Detta projekt har bidragit till att öka kunskapen kring dessa frågor och kunskapsluckor. Nedan följer en sammanfattning av de viktigaste resultaten och hur de kan användas av intressenter i samhället samt var detaljer (resultat och data) är publicerade.

2. Projektresultat

2.1 Förekomst och utbredning av sura sulfatjordar i Sverige

Sammanfattning av resultaten

En första nationell kartering av sur sulfatjord i Sverige genomfördes via ett omfattande fältarbete. Fokus var på områden som varit under högsta kustlinjen eftersom sur sulfatjord i huvudsak utvecklas i finkorniga sediment i områden där landet varit täckt av vatten efter senaste istid. Strategin utgick från nationella jordartskartor som finns tillgängliga på Sveriges geologiska undersöknings (SGU) web-sidor. På dessa kartor identifierades primärt områden med gyttjelera och, ifall sådana inte fanns, områden med postglacial lera och i några fall silt, gyttja eller sand. Eftersom områden med finkorniga jordar, som var huvudfokus, ofta gjorts till jordbruksmark som därtill är lättillgängliga, gjordes provtagningen vanligen på sådana marker, enligt Figur 1. Totalt ingick 126 platser runtom i landet i studien (Figur 2).

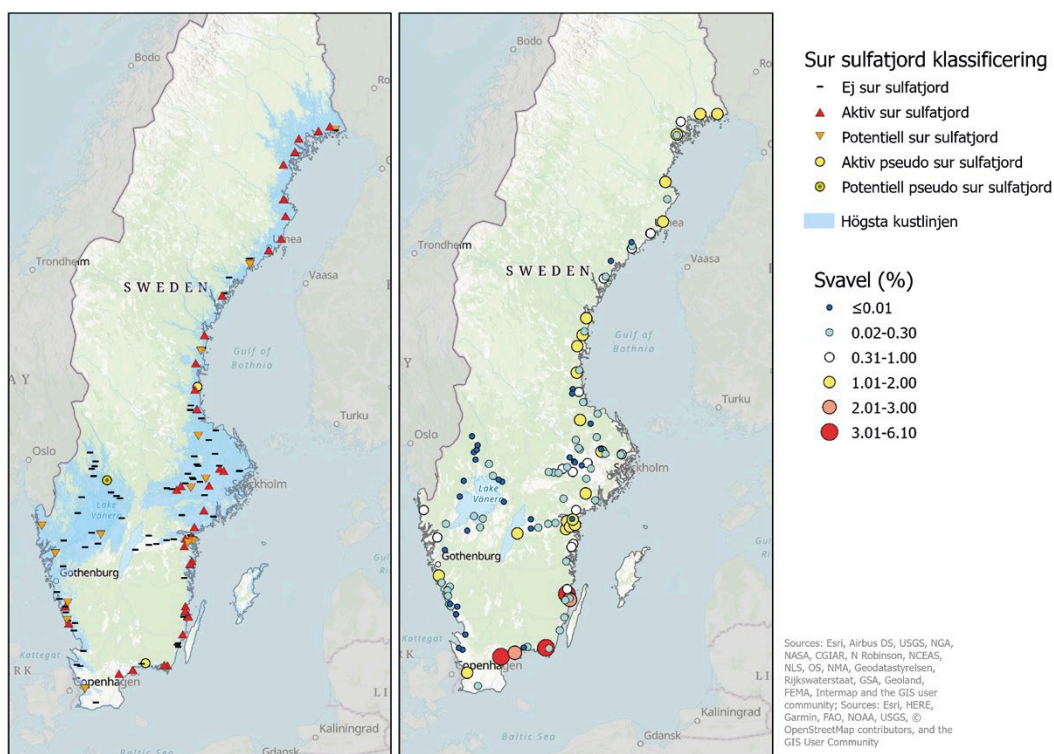


Figur 1. Provtagning av finkornig jord under åkermark. Foto vänster: Anders Johnson; foto höger: Alexandra Nyman.

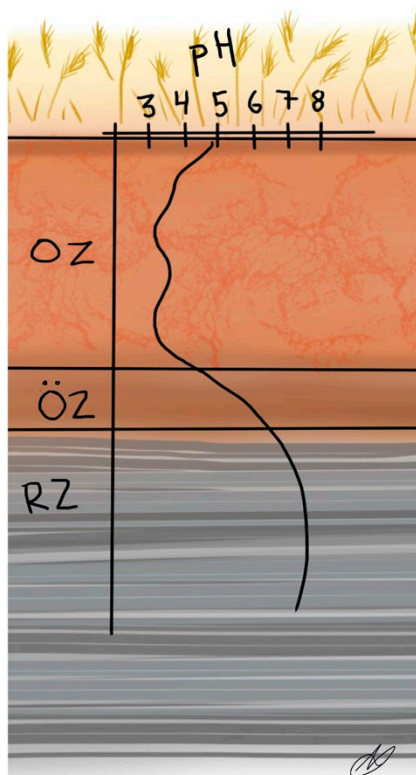
Huvuddragen i kartan är att risken för förekomst av sur sulfatjord är mycket hög i områdena längs Bottniska Viken och i syd/sydöst, och låg kring Vänern där ingen aktiv sur sulfatjord påträffades (Figur 2). I övriga delar av landet är det blandad förekomst av ej sur sulfatjord och olika typ av sur sulfatjord (Figur 2). Studiens strategi var gles provtagning för att kunna täcka hela landet. Därför visar kartan inte den totala utbredningen av sur sulfatjord inom undersökt område, utan sannolikheten

att stöta på sur sulfatjord, av olika slag, i de finkorniga sedimenten. Det innebär att avsaknad av viss jord, t.ex. inga aktiva sura sulfatjordar kring Vänern, inte betyder att sådan jord inte finns där, endast att risken att stöta på sådan jord i den regionen är låg. Det innebär också att även om sannolikheten för förekomst av sur sulfatjord i finkorniga sediment längs kusten i syd och sydöst är stor så är den totala utbredningen där mindre än i norr, vilket indikeras av en mindre areal som varit under högsta kustlinjen (Figur 2).

Kartan till höger i Figur 2 visar svavelhalten i den reducerade zonen, d.v.s. den zon som ligger under grundvattenytan och därmed är ooxiderad (ej varit i kontakt med atmosfärens syre) och pH-neutral (Figur 3). Orsaken till att svavel är av särskilt intresse är att den sura sulfatjorden bildas i finkorniga sediment som innehåller förhöjda halter av detta ämne, och i stora drag gäller att ju högre svavelhalt desto surare jord (se även avsnitt 2.3). Huvuddragen i kartan är i linje med förekomsten av sur sulfatjord, d.v.s. frekvent höga halter längs Bottniska Viken och i syd/sydöst, och låga halter kring Vänern. De klart högsta svavelhaltarna, och därmed de suraste jordarna, finns i syd/sydöst. Där är svavelhaltarna på flera ställen anmärkningsvärt höga, d.v.s. mellan 2,0 % och 6,1 % (röda och bruna bollar i Figur 2 till höger). I övriga delar av landet är svavelhaltarna mellan odetekterbar (< 0,01 %) till 2,0 %.



Figur 2. Förekomst av sura sulfatjordar i Sverige (vänster) och svavelhalt i den reducerade zonen (under grundvattenytan) av jorden (till höger). Kartan är reproducerad från Nyman et al. (2023a).



Figur 3. Schematisk bild av en sur sulfatjord, med den oxiderade zonen (OZ) som är sur, övergångszonen (ÖZ) där pH stiger, och den reducerade zonen (RZ) där inget syre finns och pH är neutralt.

Klassificeringen av sur sulfatjord baseras på pH nivåer och sänkningar styrda av reaktion mellan svavel i jorden och syre i atmosfären, enligt beskrivningar i tidigare arbete (Boman, 2018):

- Aktiv sur sulfatjord: pH < 4,0 eller 4,0–4,5 ifall underliggande sediment är hypersulfidmaterial (pH sjunker med minst 0,5 enheter till < 4,0 efter inkubation).
- Potentiell sur sulfatjord: pH > 4,5 med underliggande hypersulfidmaterial.
- Aktiv pseudo sur sulfatjord: pH 4,0–4,5 men inget underliggande hypersulfidmaterial.
- Potentiell pseudo sur sulfatjord: pH > 4,5 och pH i det underliggande sedimentet sjunker med minst 1,0 enheter till 4,0–4,5 efter inkubation.
- Ej sur sulfatjord: inget av kriterierna för någondera typ av sur sulfatjord uppfylls.

Rekommendationer för intressenter

Det är sedan tidigare känt att sura sulfatjordar har stor utbredning norröver (Norrbottnen, Västerbotten, Västernorrland) och där har man överlag förhållandevis god kunskap om dessa jordar bland annat på länsstyrelserna. I söder och sydöst är situationen annorlunda. Den stora sannolikheten att träffa på sur sulfatjord, som dessutom kan vara särskilt sur och svavelrik, i dessa delar av landet (Figur 2) har inte varit känd. Detta bekräftas av ett antal miljöproblem i södra/sydöstra Sverige, såsom fiskdöd, metallutfällningar på våtmarker och försurning av biologiskt känsliga vattendrag, vars orsaker varit okända men nyligen kunnat kopplas till läckage från

extremt sura sulfatjordar. Kunskap om de sura sulfatjordarna i syd/sydöst ökar emellertid nu snabbt bland annat p.g.a. de uppkomna miljöproblemen och mönstren som kan ses i kartan i Figur 2.

Miljöhandläggare och andra intressenter bör vara uppmärksam på miljöproblem såsom tidvis lågt pH och höga halter sulfat och metaller i vattenförekomster, eftersom källan då mycket väl kan vara sura sulfatjordar. Ett första steg vid upptäckt av sådana miljöproblem är att bekanta sig med sura sulfatjordar på SGU's hemsida <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/sulfidjordar-en-potentiell-miljobov/>. Därefter bör en plan för uppföljning och monitorering av vattnen och identifiering av sur sulfatjord tas fram. Vid behov kan experter vid t.ex. Linnéuniversitetet, Sveriges geologiska undersökning eller konsultföretag med kompetens kring sulfidrika material bistå med information eller undersökningar.

Resultaten av studien finns i detalj beskrivna i vetenskaplig publikation som är öppen:

Alexandra Nyman, Anders Johnson, Changxun Yu, Gustav Sohlenius, Marina Becher, Mark Dopson, Mats Åström 2023a. A nationwide acid sulfate soil study – A rapid and cost-efficient approach for characterizing large-scale features. *Science of the Total Environment* 869: 1618465

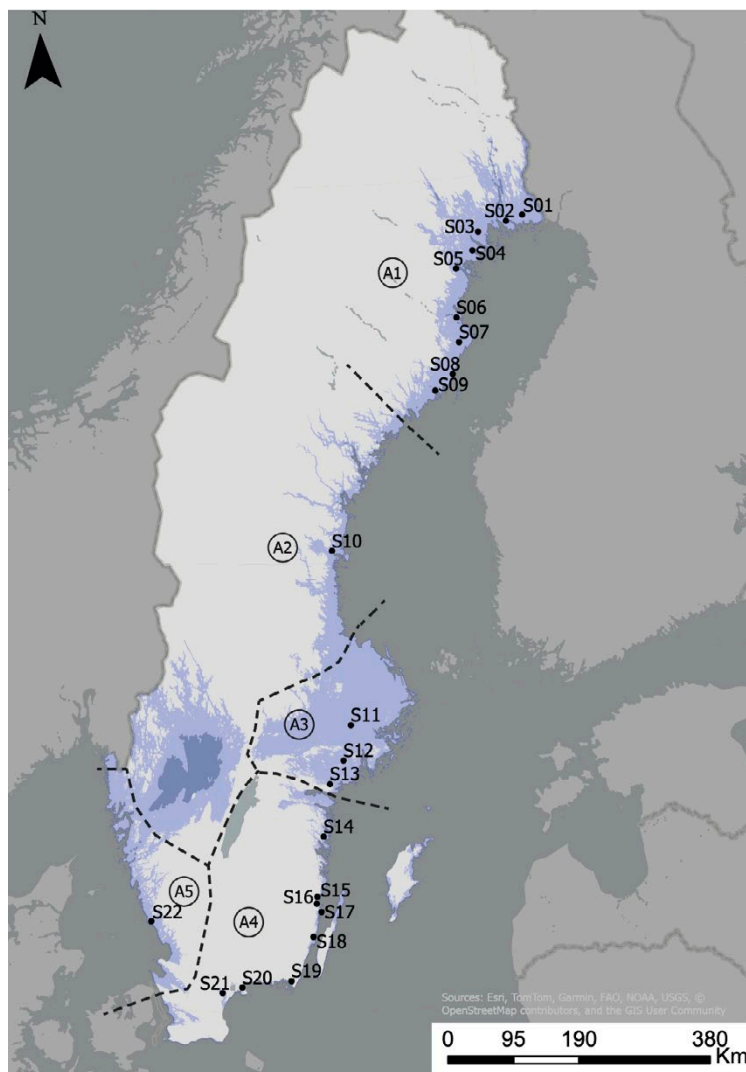
2.2 Historiska och framtida läckage av grundämnen från sura sulfatjordar

Sammanfattning av resultaten

Av de platser som studerats (Figur 2) var det på 22 ställen aktiv sur sulfatjord med ett fält-pH <4,0 vilka ingick i en ingående studie av sur sulfatjord (Figur 4). Vid varje plats tog tre stycken profiler, så att det sammanlagda antalet profiler av sur sulfatjord som studerades var 66 stycken. Det finns också aktiva sura sulfatjordar som har ett fält-pH 4,0–4,5 (när underliggande sediment är hypersulfidmaterial, d.v.s. pH sjunker med minst 0,5 enheter till <4,0 efter inkubation), men dessa ingick inte i studien. Den låga frekvensen av punkter mellan S09 och S11 beror på att endast en av de jordar som presenteras i Figur 2 hade ett fält-pH <4,0 i det området (S10).

Resultaten visar att en lång rad grundämnen (Ba, Be, Ca, K, Li, Mg, Na, Sr, Co, Mn, Ni, Zn, Cd, Y, Zr, Ce, La, Yb, Al, Th och B) är utarmade i den sura oxiderade zonen i jordmånen (OZ i Figur 3), säkerligen mestadels till följd av läckage till vattenmiljön och i någon mån p.g.a. upptag av växtlighet. Den procentuella utarmningen av dessa grundämnen i denna zon (i jämförelse med den reducerade zonen där kemiska element inte frisatts) varierade från 69 % (median) för S till 7,8 % för Th. För metallerna Co, Ni, Zn och Cd var motsvarande procentsatser 30–46 %. Detta visar att en stor variation förekommer bland grundämnen i termer av i vilken utsträckning de är utarmade i den sura oxiderade zonen. I enlighet med detta markgeokemiska mönster, visar tidigare studier att dessa grundämnen förekommer i förhöjda till mycket förhöjda halter i vattendrag som dränerar sura sulfatjordar, fränsett Zr och Ba. Flera av dessa grundämnen blir giftiga även vid förhållandevis

liten förhöjning i koncentration, däribland Cd, Be, Ni, Mn och Al. Den procentuella utarmningen av dessa grundämnen var endast obetydligt skiftande mellan olika delar av landet, d.v.s. den sura sulfatjorden är förhållandevis homogen till sin geo-kemiska karaktär i ett nationellt perspektiv trots betydande skillnader i t.ex. temperatur längsmed landet. En betydande skillnad finns emellertid mellan sulfatjordarna i norr (S01-S09) och söder (S11-S22) i form av att de i norr har ett betydligt tjockare surt skikt (median 75 cm) än de i söder (median 40 cm). Detta innebär att metaller har läckt, och i nutid sannolikt läcker, i större mängder från de sura sulfatjordarna i norr än söder, eftersom volymen av den sura oxiderade zonen är större i norr. En annan aspekt av detta resultat är att där det sura skiktet är tunnare, d.v.s. i söder, finns potential för större utvidgning av surheten i vertikalled. Sådan sker vid sänkning av grundvattenytan, vilken kan ske endera genom effektiverad dränering eller genom klimatförändringar eftersom mer frekventa utdragna torrperioder oundvikligen leder till långvarig sänkning av grundvattenytan. Resultatet är att svavlet (sulfid-mineral) i ännu ooxiderade jordlager (ÖZ och OZ; Figur 3) kommer i kontakt med syre varmed svavelsyra bildas och försurar jordmånen till djupare nivåer.



Figur 4. De 22 platser där sura sulfatjordar studerats i detalj, med fem områden inringade (A1–A5) för att underlätta beskrivning och tolkning av data.

Rekommendationer för intressenter

Resultaten visar att en lång rad grundämnen läcker från sura sulfatjordar, d.v.s. problem kopplade till denna jordmån handlar inte, som i många andra fall, om endast ett eller ett fåtal grundämnen, utan om en lång rad som sammantaget bidrar till dålig vattenkvalitet och toxicitet. Det är därför viktigt vid uppföljning av vattenförekomster som kan vara påverkade av sur sulfatjord att göra multielementanalys, d.v.s. bestämma en lång rad grundämnen i vattnet och inte endast några fåtal. På basen av resultaten rekommenderas att bestämma åtminstone Al, Fe, Mn, Cd, Co, Cu, Zn, Ni, Be, Li, La och U. I de flesta multielementpaket ingår dessa, eller de flesta av dem, och därtill även ett antal andra grundämnen som också kan vara fördelaktiga att få resultat på.

De genomsnittligt betydligt tunnare sura skikten i de sydsvenska sura sulfatjordar som undersöktes (S11–S22) indikerar att man i denna del av landet bör vara särskilt uppmärksamhet i termer av grundvattensänkningar förorsakade av intensifierad dränering eller utdragna torrperioder. Sänkning av grundvattenytan riskerar nämligen att ge rejäla effekter i form av ytterligare bildning av syra och frigörelse av metaller med toxiska egenskaper där det sura skiktet ännu inte nått djupt vilket är fallet på många platser i syd/sydost. Samma sak gäller norröver, men eventuellt inte med samma stora risk för miljön rent generellt eftersom många sura sulfatjordar där redan är djupa. Lokala variationer förekommer emellertid säkerligen, eftersom de data som presenteras här är baserade på gles provtagning och därför ger den generella regionala bilden men inte nödvändigtvis situationen på lokal nivå.

Resultaten av studien finns i detalj beskrivna i vetenskaplig publikation som är öppen:

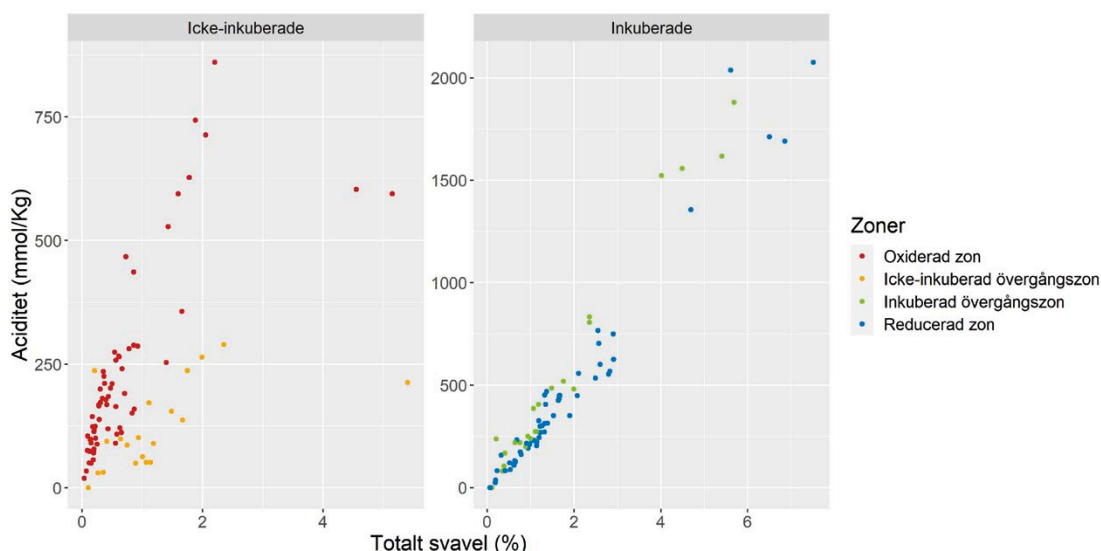
Alexandra Nyman, Anders Johnson, Changxun Yu, Mark Dopson, Mats Åström 2023b. Multi-element features of active acid sulfate soils across the Swedish coastal plains. *Applied Geochemistry* 152: 1055673

2.3 Aciditet och vattenlösliga grundämnen i sura sulfatjordar

Sammanfattning av resultaten

I laboratoriet genomfördes ett oxidationsexperiment med prov från övergångszonen där pH stiger brant och den underliggande reducerade zonen där pH är neutralt (Figur 3). I korthet, så vägdes upp tre gram prov som hölls fuktigt i 19 veckor, varefter 50 mL milliQ-vatten tillsattes och blandningen skakades under en timme. Vattenfasen som erhöles via centrifugering analyserades. Detta ger en bild av de metallmängder som kan frigöras på kort sikt efter att dessa jordlager exponerats för atmosfärens syre. Resultaten jämfördes med motsvarande vattenlakning på prov från den oxiderade sura zonen och även på prov från övergångszonen (Figur 3), d.v.s. prov direkt från fält utan inkubation. I studien ingick sura sulfatjordar från de platser som visas i Figur 4, inklusive tre profiler från varje plats. Även aciditeten bestämdes i dessa prov, eftersom den på flera sätt säger mer än pH-värdet i de sura jordproven. I korthet innebär aciditet hur mycket bas (NaOH) som behöver tillsättas för att åstadkomma ett neutral pH-värde. Till exempel, i den sura jorden finns i stort

sett alltid höga Al^{3+} halter och när ett basiskt ämne tillsätts till en sådan jord kommer inte i första hand pH att stiga utan Al^{3+} att hydrolyseras, d.v.s. övergå successivt i $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ och $\text{Al}(\text{OH})_3$. Utmärkande drag i resultaten är den mycket starka korrelationen mellan totalsvavelhalt och aciditet både i inkuberade och icke-inkuberade prov (Figur 5), och den stora skillnaden i aciditet mellan övergångszonens aciditet före inkubation (<300 mmol/kg) och efter densamma (upp till 1 500–2 000 mmol/kg). Dessa höga aciditeter, vilka alltså är direkt kopplade till totalsvavelhalten i jorden, är ett kännetecken för den sura sulfatjorden, d.v.s. värdena är mycket högre än t.ex. i torvmossar och regn som ibland kan ha lika låga pH-värden men mycket lägre aciditet. De starka sambanden mellan totalsvavel och aciditet visar att svavelhalten i stort sett kan användas för att uppskatta aciditeten, särskilt i prov som har kvar sitt förråd av järnsulfid och utsätts för atmosfäriskt syre (oxidation), d.v.s. prov från övergångszonen och den reducerade zonen. Detta innebär vidare att kartan över svavelhalter som visas i Figur 2 ger en god bild av graden av den aciditet som kommer att bildas om/när grundvattenytan sjunker djupare ner i övergångszonen och den reducerade zonen.



Figur 5. Totalsvavel (aqua regia extraktion) mot aciditet i icke-inkuberade och inkuberade prov från de tre zoner som identifieras i sur sulfatjord. Notera att för övergångszonen finns resultat både innan och efter inkubation och att det är olika skalor på y-axeln i de två graferna.

De vattenlösliga halterna av grundämnen, vilka speglar omedelbar eller kortsiktig lakningsbarhet, är mycket höga i prov som inkuberats, bl.a. Al (median 684 mg/kg i den reducerade zonen), Mn (134 mg/kg), Zn (13 mg/kg) och Ni (5,5 mg/kg). Detta understryker risken med sänkningen av grundvattenytan ner i den sura sulfatjordens underliggande reducerade zon (Figur 3), d.v.s. metallfrisättningen riskerar att bli omfattande även på kort sikt. I den oxiderade sura zonen i jorden var halterna åtskilligt lägre (median Al 29 mg/kg; Mn 10 mg/kg, Zn 1,3 mg/kg; Ni 1,6 mg/kg), men ändå tillräckligt höga för att åstadkomma de allmänt markant förhöjda halterna av dessa metaller i diken och vattendrag som dränerar sur sulfatjord. Liksom för de totala halterna av grundämnen, vilka presenteras i avsnitt 2.2, finns endast rätt små skillnader i de vattenlösliga halterna mellan norr (S01–S09) och söder (S11–S22), vilket understryker att de sura sulfatjordarna runt om i landet är förhållandevis likadana geokemiskt.

Rekommendationer för intressenter

Denna studie belyser, och visar för första gången mer exakta data på, de mängder aciditet som bildas och metaller som kan på frisättas på kort sikt och läcka till miljön när övergångszonen och den reducerade zonen av den sura sulfatjorden hamnar i oxiderande miljö, d.v.s. grundvattenytan sjunker till följd av effektiverad dränering eller utdragna torrperioder förorsakade av naturliga eller klimatförändringsrelaterade fenomen. Särskilt anmärkningsvärd är den stora ökningen i aciditet när övergångszonen tillåts oxidera (inkuberas), vilket är mycket lätt hänt under fältförhållande eftersom den redan ligger kring eller just under grundvattenytans (genomsnittliga) nivå. Slutsatsen är att en ytterligare sänkning i grundvattenytan i sur sulfatjord är synnerligen oönskad ur miljösynpunkt, särskilt där jorden innehåller höga svavelhalter. Fenomenet bör uppmärksammas över hela landet, inte minst i syd/sydväst där det sura skiktet vanligen är tunnare och övergångszonen därför ligger närmare markytan och av den orsaken i princip löper större risk att blottas (för syre) vid effektiverad dränering eller långvarig torka. De endast små skillnader som överlag finns mellan sura sulfatjordar i olika delar av landet visar att metoder för att minska miljöpåverkan från dessa jordar inte generellt måste ta i beaktande regionala skillnader i geokemisk karaktär såsom bildning av aciditet och frisättning av metaller. Dock, lokala variationer kan vara stora och betydande, t.ex. extremt höga svavelhalter på vissa platser i de södra/sydvästra delarna av landet.

Resultaten av oxidationsexperimentet ska presenteras i en artikel som är under arbete och kommer att ingå i Alexandra Nymans doktorsavhandling:

Alexandra Nyman et al. 2024. Acidity levels and water-soluble concentrations of chemical elements in Swedish acid sulfate soils.

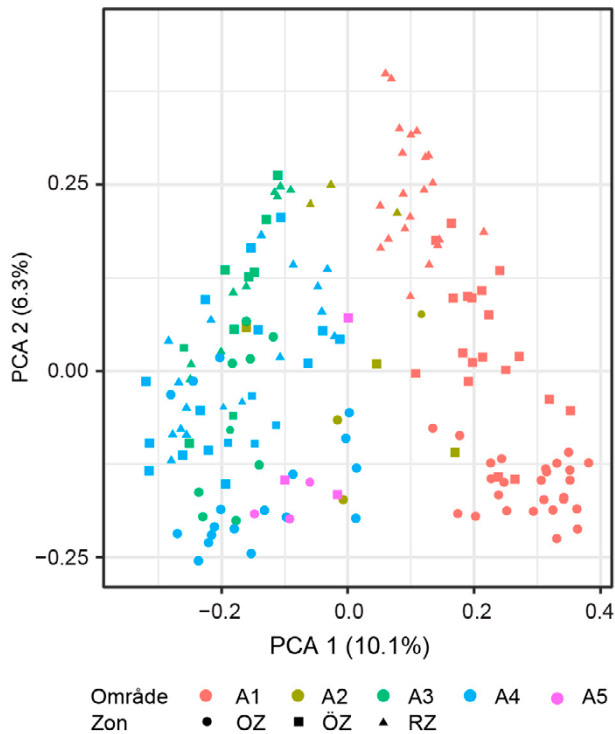
2.4 Mikrobiologin i sura sulfatjordar

Sammanfattning av resultaten

Tillsammans med den geokemiska studie som presenteras i avsnitt 2.2 gjordes en mikrobiologisk studie, d.v.s. prov togs med sterila tekniker vid de platser som visas i Figur 4, fransett två stycken, d.v.s. 20 platser och därav sammantaget 60 profiler (tre profiler per plats). Studien baserades på DNA extraktion, PCR amplifiering av 16S rRNA genen, och sekvensering av PCR-fragmenten vid Science for Life Laboratory i Solna.

Till skillnad från de sura sulfatjordarnas geokemi som var förhållandevis homogen över hela landet, fanns en tydlig skillnad i mikrobiologin mellan norr och söder. Detta åskådliggörs i PCA plotten i Figur 6 där det på x-axeln (PCA 1) finns en markant skillnad särskilt för den oxiderade zonen (OZ) för vilken punkterna i område A1 (d.v.s. i norr) ligger till höger och punkterna i områden A3-A5 (d.v.s. i söder) till vänster medan A2 är i stort mitt emellan. Detta visar att de mikrobiella samhällen är korrelerade mot latitud, vilket med största sannolikhet är en påverkan från temperaturskillnader, inklusive frost i marken, mellan norra och södra delarna av landet. Även på y-axeln (PCA 2) finns en separation såtillvida att proven från den oxiderade zonen (OZ) finns längst ner följt uppåt av övergångszonen (ÖZ) och överst den reducerade zonen (RZ).

Denna effekt på de mikrobiella samhällena är säkerligen kopplad till de stora skillnader som finns med avseende på surhet och redox (Eh) vilka båda markant ökar från RZ via ÖZ till OZ. Mer i detalj, så finns t.ex. en högre relativ förekomst av Ktedonobacteraceae i de norra delarna och Gallionellaceae i södra delarna av landet. Därutöver identifierades mikrobiella taxa som anknyter till järn- och svavelreduktion och oxidation såsom Acidobacteriaceae, Gallionellaceae, and Koribacteraceae.



Figur 6. En PCA analys som visar olikheter bland mikrobiella samhällen baserat på 16s rRNA sekvenser i prov från den oxiderade zonen (OZ), övergångszonen som ligger under OZ och karakteriseras av snabbt stigande pH (ÖZ) och i den underliggande reducerade och pH-neutrala zonen (RZ). Områden A1–A5 visas i Figur 4. Figuren är reproducerad från Johnson et al. (2024).

Rekommendationer för intressenter

Det finns tydliga skillnader mellan de mikrobiella samhällena i sura sulfatjordar i norra och södra Sverige baserat på sekvensering av 16S rRNA genen. En pågående mer detaljerad "omics"-baserad studie kommer att ge mer information kring vad som är de verkliga skillnaderna mellan den mikrobiella aktiviteten i söder och norr. Detta, i sin tur, ger förutsättningar att uppskatta mikrobernas inverkan på miljön på kort och lång sikt samt hur de kommer att reagera och agera vid eventuell framtida återvätning av sur sulfatjord i olika delar av landet. "Omics"-studien är pågående men arbetsdryg (bl.a. lyckades inte, trots flera försök, RNA extraheras i de mängder som hade krävts för sekvensering) och kommer därför att färdigställas efter projektslut. Resultaten av "omics"-studien har potential att ge information som kan vara av betydelse vid planering av åtgärder för att minska läckage av syra/metall från sur sulfatjord, och vid bedömning av eventuella bieffekter vid återvätning av sur sulfatjord.

Resultaten av 16S rRNA baserade studien finns i detalj beskrivna i vetenskaplig publikation som är öppen:

Johnson, A., Nyman, A., Åström, M., & Dopson, M. (2024). Regional variation in Swedish acid sulfate soil microbial communities is influenced by temperature and geochemistry. *European Journal of Soil Science*, 75(1), e13452. <https://doi.org/10.1111/ejss.13452>

Resultaten av "omics"-studien kommer att presenteras i en publikation som färdigställs efter projektslut:

Johnson, et al. "Omics" study of acid sulfate soils across Sweden.

2.5 Återvätning av sur sulfatjord: inverkan på järnhydroxider och pH

Sammanfattning av resultaten

De viktigaste sekundära Fe-fällningarna i sura sulfatjordar är oxyhydroxysulfaterna jarosit och schwertmannit tillsammans med ferrihydrit (Shahabi-Ghahfarokhi et al., 2022; Yu et al., 2023). De två tidigare innehåller utöver trevärt järn också sulfat. När sur sulfatjord läggs under vatten, är den viktigaste biogeokemiska reaktion som förväntas inträffa reduktion (upplösning) av dessa mineral, vilket resulterar i en samtidig ökning av pH. Det är emellertid okänt i vilken omfattning och huruvida dessa mineral verkligen kommer att reduceras under förhållanden där en naturlig mikrobflora ingår.

Följaktligen gjordes ett laboratorieexperiment där oxyhydroxysulfaterna jarosit och schwertmannit syntetiserades, och sedan blandades i ett artificiellt grundvatten som liknar det som finns i sura sulfatjordar, samtidigt som ett naturligt konsortium av anaeroba mikroorganismer (från södra Sverige) tillsattes och miljön hölls syrefri (reducerande). Experimentet genomfördes i rumstemperatur upp till 10 månader.

Resultaten visade att schwertmannit reducerades effektivt vilket ledde till en förhöjning av pH från mycket surt till neutralt samtidigt som två andra mineral fälldes ut, d.v.s. järnsulfid (av den svarta färgen att döma ett metastabilt mineral med formel kring FeS) och götit. Däremot skedde ingen reduktion av jarosit, vilket ledde till att sura förhållanden kvarstod i experimentet med detta mineral. Konsekvensen av detta är att när sura sulfatjordar görs om till våtmarker, kommer en jord som domineras av schwertmannit (tillsammans med ferrihydrit) att fortare ge högre pH-värden men även högre lösta järnhalter, i förhållande till jord som domineras av jarosit. Kännedom om dessa mineral i sura sulfatjordar runt om i Sverige är emellertid i stort sett obefintlig. I österbottniska sura sulfatjordar, som liknar de i Västerbotten och Norrbotten, har det visats att just schwertmannit är det dominerande mineralet följt av ferrihydrit (Yu et al., 2023), medan en sur sulfatjord i Skåne (vilket visats inom ramen för detta projekt) har ungefär lika stor andel av schwertmannit och jarosit (Shahabi-Ghahfarokhi et al., 2022).

Rekommendationer för intressenter

Det kan vara fördelaktigt att återställa en sur sulfatjord till våtmark om den innehåller de sekundära järnmineralen schwertmannit och ferrihydrit, eftersom jorden isåfall (inom rimlig tid) förväntas återfå ett högre pH-värde och därmed fastläggs giftiga metaller såsom aluminium, nickel, mangan, beryllium och kadmium. Om jorden i motsats innehåller mestadels jarosit, kan pH höjning utebli åtminstone på kort sikt med bibehållen mobilisering av dessa metaller. Dock, det finns även negativa bieffekter av snabb reduktion av järnmineralen, vilket diskuteras i avsnitt 2.6. Analys av järnmineralogin i en sur sulfatjord man planerar återvåta kan därför med fördel göras, t.ex. i samarbete med forskare som sysslar med dessa mineral, i syfte att bättre kunna bedöma konsekvenserna av återvåtningen.

Resultaten av studien ska presenteras i en artikel som är under arbete:

Yu, C., et al. Microbial-mediated transformation of schwertmannite and jarosite under oxygen-free conditions at various starting pH levels.

2.6 Återvåtning av sur sulfatjord: frisättning och läckage av järn och toxiska spårämnen

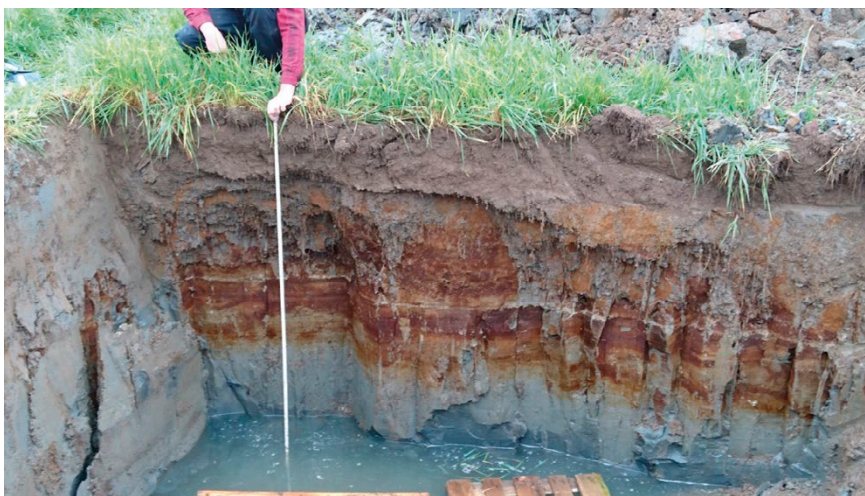
Sammanfattning av resultaten

Extraktion av grundämnen med relativt svag syra (1M HCl) gjordes på prov av sura sulfatjordar från hela landet (Figur 4) från alla tre zoner i jorden (Figur 3). Resultaten visar att flera toxiska grundämnen som frigörs vid mineralvittring i den sura jorden förekommer i högre HCl-lösliga koncentrationer i den oxiderade zonen än i den reducerade zonen (Fe, As, Cr, Cu, Mo, Sc, Ti, U och V). Av dessa var det endast Fe som uppvisar en signifikant skillnad mellan norr och söder med högre relativ fastläggning i söder. Dessa resultat betyder att efter frisättning i den sura jorden har dessa grundämnen inte lakats ut såsom flera andra metaller, utan har åter fastlagts i relativt löslig form. Exakt i vilken form de fastlagts har inte studerats, men med stor sannolikhet handlar det till stor del om adsorption på sekundära järnmineral, d.v.s. Fe^{3+} hydroxider såsom ferrihydrit, jarosit och schwertmannit vilka bildas rikligt i jorden (Figur 7) och har stora reaktiva ytor.

Av på det viset fastlagda grundämnen är flera toxiska, främst arsenik, krom och uran. Denna fastläggning är primärt positiv eftersom den hindrar ämnena att röra sig vidare i ekosystemet och miljön. Det finns emellertid en risk vid omvandling av sur sulfatjord till våtmark. När en sådan förvandling genomförs i landskapet i mindre eller större skala, kommer anaeroba biogeokemiska processer att resultera i en tilltagande upplösning av sekundära järnmineral, främst schwertmannit (och ferrihydrit) såsom beskrivs i avsnitt 2.5, vilket i sin tur höjer pH som är en önskad och positiv effekt. Denna mineralupplösning medför emellertid också att spårämnen som varit bundna till dessa, såsom arsenik, krom och uran, samtidigt frigörs och

därmed kan bli lösta i grundvattnet och således transporteras ut i närmiljön. Det finns därför risk för negativa bieffekter i termer av mobilisering av toxiska spårämnen när järnmineralen löses upp.

Utöver frigörelse av spårämnen kan järnläcket öka, vilket är välkänt. Det tvåvärda järnet som frigörs när järnmineralen upplösts (reducerats) är lösligt och kan därmed transporteras ut från den nybyggda våtmarken med rinnande vatten. När det sedan nedströms är mer syrerika förhållanden i vattnet oxideras det tvåvärda järnet till trevärt, vilket förbrukar syre och producerar syra vilket kan leda till både syrebrist och försurning i vattenförekomsten, och därutöver rostiga beläggningar (ochra) skadliga för flora och fauna. I denna studie har storleken på denna järnreservoar kvantifierats, på ett rätt konservativt sätt i.o.m. att en förhållandevis svag syra använts för kvantifieringen (1M HCl). Resultaten visar att detta järnförråd är mycket stort, i genomsnitt 1,1 % av torrvikten av hela den oxiderade zonen. Därutöver var halten så hög som >2,0 % i tre lokaler i norr och två i söder, av de 22 lokaler som ingick i studien. Dessa mycket höga halter visar att återvätning av sur sulfatjord kan leda till synnerligen höga halter av tvåvärt järn i utgående vatten från våtmarken med risk för betydande miljöproblem. Detta indikeras i studien i Bygdeå, Västerbotten, där en lätt sur jord (d.v.s. inte en aktiv sur sulfatjord med stora mängder sekundära järnföreningar) och som dessutom är tunn gjorts till våtmark och som trots dessa egenskaper visade på tydligt stigande järnhalter i utgående vatten.



Figur 7. Sur sulfatjord (pH < 4,0) där bruna järnfällningar bildats och binder grundämnen såsom arsenik, krom och uran vilka annars kunde spridas i miljön. Foto: Mats Åström

Rekommendationer för intressenter

Att göra en våtmark till sur sulfatjord är en positiv åtgärd ur synvinkeln att jordmånens pH kommer att höjas (åtminstone på sikt) och en rad metaller, såsom aluminium, kadmium, nickel, zink, kobolt, beryllium och sällsynta jordartsmetaller, därmed kommer att fastläggas. Effekten blir mindre läckage och därmed mindre spridning av försurande substanser och toxiska metaller till närliggande miljö, t.ex. yt- eller grundvattnet. Men, som studier visar, finns arsenik, krom och uran bundna i en sådan form att återvätning av jorden med all sannolikhet leder

till frisättning och möjligt läckage till omgivande vattenmiljö. En än större miljörisk är läckage av stora mängder järn eftersom stora reservoarer av reducerbart järn finns bundet i mineral såsom schwertmannit, jarosit och ferrihyrit i den oxiderade zonen, som en följd av bildning efter oxidation av järnsulfider när markerna blev syresatta och försurade efter dränering. Vid återvätning av sur sulfatjord är det därför viktigt att i utgående vatten noggrant följa med framförallt järnhalter, men även halterna av spårämnen såsom arsenik, krom och uran, vilka kan förväntas öka och i värsta fall avsevärt öka jämfört med förhållandena innan återvätning. Det finns i stort sett ingen kunskap om potentiella problem med järnfrisättning i, och läckage från, boreala sura sulfatjordar som gjorts till våtmark, även om den preliminära studien i Bygdeå visat att även från en jord som är lätt sur och tunn kan järnhalterna avsevärt öka i utgående vatten.

Resultaten av studien finns i detalj beskrivna i vetenskaplig publikation som är öppen:

Alexandra Nyman, Anders Johnson, Changxun Yu, Mark Dopson, Mats Åström 2023b. Multi-element features of active acid sulfate soils across the Swedish coastal plains. Applied Geochemistry 152: 1055673

2.7 Inverkan av sur sulfatjord på närliggande våtmark

Sammanfattning av resultaten

På våtmarker i Biosfärsområde Kristianstads Vattenrike har utbredda röd-bruna fällningar bildats vilka haft negativ inverkan på florans vilket i sin tur påverkat faunan (Figur 8). Orsaken och källan till fällningarna är sura sulfatjordar, vilket visats i en tidigare pilotstudie (Åbjörnsson, 2018) och har här undersökts i mer detalj. Intill våtmarkerna finns invallade åkrar med underliggande sura sulfatjordar med extremt låga pH-värden, ner under 3,0. Under dessa extremt sura förhållanden blir järn i trevärd form och många andra metaller frigjorda från markens mineral och hamnar i lösning. Transport av metallerna från den sura jorden har därmed varit ett faktum, vilket bevisas i första hand av mycket höga halter av järn, aluminium, sällsynta jordartsmetaller, beryllium och uran i botten-sediment i ett utfallsdike som binder ihop åkrarna med våtmarken. Från utfallsdiket har sedan, under inte helt klarlagda förhållanden men utan tvekan relaterade till pumpning när vattennivån i diket och den invallade marken stigit för högt, transport (via pumpningen) till våtmarken skett. Det avgörande beviset på att denna transport skett och att ursprunget för järnfällningarna på våtmarken är de sura sulfatjordarna är att fällningarna är rika inte enbart på järn utan även innehåller klart förhöjda halter av aluminium, sällsynta jordartsmetaller, beryllium och uran, d.v.s. desamma som är kraftigt anrikade i sedimenten i diken och som vanligen är förhöjda i vattendrag som dränerar sur sulfatjord. Dessa metaller sammantaget kan därför inte ha någon annan källa än just de sura sulfatjordarna. Pilotstudien (Åbjörnsson, 2018) och denna studie har följaktligen visat att sura sulfatjordar intill våtmarker kan skapa betydande problem och störningar i våtmarkens ekologi och funktion.



Figur 8. Rostiga fällningar på våtmark till följd av läckage från sura sulfatjordar.
Foto: Sina Shahabi Ghahfarokhi.

Rekommendationer för intressenter

Om betydande färgade/rostiga fällning uppträder och skapar problem på våtmark är det skäl att klarlägga huruvida källan är sura sulfatjordar särskilt om området ligger under den högsta kustlinjen. Som studien visar kommer dessa fällningar, ifall källan är sura sulfatjordar, att utöver järn och aluminium också innehålla ett antal spårämnen som sammantaget visar att källan är just sura sulfatjordar. Hit hör framförallt sällsynta jordartsmetaller, beryllium och uran. Därtill kan säkerligen också andra metaller, som läcker i stora mängder från sura sulfatjordar (se avsnitt 2.2), förekomma i förhöjda halter, bl.a. Co, Ni, Zn, Cu och Li. Förekomst av samtliga dessa metaller kan därför med fördel bestämmas i fällningarna. Vid ovana med tolkning av geokemiska data kan kontakt tas med expertis, t.ex. Linnéuniversitetet, Sveriges geologiska undersökning eller konsultföretag med kompetens kring sulfidrika material.

Resultaten av studien finns i detalj beskrivna i vetenskaplig publikation som är öppen:

Shahabi-Ghahfarokhi, Sina, Mats Åström, Changxun Yu, Thérèse Lindquist, Henric Djerf, Karsten Kalbitz, Marcelo Ketzer, 2022. Extensive dispersion of metals from hemiboreal acid sulfate soils into adjacent drain and wetland. *Applied Geochemistry* 136: 105170

2.8 AI-baserad undersökning av sur sulfatjord kring sjön Hjälmaren

Sammanfattning av resultaten

För norra Sverige finns det relativt mycket data som visar var sur sulfatjord förekommer. Genom maskininlärning har denna data använts för att ta fram en karta som visar var längs Norrlandskusten sur sulfatjord kan förväntas förekomma (Sveriges geologiska undersöknings kartvisare). I södra Sverige är undersökningar av sura sulfatjordar betydligt färre, men kartan i Figur 2 visar att de förekommer även där och bl.a. studien i avsnitt 2.7 att de kan skapa betygande miljöproblem.

Förekomsten av sur sulfatjord här därför studerats i detalj i ett område i södra Sverige, kring Hjälmaren, med hjälp av maskininlärning. Målsättningen var att ta reda på i vilken utsträckning sura sulfatjordar förekommer i detalj i en specifik avskild del av södra Sverige och för att testa om det är möjligt att använda maskininlärning för att ta fram kartmaterial som visar var sur sulfatjord sannolikt förekommer. Området kring Hjälmaren valdes för att där sedan tidigare finns detaljerad information om jordarternas egenskaper och utbredning, förekomst av gyttejordar vilka bedömdes kunna utgöra sur sulfatjord (Sohlenius et al., 2009), och detaljerad information från resistivitetsmätningar som utförts från helikopter (Persson, 2020). Relevansen av resistivitetsmätningarna beror på att de sulfidhaltiga sediment som underlagrar den aktiva sura sulfatjorden ofta kännetecknas av utmärkande (låg) elektrisk resistivitet (Sohlenius et al., 2009) och att resultaten från flygmätningarna visar att områdena med just gyttejordar kännetecknas av låg resistivitet. Därutöver användes som underlag höjddata (Lantmäteriet), Nationella marktäckedata (Naturvårdsverket) och SGU:s jordartskarta. I studien har även använts geokemiska data på bäckvattenväxter eftersom undersökningar visat att flera grundämnen är anrikade i dessa när de finns i anslutning till områden med aktiv sur sulfatjord (Lax, 2005).

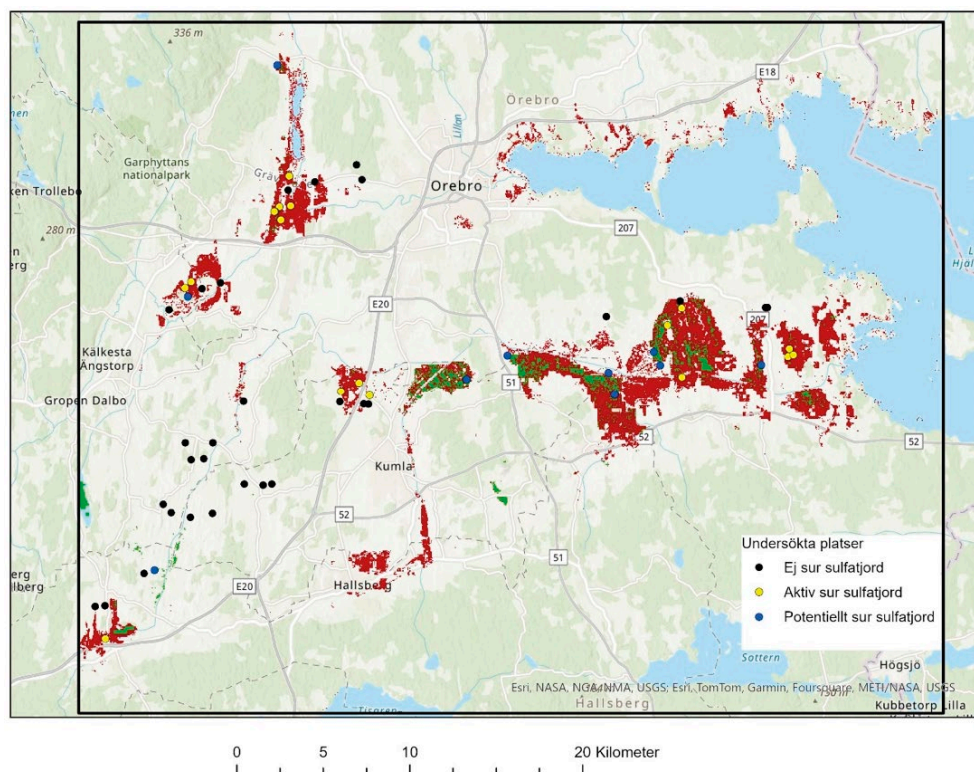
Fältarbete utfördes med samma metodik som tidigare använts i norra Sverige och som även använts av Geologiska Forskningscentralen i Finland (GTK). Platser med olika typer av jordarter valdes ut för provtagning, dels sådan där det bedömdes att sur sulfatjord kunde förekomma dels sådana där det är mindre troligt att sådan jord förekommer. Sammanlagt 82 platser undersöktes. På ungefär hälften av de undersökta platserna påträffades aktiv och/eller potentiell sur sulfatjord. Karta över områden med sur sulfatjord togs sedan fram med maskininlärning med metodik som tidigare använts för att ta fram kartor för områden längs Norrlandskusten (Becher, 2019), och baserades på att kombinera resultaten från fältmätningarna med den geografisk informationen (existerande underlag).

Resultatet visar att det med maskininlärning är möjligt att identifiera områden där det är sannolikt att sur sulfatjord förekommer och att det därför bör vara möjligt att använda denna metod för att identifiera andra områden i södra Sverige med sur sulfatjord. Den resulterande kartan (Figur 9) lyckas dock inte på ett tydligt sätt skilja ut områden med potentiell sur sulfatjord (icke sur men blir det ifall dräneringen blir djupare eller effektivare) från de med aktiv sur sulfatjord. Det kan bero på att kartan baseras på ett relativt litet antal fältobservationer. Modellen testades även på hela regionen kring Mälaren och resultaten visar att flera sedan tidigare kända områden med sur sulfatjord återspeglas i resultatet. Modellen kommer ännu att

köras om med fältdata som samlades in mot slutet av projektet vilket förhoppningsvis kommer leda till att det blir möjligt att skilja mellan olika typ av sur sulfatjord. Det kommer även genomföras olika tester på modellen för att avgöra om det finns möjligheter att förbättra den och bättre anpassa den till förhållandena i södra Sverige.

Inom ett avslutat examensarbete (Isaksson, 2023) jämfördes modellresultaten med data från SGU:s undersökningar av bäckvattenväxters kemiska sammansättning. Resultaten bekräftar att växternas sammansättning kan användas som en indikator för att påvisa förekomsten av sur sulfatjord. Resultatet indikerar dock att det kan finnas områden med aktiv sur sulfatjord som inte detekterats av den övergripande modellerade kartan för hela regionen kring Mälaren. För att ta fram en bättre karta som visar förekomster av sur sulfatjord skulle det därför behövas ett större data-underlag.

Resultatet från undersökningarna kring Hjälmaren visar att det i södra Sverige kan finnas relativt stora områden med sur sulfatjord. Området kring Hjälmaren kännetecknas dock av en ovanligt stor andel gyttesediment och det är därför troligt att andelen sur sulfatjord här är större än i många andra områden med lersediment i södra Sverige. Det studerade området utgör därför troligen ett område som för denna del av landet har en ovanligt stor förekomst av sur sulfatjord, men även annanstans i södra Sverige har lokala studier visat på omfattande förekomst av denna jordmån (Lindgren et al., 2022; Shahabi-Ghahfarokhi et al., 2022).



Figur 9. Områden väster om sjön Hjälmaren där det är sannolikt att sur sulfatjord förekommer. De gröna och mörkröda områdena representerar områden med potentiell respektive aktiv sur sulfatjord. Dessa områden kännetecknas av en låg elektrisk resistivitet samt förekomsten av gyttejordar. Områdena har tagits fram med maskininlärning.

Rekommendationer för intressenter

Resultaten visar att den rätt sofistikerade metod som tagits fram (och vidareutvecklas) för identifiering av aktiv och potentiell sur sulfatjord har stor potential och kommer att kunna ligga till grund för bättre och mer heltäckande kartor över förekomst av sur sulfatjord i södra delarna av Sverige. I nuläge krävs specialister för att använda metoden och det är därför i första hand SGU som kommer att kunna nyttja denna nya kunskap och metod.

Resultaten finns i detalj beskrivna i följande publikationer:

Isaksson, A., 2023. Verifiering av modellerad förekomst av sura sulfatjordar i Mälardalen. Examensarbete i geografi. Stockholms universitet. FULLTEXT02 (diva-portal.org).

Roslund Tobias, 2024. Magistersarbete vid Stockholms Universitet. Slutförs under 2024.

2.9 Åtgärder för att minska läckaget från sura sulfatjordar

För att besvara denna fråga har en litteraturstudie gjorts samt dialog förts med aktörer. Nedan en beskrivning av de viktigaste och mest relevanta metoderna, deras för- och nackdelar, samt hur de kan/borde användas och/eller undersökas vidare.

Kalkning av ytjorden

Att applicera finkornig (mald) kalksten (CaCO_3) på sur sulfatjord som ska användas som jordbruksmark är helt nödvändigt. Utan kalkning är förhållandena för sura och odling i praktiken omöjlig. Detta har man känt till länge, och därför har kalkningen varit ett givet och kontinuerligt inslag i jordbruk som bedrivs på sura sulfatjordar. Det är också klarlagt att kalkningen av ytjorden påverkar pH endast i det plöjda skiktet, men inte i den underliggande jorden och att därför också dräneringsvattnets pH förblir i praktiken opåverkat av kalkningsinsatserna på ytan. Redan på 1980-talet gjordes fältförsök där man till ytjorden tillsatte den kalkmängd som behövdes för jordbruket samt dubbla den kalkmängden, men i ingetdera fallen fanns ingen, eller endast en mycket liten, inverkan på aciditeten i såväl öppna diken som täckdiken (Palko and Weppling, 1994). Likadana resultat finns från ett annat fält med sur sulfatjord där en synnerligen stor kalkmängd spreds ut på ytan (motsvarande 347 ton/ha) men trots det en hydrokemisk effekt som var endast blygsam och partiell (Astrom et al., 2007). Därutöver har man sett i många studier att pH förblir mycket lågt i den sur sulfatjorden trots ytkalkning (Astrom, 1998; Nyman et al., 2023; Yli-Halla et al., 1999) och likaså i vattendrag i dräneringsområden där sura sulfatjordar är utbredda och frekvent kalkade (Astrom and Astrom, 1997; Edén, 1999; Nystrand and Osterholm, 2013; Toivonen et al., 2013). Kalkning av ytjorden är en central ingrediens i jordbruksaktiviteter på sur sulfatjord, men endast i syfte att göra jorden odlingsduglig och produktiv, inte som ett sätt att förbättra miljöpåverkan genom minskad frigörelse och mobilisering av syra och metaller.

Kalkning av vattendrag

Kalkning, endera med mald kalksten eller kalciumoxid (CaO), av vattendrag försurade av sura sulfatjordar är möjlig, men är förknippade med sekundära miljörisker på både kort och lång sikt. Denna metod har därför generellt ansetts olämplig att använda som neutralisationsteknik för vattendrag försurade och metallkontaminerade till följd av läckage av sura sulfatjordar (Nuotio, 2009; Rautio, 2006). Det finns två primära orsaker:

- Eftersom aciditeten kan vara mycket hög i dessa vatten p.g.a. förekomst av inte enbart vätejoner utan även höga halter av aluminium, järn och mangan, vilka motverkar förhöjning av pH genom hydrolysreaktioner, måste mycket stora mängder kalk tillsättas (i storleksordningen 0,1–1,0 kg/m³), vilket är dyrt, kan vara knepigt att dosera och kan i värsta fall leda till kortlivade för höga pH-värden vilka också de är skadliga för vattenekologin. I ett vattendrag i sydvästra Finland med ett dräneringsområde på 438 km² som uppskattas bestå till c. 10 % sura sulfatjordar har det beräknats att för att neutralisera vattnet till tillfredsställande nivå under en månad på våren och en månad på hösten skulle kostnaden uppgår till 170 000 euro/år, d.v.s. c. 2 miljoner kr/år (Triipponen, 1997). Detta var 25 år sedan så kostnaderna är idag säkerligen betydligt högre än så.
- Neutralisation till neutrala pH-värden i denna typ av vatten innebär mer eller mindre utfällning av aluminium, järn och mangan, och därtill spårämnen som Co, Ni, Zn, Cd, Be och sällsynta jordartsmetaller. Resultatet är metallrika fällningar, som kan ansamlas endera längs vattendragets botten eller i mynningsområden. Detta innebär en kontaminering av sedimenten (Nordmyr et al., 2008), vilket i sin tur kan innebära att vid framtida eventuella episoder av låga pH-värden kan dessa metallrika fällningar upplösas och metallerna därmed åter frigöras och transporteras vidare nedströms i löst biotillgänglig form. Dessa fällningar kan med andra bli till en ”kemisk tidsbomb”. Redan på 1980-talet påvisades detta fenomen i laboratorieförsök där vatten från sura sulfatjordar neutraliserades med kalk till 7,0 vilket resulterade i en omfattande utfällning av framförallt aluminium men även järn (Björkqvist, 1987).

Med detta sagt, är det tänkbart att kalkning med mald kalksten kan användas och vara till nytta i vattendrag som är påverkade av sura sulfatjordar endera endast i ringa omfattning eller är små och därmed har liten vattenföring, vilket också föreslagits tidigare (Ruiz, 2004). Sådana åtgärder är tänkbara och kan övervägas i biologiskt särskilt känsliga miljöer, där dels en liten höjning av pH i ett vattendrag endast marginellt påverkat av sura sulfatjordar kunde ha stor positiv verkan, och dels i små vattendrag som bidrar med särskilt sura och metallrika vatten och därmed kan ha stor inverkan långt nedströms i större vattendrag. Den bästa utgångspunkten är att mäta inte enbart vattnets pH, utan även aciditet som anges i mmol/l. Utifrån aciditetsbestämning kan sedan kalkdoseringen beräknas, så att 2 mol aciditet motsvarar 1 mol CaCO₃. Alternativet är att göra laboratorietest där vatten från vattendraget neutraliseras med gradvis tillsats av neutraliseringsmedlet (Björkqvist, 1987).

Kalkfilterdike

Detta är ett täckdike i vars fyllnadsjord det blandats in kalciumoxid (i storleksordningen 5–10 %). Den tänkta effekten är dubbel. För det första åstadkoms ett basiskt lager intill och ovanför täckdiket vilket ska buffra det sura vattnet som runnit från jorden fram mot täckdiket, och för det andra ska den tillsatta substansen förbättra de hydrologiska egenskaperna på fyllnadsjorden så att den får bättre vattengenomsläpplighet.

I ett laboratorieexperiment som gick ut på att låta ett syntetiskt sulfatjordsvatten (pH 3,2 och höga halter av Al, Fe och Mn) rinna genom en kalkfilterblandning visades att effekten att hålla pH > 5,0 var dubbelt längre i blandning med 10 % CaO än 5 % CaO och att frigörelse av metaller var mycket liten framtill att pH sjönk ner mot och under 5,0 (Weppling, 1997). Detta visar att metoden har potential att ge god effekt om CaO-inblandningen är tillräckligt stor. Det är också möjligt att beräkna teoretiskt hur långvarig effekten kan vara under fältförhållanden, d.v.s. på en normal sur sulfatjord med täckdiken med en täthet av 600 m/ha, djup på 1,0 m och bredd på 0,3 m samt 10 % Ca i fyllnadsjorden (kalkfilterdike) skulle effekten vara 10 år vid en avrinning på 300 mm/ha (Weppling, 1997). Under verkliga förhållanden finns emellertid flera faktorer som påverkar systemet, såsom att allt vatten inte rinner genom kalkfilterdiket, kalciumoxidens kapacitet begränsas t.ex. av järnfällningar, och variationer i jordens totala förråd av aktiv och potentiell surhet.

Praktiska fältförsök har också gjorts, med varierande resultat och påvisad effekt. På en sur sulfatjord i Laitila, Finland, var pH kring 1,5 enheter högre i vatten från kalkfilterdike än från referensfält med traditionell täckdikning det första året efter att anordningen togs i bruk, men efter tre år var skillnaderna i stort sett uttraderade och pH alltså ungefär lika lågt i båda systemen (Triipponen, 1997). Även på en sur sulfatjord i Tupos, Finland, var aciditeten (meq/l) betydligt (c. 50 %) lägre från kalkfilterdike det första året efter installation, dock var aciditeten i absoluta värden periodvis mycket hög också från kalkfilterdiket (Weppling, 1997). På en sur sulfatjord i Korsholm (Mustasaari), Finland, med ett genomsnittligt pH-värde på 3,7 i vatten från konventionellt täckdike fanns ingen effekt av kalkfilterdike på intilliggande fält från vilket pH var likaledes 3,7 och metallhalterna oförminskade (Astrom et al., 2007; Barlund et al., 2005). Däremot på en sur sulfatjord i Ilmajoki, Finland, med ett genomsnittligt pH-värde på 4,3 i vatten från konventionellt täckdike fanns en tydlig effekt av kalkfilterdike på intilliggande fält från vilket pH stigit till 5,9 och halterna av aluminium, järn och mangan sjunkit signifikant; en effekt som bestod ännu efter fyra år när den hydrokemiska uppföljningen avslutades (Barlund et al., 2005). Sammanfattningsvis indikerar dessa fältstudier att kalkfilterdikets effekt på längre sikt än 1–2 år kan vara relaterat till jordens lager av sulfid och aciditet. Detta i sin tur kan innebära att tekniken kan vara lämpad för sura sulfatjordar som inte är av den värsta sorten i termer av kapacitet att försura och frigöra metaller, men kan vara ett alternativ för jordar med en förhållandevis låg initial sulfidhalt eller som efter decennier av urlakning har mist en betydande del av sin aciditet.

Tekniken har tillämpats i rätt stor omfattning på åkrar på sura sulfatjordar i Finland, men uppföljningen har emellertid varit bristfällig med avseende både på mätning av pH/aciditet/metaller i utgående vatten efter installation och exakt information kring hur kalkfilterdikena byggts (bl.a. hur mycket CaO som tillsatts och i vilken koncentration i förhållande till fyllnadsjorden). Fler undersökningar och uppföljningar kring denna teknik vore därför önskvärda. Dessutom kan stöd

numera sökas i Sverige för att inrätta kalkfilterdike, vilka lämpligen byggs i samband med täckdikning, även om stödet är utformat för att förbättra markstrukturen och minska förlusterna av partikulärt fosfor och inte för att minska läckaget av syra och metaller från sura sulfatjordar. Kostnaderna för kalkfilterdiken på sur sulfatjord i Finland har uppskattats vara ungefär dubbelt så höga som för konventionell täckdikning (Nuotio, 2009).

Reglerbar dränering och underbevattning

Reglerbar dränering kan generellt rekommenderas för åkermark på sura sulfatjordar som är dränerade, eller ska dräneras, med hjälp av täckdiken. Orsaken är den potentiella nyttan för både odlingen och miljön, d.v.s. mer vatten/fukt kan hållas kvar i jorden under torra somrar vilket gynnar grödans tillväxt och missgynnar oxidation av sulfider och därmed bildningen av syra. I Finland, där reglerbar dränering använts för dessa syften, har kostnaderna för denna teknik uppskattats vara 20–30 % högre än vid normal täckdikning (Nuotio, 2009). För optimal effektivitet, bör plastfilm läggas ner vertikalt vid åkerns yttre gränser, till ett djup som når ner i den reducerade zonen (Figur 3). Teknik för detta har utvecklats i Finland; se bild 4 (foto) i projekt-rapport (Bonde, 2022) och Figur 2 (schematisk bild) i vetenskaplig artikel (Österholm et al., 2015).

Några få studier har på ett systematiskt sett studerat miljöeffekterna av reglerbar dränering. På en sur sulfatjord i Korsholm (Mustasaari), Finland, med ett genomsnittligt pH-värde på 3,7 i vatten från konventionellt täckdike hade den kontrollerade dräneringen som installerats på intilliggande fält, under de tre år som monitoreringen pågick, ingen effekt på pH men åstadkom en liten effekt i form av något minskade koncentrationer av aciditet, sulfat och aluminium (Astrom et al., 2007; Barlund et al., 2005). Dock, grundvattenytan i fältet med reglerbar dränering låg inte högre än på fältet med normal täckdikning, vilket visar att den reglerbara dräneringen inte fungerat tekniskt. Däremot på en sur sulfatjord i Ilmajoki, Finland, med ett genomsnittligt pH-värde på 4,3 i vatten från konventionellt täckdike hade det intilliggande fältet med reglerbar dränering signifikant högre pH (4,6) och signifikant lägre halter av aciditet, sulfat, mangan, järn och aluminium under de fyra år som monitoreringen pågick (Barlund et al., 2005). I ett ambitiöst projekt med 12 års uppföljning på sura sulfatjordar på Söderfjärden, Finland, medförde den reglerade dräneringen, i förhållande till normal täckdikning, högre grundvattenyta (om än mycket låg under årets torraste perioder) och i utgående vatten högre pH och lägre halter av aciditet, sulfat och aluminium (Bonde, 2022; Österholm et al., 2015). Skillnaderna mellan fälten var emellertid inte stora, och en förbättring i vattenkvaliteten över tid kunde ses både på fältet med och utan reglerbar dränering (Bonde, 2022).

Att studera miljöeffekterna av reglerbar dränering är förhållandevis svårt och heller inte helt nödvändigt. Svårigheten består i att tekniken inte omfattar någon neutralisationskemikalie utan bygger på minskad sulfidoxidation (och därmed minskad syraproduktion) över tid vilket gör att effekterna, även om de också noterats på kort sikt, förväntas bli påtagliga särskilt på lång sikt. Eftersom inga kemikalier används finns inga tänkbara bieffekter och så länge tekniken sköts på rätt sätt, kan den enbart ge en vinn-vinn situation för miljön och jordbruket. Eftersom kostnaderna inte heller är mycket större än vid normal täckdikning, borde den reglerade dräneringen alltid tillämpas vid ny täckdikning eller renovering av den befintliga täckdikningen på åker med underliggande sur sulfatjord.

Underbevattning, i den mån den är möjlig på ett givet jordbruk eftersom den kräver extern vattenkälla (vattenförekomst som inte torkar ut under torrperioder), är ett ypperligt komplement till den reglerade dräneringen, eftersom den framförallt kan förhindra en större sänkning av grundvattenytan under torra somrar, vilka kan förväntas bli mer frekventa framöver i ett förändrat klimat. En sådan åtgärd mot torka och extra lågt grundvatten är särskilt viktig eftersom kvarvarande sulfid, och därmed potentiell aciditet, i jorden nästan alltid är högre i djupare än ytligare skikt. Därtill är en underbevattning ett givet positivt inslag för odlingen de år sommaren blir särskilt torra. En fältstudie där undervattning tillämpades visade hur grundvattennivån kan hållas mycket högre och stabilare än i fält med normal täckdikning och reglerbar dränering (Österholm et al., 2015).

Injicering av kalkstenssuspension

Detta är en ny teknik som är under utveckling och utvärdering på en åker på sura sulfatjordar söder om Vasa i Österbotten (Risöfladan). Arbetet har initierats och leds av Yrkehögskolan Novia i Vasa (Dr Sten Engblom, Dr Eva Högfors-Rönnholm och Pekka Sten), i samarbete med Åbo Akademi (prof. Peter Österholm) och Yrkesakademin i Österbotten (Anders Grannas). Tekniken kallas Precikem och finns beskriven, inklusive länkar/referenser till broschyrer och vetenskapliga publikationer, på <https://precikem.eu/hem/>.

Tekniken går ut på att under sensommaren eller tidig höst när grundvattennivån är låg injicera en kalkstenssuspension (som produceras i fält) i brunnar som är anslutna till täckdiken, d.v.s. ett system med reglerbar dränering (Figur 10). Därmed används täckdikessystemet, som är byggt för att leda bort vatten från åkern, i omvänd riktning, d.v.s. för att leda in suspension av kalkstenen direkt i den sura sulfatjorden. Härvid är tanken att uppnå flera positiva effekter, som inte kan åstadkommas vid kalkning av ytjorden eller via kalkfilterdiken, d.v.s. kalkstenen: (i) hamnar inne i den del av jorden där aciditeten är hög (och pH lågt) och kontinuerligt bildas, (ii) lägger sig på sprickytor som det vatten som rinner ut från jorden är i kontakt med och jämviktas mot (Figur 11), och (iii) är finkornig och därmed mer reaktiv mot surhet än grovkorniga varianter som appliceras i traditionell kalkning av ytjorden.

Med tanke på att denna teknik verkar direkt mot försurningen där den förekommer och bildas, är den särskilt intressant. Det är därför önskvärt att den skulle testas också i Sverige, helst inledningsvis i ett utvecklings & forskningsförsök, för att precisera bl.a. kostnader och tekniska utföranden. Noteras bör att denna teknik förutsätter reglerbar dränering, vilket i sig innebär att den kan kombineras med de positiva effekter som regleringen kan/bör medföra och eventuellt också med underbevattningens positiva effekter. Kombination av dessa tre tekniker är, av allt att döma, den bästa metoden som i nuläge finns för att minska läckage av syra och metaller från åkrar på sura sulfatjordar.



Figur 10. Produktion och injicering av kalkstenssuspension i täckdikningssystem på en åker med sura sulfatjordar i Österbotten (Risöfladan). Foto: Mats Åström.



Figur 11. Utfällning av vitfärgad kalksten på sur och järnrik sprickyta i sur sulfatjord i Österbotten (Risöfladan), efter att kalkstenssuspension injicerats i jorden. Foto: Sten Engblom.

2.10 Restaurering av sur sulfatjord till våtmark: risker och rekommendationer

Det går inte generellt att säga huruvida restaurering av sur sulfatjord till våtmark har övervägande positiva eller negativa miljögeokemiska effekter. På sikt kommer pH att stiga vilket leder till minskad mobilisering av flera toxiska metaller (bl.a. Al, Mn, Ni, Cd och Be) och därmed avtagande spridning av surhet och metaller till närmiljön, framförallt till vattendrag. Detta är positiva miljögeokemiska effekter. På sikt kommer, i motsatt riktning, järn att alltmer frisättas och bli upplöst i vattnet i våtmarken och därmed även vara tillgängligt för transport ut från densamma. Samma fenomen som för järn, men i mindre omfattning, är att förvänta bl.a. för arsenik, krom och uran. Detta är negativa miljögeokemiska effekter. Huruvida den positiva eller negativa effekten kommer att överväga beror i huvudsak på den sura sulfatjordens geokemiska status. För en sur sulfatjord med stort kvarvarande förråd av järnsulfid och därmed förurningspotential, vilket är att förvänta i unga eller dåligt dränerade jordar, är det gynnsamt med återvätning eftersom det förhindrar fortsatt eller tilltagande sulfidoxidation, förurning och frigörelse av metaller som aluminium, mangan, nickel, kadmium och beryllium. Däremot i en mer utvecklad sur sulfatjord där förrådet av järnsulfid påtagligt minskat och aciditeten följaktligen kanske lättat men förrådet av sekundära järnmineral vuxit stort, kan de negativa miljögeokemiska konsekvenserna mycket väl överträffa de positiva. På grund av dessa sammanhang, rekommenderas att den sura sulfatjorden karakteriseras innan initiativ till återvätning tas, framförallt avseende förrådet av järnsulfid och sekundära järn(III)-mineral samt aciditet i jorden. På basen av resultaten kan sedan en generell riskanalys genomföras. För att med större precision kunna genomföra en sådan riskanalys krävs fastställande av riktgivande värden för förekomst av järnsulfid, sekundära järn(III)-mineral och aciditet i sura sulfatjordar. Detta kräver forskningsinsatser och uppföljning av pilotområden där sur sulfatjord restaurerats till våtmark.

2.11 Framtida behov

Studien har identifierat några teman som vore önskvärda att undersöka vidare:

- Orsaken till och karaktären (specieringen) av de extremt höga svavelhalterna som påträffades i flera jordar i syd/sydöst.
- Detaljkarteringar av sura sulfatjordar i kusttrakterna i södra Sverige, i likhet med vad som gjorts i kusttrakterna norröver (Västerbotten och Norrbotten i huvudsak) och här testats kring Hjälmarén.
- Omfattning av sura sulfatjordar i områden ovanför högsta kustlinjen där utveckling av denna jordmån kan tänkas ske framförallt på marker som blottlagts efter sjösänkningar eller där moränen är svavelhaltig.
- Återvätning av sur sulfatjord i biologiskt mindre känsliga områden, t.ex. där våtmarkens utlopp leder direkt till havet eller älv, för att kunna detaljstudera i vilka mängder/koncentrationer och med vilken hastighet järn (och arsenik, krom och uran) frigörs och läcker.
- Test och utveckling av tekniker för att minska syra och metalläckage från sura sulfatjordar, med fokus på kalkfilterdike, reglerbar dränering (plus underbevattnings) och injicering av kalkstenssuspension baklänges i täckdiken.

Källhänvisning

1. Åbjörnsson, K., Stenberg, M., Sohlenius, G., 2018. Järn- och aluminiumurlakningar från invallningar – en undersökning av tre områden i Skåne. Länsstyrelsen Skåne.
2. Astrom, M., 1998. Partitioning of transition metals in oxidised and reduced zones of sulphide-bearing fine-grained sediments. *Applied Geochemistry*, 13(5): 607–617.
3. Astrom, M., Astrom, J., 1997. Geochemistry of stream water in a catchment in Finland affected by sulphidic fine sediments. *Applied Geochemistry*, 12(5): 593–605.
4. Astrom, M., Osterholm, P., Barlund, I., Tattari, S., 2007. Hydrochemical effects of surface liming, controlled drainage and lime-filter drainage on boreal acid sulfate soils. *Water Air and Soil Pollution*, 179(1–4): 107–116.
5. Barlund, I., Tattari, S., Yli-Halla, M., Astrom, M., 2005. Measured and simulated effects of sophisticated drainage techniques on groundwater level and runoff hydrochemistry in areas of boreal acid sulphate soils. *Agricultural and Food Science*, 14(1): 98–111.
6. Becher, M., Sohlenius, G., Öhrling, C., 2019. Sur sulfatjord – egenskaper och utbredning. SGU rapport 2019: 13.
7. Björkqvist, D., Weppling, K., 1987. Liming as a method to neutralize highly acidic drainage waters from sulphate basins in western Finland. *Proceedings of International Symposium on Acidification and Water Pathways*, Bolkesjö, 1: 365–374.
8. Boman, A., Becher, M., Mattbäck, S., Sohlenius, G., Auri, J., Öhrling, C., Edén, P., 2018. Klassificering av sura sulfatjordar i Finland och Sverige. Geologiska Forskningscentralen, Finland.
9. Bonde, A., Nässlin, S., Nystrand, M., Lappalainen, M., 2022. Modeller för vattenbalans inom KLIVA-projektet. Rapport KLIVA-projektet: 32 p.
10. Edén, P., Weppling, K., Jokela, S., 1999. Natural and land-use induced load of acidity, metals, humus and suspended matter in Lestijoki, a river in western Finland. *Boreal Environment Research*, 4: 31–43.
11. Isaksson, A., 2023. Verifiering av modellerad förekomst av sura sulfatjordar i Mälardalen. Examensarbete i geografi. Stockholms universitet. FULLTEXT02 (diva-portal.org).
12. Lax, K., 2005. Stream plant chemistry as indicator of acid sulphate soils in Sweden. *Agricultural and Food Science*, 14(1): 83–97.
13. Lindgren, A., Jonasson, I.K., Öhrling, C., Giese, M., 2022. Acid sulfate soils and their impact on surface water quality on the Swedish west coast. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 40.
14. Nordmyr, L., Osterholm, P., Astrom, M., 2008. Estuarine behaviour of metal loads leached from coastal lowland acid sulphate soils. *Marine Environmental Research*, 66(3): 378–393.

15. Nuotio, E., Rautio, L.-M., Zittra-Bärsund S., 2009. På väg mot kontroll av de sura sulfatjordarna – Förslag till riktlinjer för minskning av de olägenheter som sura sulfatjordar orsakar. Jord- och Skogsbruksministeriet Finland, Arbetsgrupps-promemoria, 8a.
16. Nyman, A., Johnson, A., Yu, C.X., Dopson, M., Åström, M., 2023. Multi-element features of active acid sulfate soils across the Swedish coastal plains. *Applied Geochemistry*, 152.
17. Nystrand, M.I., Osterholm, P., 2013. Metal species in a Boreal river system affected by acid sulfate soils. *Applied Geochemistry*, 31: 133–141.
18. Österholm, P. et al., 2015. Groundwater management of acid sulfate soils using controlled drainage, by-pass flow prevention, and subsurface irrigation on a boreal farmland. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 65: 110–120.
19. Palko, J., Weppling, K., 1994. LIME REQUIREMENT EXPERIMENTS IN ACID SULFATE SOILS. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 44(3): 149–156.
20. Persson, L., Thorsbrink, M., Wickström, L., Pile, O., Maxe, L., Erlström, M., , 2020. Helikopterburna TEM-mätningar i Örebro län – Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning. SGU-rapport 2020:41.
21. Rautio, M., Aaltonen, E.-K., Storberg, K.-E., 2006. Preliminärt skötselprogram för Kyrö älvs vattendragsområde. Västra Finlands Miljöcentral, Regionala miljöpublikationer, 419: 78 p.
22. Ruiz, J., Bonde, A., 2004. Markförsurningen vid Närpes ås vattendragsområde och dess inverkan på vattenkvaliteten. Västra Finlands Miljöcentral, 110: 109 p.
23. Shahabi-Ghahfarokhi, S. et al., 2022. Extensive dispersion of metals from hemiboreal acid sulfate soil into adjacent drain and wetland. *Applied Geochemistry*, 136.
24. Sohlenius, G., Bastani, M., Persson, L., Lax, K., 2009. On the recognition of areas with problematic sulphidic sediments using multi-disciplinary data. *Environmental Geology*, 56(5): 973–984.
25. Toivonen, J., Österholm, P., Fröjdö, S., 2013. Hydrological processes behind annual and decadal-scale variations in the water quality of runoff in Finnish catchments with acid sulfate soils. *Journal of Hydrology*, 487: 60–69.
26. Triipponen, J.-O., 1997. Sirppujoen valuma-alueen happamuustutkimus (Acidity study of the Sirppujoki catchment). In Finnish. Lounais-Suomen Ympäristökeskus: 43 p.
27. Weppling, K., 1997. On the assessment of feasible liming strategies for acid sulphate waters in Finland. PhD theses, University of Tartu, Estonia.
28. Yli-Halla, M., Puustinen, M., Koskiahio, J., 1999. Area of cultivated acid sulfate soils in Finland. *Soil Use and Management*, 15(1): 62–67.
29. Yu, C.X., Högfors-Rönholm, E., Stén, P., Engblom, S., Åström, M.E., 2023. Iron-sulfur geochemistry and acidity retention in hydrologically active macropores of boreal acid sulfate soils: Effects of mitigation suspensions of fine-grained calcite and peat. *Science of the Total Environment*, 856.

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Sura sulfatjordar i Sverige

Ny kunskap och underlag för åtgärder

Sura sulfatjordar förekommer främst i kustområden under högsta kustlinjen. I detta projekt har dessa jordar kartlagts, och deras geokemiska och mikrobiologiska egenskaper har bestämts. Som grund för åtgärder för att minska syra- och metallläckaget från sulfatjordarna har en litteraturstudie över befintliga miljöfrämjande tekniker genomförts.

Projektet har också belyst risker vid återvätning. Det har allmänt antagits att återvätning av sulfatjordar har enbart positiva miljöeffekter, men projektet har visat att det finns risk för miljöskadligt läckage av järn.

Projektet har finansierats med medel från Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag som finansierar forskning till stöd för Naturvårdsverkets och Havs- och vattenmyndighetens kunskapsbehov.