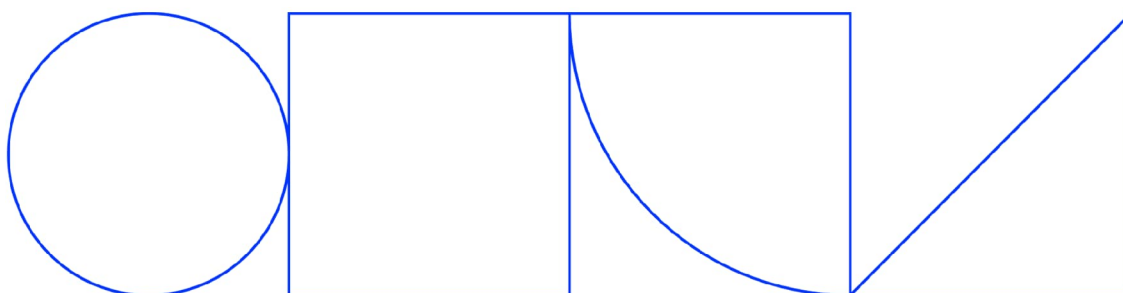


SULFIDJORD

KARTLÄGGNING OCH KARAKTERISERING I SÖDRA SVERIGE

Josef Mácsik Ecoloop, Karin Hermansson NCC Sverige AB, Ramesh Kumar Thakur och
Christian Maurice, Luleå tekniska universitet

2025-11-25



Förord

Detta projekt har genomförts av NCC Sverige AB i samarbete med Ecoloop, Ltu, PEAB och WRS under tiden från november 2024 till november 2025. Det finansierades av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF (SBUF projekt 14433) och de medverkande organisationerna. Projektledare var Josef Mácsik Ecoloop och Karin Hermansson, NCC Sverige. Huvudförfattare till rapporten var Josef Mácsik Ecoloop, Christian Maurice och Ramesh Kumar Thakur Luleå tekniska universitet samt Karin Hermansson NCC Sverige AB

Projektets arbetsgrupp har bestått av följande personer:

Josef Mácsik Ecoloop
Karin Hermansson NCC Sverige
Christian Maurice Luleå tekniska universitet
Ramesh Kumar Thakur Luleå tekniska universitet
Dimitri van der Nat WRS AB
Jessica Stjernholm Swerock
Mikaela Lindberg NCC Sverige AB
Anna Berg/ Matz Jönsson Forssell, Peab AB

Referensgruppen har sammanträtt vid två tillfällen; 2025-02-18 och 2025-09-03. Den har bestått av:

Malin Norin, Skanska AB
Jörgen Aronsson Umeå deponi AB
Åsa Lindgren Trafikverket

Projektgruppen vill tacka SBUF, NCC Sverige AB samt medverkande organisationer för projektets finansiering. Vi vill också tacka alla deltagare i referensgruppen för värdefulla inspel och stöd under projektets gång.

Göteborg, november 2025
Karin Hermansson

Stockholm, november 2025
Josef Mácsik

Sammanfattning

Sulfidjordar från olika delar av södra Sverige, söder om Uppsala, Mälardalen, Kalmar, Göteborg och Uddevalla har undersökts och jämförts med motsvarande jordar längre norrut. Genom analyser av bland annat svavel, järn, kalcium och pH har det kunnat konstateras både likheter och skillnader mellan regionerna. Resultaten visar till exempel att jordarna i södra Sverige ofta innehåller mer kalcium, vilket gör att de har en bättre naturlig buffringsförmåga mot försurning. Tester som MRM och inkubation användes för att bedöma hur snabbt och hur mycket pH sjunker när jorden utsätts för syre, och på så sätt kan man avgöra om den riskerar att utvecklas till sur sulfatjord. I detta projekt har över 600 provers analys på innehåll av svavel, järn, kalcium, samt pH ingått. Av dessa är ca 180 prover från södra Sverige, från Uppsala och söderut. Resterande prover är från Umeå och norrut.

Sulfidjordar från södra Sverige (Uppsala och söderut) har i detta projekt karakteriserats och jämförts med referensjordar från norra Sverige genom analyser av totalhalter (S, Fe, Ca, pH) samt fördjupade lakningsförsök med tre etablerade metoder för att bedöma försurningspotential: MRM-105C, MRM-24C och inkubationstest. Resultaten visar att sulfidjordar i södra Sverige generellt uppvisar högre kalciumhalter och därmed större buffringskapacitet, jämfört med motsvarande jordar längre norrut. Detta återspeglas i samtliga testmetoder, där jordar från exempelvis Göteborg och Kungsbacka uppvisar stabil pH-utveckling under både inkubationscykler och MRM-lakning, medan jordar med lägre Ca/S-kvot, visar tydlig pH-sänkning vid oxidation.

De tre testmetoderna ger kompletterande information om oxidationshastighet och maximal försurningseffekt. MRM-105C ger genomgående lägst uppmätta pH-värden och utgör därmed den mest konservativa bedömningen av försurningsrisken, medan MRM-24C och inkubationstestet bättre avspeglar mer naturliga oxidationsförhållanden genom långsammare cykler för oxidation och buffring, bevarad fukthalt och mikrobiell aktivitet.

Rapporten föreslår bedömningsgrunder anpassade för södra Sverige, där man tydligare kan skilja mellan massor som behöver särskild hantering och sådana som kan användas på plats. Målet är att skapa ett säkrare och mer resurseffektivt sätt att hantera dessa jordar i bygg- och anläggningsprojekt.

- Projektet visar att sulfidjordar i södra Sverige har högre kalciumhalt och därmed högre buffringsförmåga än motsvarande jordar i norr.
- En ny bedömningsgrund med Ca/S-gräns 1,7 har föreslagits för södra Sverige.
- Resultaten kommer att integreras i Optimass-verktyget och kan användas direkt vid klassningsarbete.

Resultaten visar tydligt att Ca/S-kvoten är den viktigaste indikatorn för buffringsförmåga, där projektet föreslår en gräns på 1,7 för södra Sverige, vilket avsevärt skiljer sig från behovet av Ca/S-kvot ≥ 5 för motsvarande bedömning i norra Sverige. Sulfidjordar i södra Sverige med Ca/S-kvot över 1,7 och svavelhalter under 10 000 mg/kg TS indikerar ingen försurning i MRM-105C. Detta möjliggör återanvändning utan större risk för sur sulfatjordbildning.

Projektet bidrar till förbättrade och regionalt anpassade bedömningsgrunder för försurningsrisk samt ger underlag för vidareutveckling av det digitala klassningsverktyget Optimass, som därmed blir bättre kalibrerat för sulfidjordar i södra Sverige. Detta möjliggör säker selektiv bedömning och därmed, där det är tekniskt möjligt selektiv hantering. Detta i sin tur kan bidra till minskad deponering, kortare masstransporter och ökad cirkularitet i bygg- och anläggningsprojekt.

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
1.1	Bakgrund.....	5
1.2	Syfte	6
1.3	Mål.....	6
1.4	Metod.....	7
1.5	Avgränsningar	8
2	Sulfid- och sulfatjordjord	8
2.1	Allmänt.....	8
2.2	Uppkomst.....	8
2.3	Förekomst i Sverige.....	8
3	Genomförande.....	9
3.1	Lokaler	10
3.2	Testmetoder	10
4	Resultat.....	11
4.1	Metodutveckling	11
4.2	Försurningspotential	14
4.3	Buffringskapacitet.....	17
5	Analys	19
6	Slutsats	22
7	Utvecklings- och forskningsbehov	23
7.1	Jordarters egenskaper och variation	23
7.2	Geografiska kunskapsluckor.....	24
7.3	Praktisk hantering och användning	24
8	Litteraturförteckning / referenser.....	24
Bilaga 1	Indelning av sulfidjord utifrån försurningspotential	25
Bilaga 2	Testresultat MRM- och inkubationstesterna.....	26
Bilaga 3	Ordlista.....	28
Bilaga 4	Provtagningsmanual av sulfidjord.....	30

1 Inledning

Förekomst av sulfidhaltiga jordar i samband med bygg- och anläggningsprojekt har länge varit ett känt problem i norra Sverige, särskilt längs Norrlandskusten. På senare år har det dock blivit tydligt att även Svealand och Götaland har områden med sulfidjord, vilket ställer nya krav på hantering och bedömning av dessa jordmassor. Projektet syftar till att öka kunskapen om sulfidjordars egenskaper i södra Sverige (från Uppsala, Mälardalen, Kalmar och på västkusten från Göteborg, Kungsbacka till Uddevalla) och att vidareutveckla ett digitalt bedömningsverktyg som kan användas för att avgöra försurande potential i dessa jordar. Genom detta arbete kan hanteringen av sulfidjord effektiviseras, vilket i sin tur kan leda till minskade kostnader, ökad cirkularitet och minskad klimatpåverkan.

1.1 Bakgrund

Förekomst av sulfider i jord och berg i samband med bygg- och anläggningsprojekt leder ofta till att återanvändning av de uppschaktade massorna försvåras och ger ökade kostnader. Orsaken till detta är att det ofta finns en osäkerhet i hur massorna ska hanteras miljömässigt på bästa sätt. När sulfidjord grävs upp och kommer i kontakt med luft sker oxidation vilket leder till att vätejoner frisläpps och sur sulfatjord kan bildas. Om jorden blir mycket sur så kan detta leda till försurning av marker och vattendrag vilket i sin tur leder till död av levande organismer. Förekomst av sulfidjord har tidigare främst varit en fråga i samband med bygg- och anläggningsprojekt längs Norrlandskusten. Det är allmänt känt att sulfidjord förekommer i kustområdet från Haparanda till Uppsala och på motsvarande sätt på finska sidan av Bottenviken.

I tidigare projekt har sulfidjordar från Umeå i söder till Boden i norr undersökts och samlat resultat därifrån kommer att användas som referens, med ca 500 analysvar. Dessa sulfidjordsprover analyserades med avseende på svavel-, järn-, kalciumhalt, samt pH direkt vid provtagningstillfället och efter lufttorkning under 24 timmar. Några av dessa undersöktes vidare med MRM-metoden som beskrivs i detalj i rapporten TRV (2007):100 – Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor.

Ett annat utvecklingsprojekt som finansierades av SBUF och Trafikverket utvecklades bland annat ett bedömningsverktyg för att göra bättre bedömningar vid karakterisering av sulfidjord (Trafikverket 2023, SBUF 13946). Baserat på vunnen kunskap utvecklades även ett digitalt, webb-baserat verktyg som kan användas av entreprenörer, deponiägare och andra aktörer för att utifrån analyser av jordprover kunna bedöma sulfidjordens försurningspotential (Optimass.se).

På senare år har kännedomen om sulfidjordars förekomster ökat och det har visat sig att även Svealand och Götaland har sulfidjordar. Sulfidjord påträffas i Mälardalen och Storstockholmsområdet och har i enstaka fall även konstaterats i Småland, Blekinge, Skåne och västkustområdet. Det har också nyligen genomförts ett doktorandprojekt där flera lokaler i Svealand och Götaland har undersökts och där så kallad potentiellt försurande sulfatjord (dvs sulfidjord) har konstaterats (2023 Nyman Stoten.pdf). Detta är ny kunskap och det sker normalt sett ingen provtagning med avseende på försurande egenskaper i samband med bygg- och anläggningsprojekt i dessa regioner. Analysresultat för jordprover från sulfidjordar indikerar dock att vissa jordar kan ha högre och andra jordar lägre försurningspotential än jordar längs norrlandskusten. De senare nämnda jordarna har lägre försurningspotential tack vare en förhöjd, naturlig, förekomst av kalcium. Osäkerheten har lett till att bygg- och anläggningsprojekt i södra Sverige som påträffar sulfidjord först har fått stopp i produktionen och sedan efter fördjupade utredningar har kunnat konstatera att massorna saknade försurande egenskaper och därmed

kunde hanteras som normal lera. Därmed behöver massorna inte deponeras vilket i många fall innebär en ökad cirkularitet, kortare masstransporter och minskad klimatpåverkan.

Sammanfattningsvis så är problemet med försurande sulfidjordar inte lika utbrett i Svealand och Götaland men i de fall de förekommer så saknas anpassat stöd för hur de ska bedömas och hanteras. Det finns ett behov av en säkrare hantering av sulfidhaltiga massor i projekt vilket kan åstadkommas med ökad kunskap om sulfidjordars förekomst och sammansättning i södra Sverige så att dagens bedömningsverktyg kan anpassas utifrån jordförhållanden (kalkhalt mm) som råder i södra Sverige och hjälpa branschen. Med ökad kunskap ges större möjlighet för en selektiv hantering av sulfidjordar som är försurande respektive icke försurande.

1.2 Syfte

I projektet ingår att undersöka inom vilka geografiska områden i Svealand och Götaland det kan vara relevant med provtagning för försurande egenskaper samt vidareutveckla det digitaliserade bedömningssystemet Optimass.

1.3 Mål

Målsättningen är att anpassa bedömningsverktyget (<https://www.optimass.se>) även för sydliga sulfidhaltiga jordar och därmed underlätta entreprenörers och konsulters arbete med att bedöma och hantera så kallade sulfidjordar.

Önskade effekter av projektet är att öka kunskapen om sulfidjordars förekomst i södra Sverige, minska onödiga produktionsstopp, minska deponi- och transportkostnader, samt minska klimatpåverkan från masstransporter, och miljömässiga komplikationer under och efter byggskedet.

- Minska affärsrisken, dvs entreprenörens möjlighet att bedöma hanteringsalternativen och dess kostnader ökar osäkerheten och chansen att projektet stannar minskar
- Optimera hanteringen av sulfidjord
- Minska transporter genom ökad användning av sulfidjord.
- Med bedömningssystemet möjliggöra för en selektiv hantering av sulfidjord utifrån försurningsegenskaper
- Ge entreprenörer tillgång till bedömningsmetodiken för schaktning i sulfidjord

Behovsägare och vilka som kan få nytta av resultaten:

Projektets behovsägare är exploatörer, infrastrukturförvaltare, entreprenörer, konsulter och tillsynsmyndigheter. Infrastrukturprojekt kommer att schakta tiotusentals ton sulfidjord per år under de närmaste åren. Den södra delen av Sverige saknas i dagsläget uppfattning om omfattningen av sulfidjord och därmed är mottagningskapaciteten och hanteringsalternativen begränsade.

Transport- och hanteringskostnaden till deponi ligger idag runt 1000 kr/ton. Trafikverket är exempel på problemägare som i och med infrastrukturens utbyggnad kommer att behöva schakta i områden med sulfidjord.

Entreprenörer som hanterar sulfidjord behöver en kontrollmetod för att kunna friklassa sulfidjord som inte orsakar försurning och hantera schaktmassor som klassas som sulfidjord utan att byggprojektet drabbas av fördröjande förseningar. Dagens metodik leder till att schaktmassor

klassade som sulfidjord ofta skickas till mottagningsanläggning för avfall. Projektet möjliggör en snabb och tillförlitlig bedömning av sulfidjord utifrån försurande egenskap. Samtidigt finns det områden där fyllnadsmassor av kvalitetssäkrad sulfidjord kan ersätta resurser, exempelvis bullervallar, skyddsskiktssmassor vid sluttäckning av deponier etc.

Selektiv schaktning och säker hantering av sulfidjordsmassor är slutmålet. Med en selektiv hantering av sulfidjord kan ca 70 % av sulfidjordsmassorna hanteras på plats utan transporter och deponeringskostnader. Dessa massor kan användas till enklare konstruktioner som bullervallar etc. Trots merkostnader som selektiv schaktning och fältkontroll medför, kan kostnaden per ton jord minskas från ca 1000 kr/ton till 200-400 kronor. Detta betyder en stor intjäningsgrad för beställaren samtidigt som man minskar transporter med betydligt lägre CO₂-utsläpp som följd. Entreprenören får samtidigt möjlighet att ta betalt för sina tjänster (selektiv schaktning och hantering). Det digitala bedömningssystemet som tas fram i projektet kommer att testas i flertal projekt och har en stor potential att kunna användas av alla projekt som hanterar sulfidjord.

Konkurrerande lösningar som används idag är när sulfidjord med och utan försurningspotential används som basmaterial till tillverkning av anläggningsjord. Det bör noteras att 1 ton sulfidjord ger mer än 1 ton anläggningsjord. Sulfidjord blandas ut med sand och annan jordfraktion (med skopa/skopblandare) för att uppfylla AMA-krav. Marknaden för anläggningsjord är också begränsad, vilken kan leda till överproduktion i och med begränsad avsättningsmarknad. Den största avsättningen är grustag och bergtäkt som ska efterbehandlas med täckmassor. Även detta förfarande är riskfyllt om olämpliga schaktmassor med försurande egenskaper används. Det betyder att i framtiden kommer jordtillverkning, täckning av deponi och täkter bli beroende av ett tillförlitligt bedömningssystem som minskar risken för att olämpliga sulfidjordar används felaktigt.

1.4 Metod

Projektet har genomförts med fältprovtagning, laboratorieanalyser av totalhalter samt lakning och vidareutveckling av digitala bedömningsverktyget (Optimass). Provtagning har genomförts i utvalda områden i södra Sverige, inklusive Uppsala, Storstockholm, Västerås, Kalmar och Göteborgsområdet. Provtagning har främst utförts inom projektdeltagarnas löpande projekt i samband med jordprovtagning i syfte att föroreningskontrollera jordmassor och inte i direkt syfte att kontrollera sulfidlera. Därmed har provtagningsförfarandet varit skruvborrprovtagning eller schaktprovtagning (störda prover). Jordproverna har analyserats med avseende på svavel-, järn- och kalciumhalter samt pH, både vid provtagningstillfället och efter lufttorkning. Utvalda prover har därefter undersökts vidare med tre metoder för att bedöma försurningspotential: MRM-test med torkning vid 105 °C (MRM-105C), MRM-test med torkning vid rumstemperatur (MRM-24C), samt inkubationstest som utfördes med torkning i rumstemperatur, på liknande sätt som i MRM-24C-metoden. Den huvudsakliga skillnaden var att inkubationstestet hade en cykel som upprepades var 7:e dag, medan MRM-24C-metoden upprepade cyklerna dagligen (var 24:e timme).

MRM-metoden simulerar oxidativa förhållanden genom upprepade lakningscykler, medan inkubationstestet bedömer pH-förändringar över tid vid där jorden alltid har en viss fuktighet. Resultaten från dessa tester används för att klassificera jordens försurningsrisk och för att kalibrera bedömningsverktyget, se 1.1. Referensdata från tidigare projekt i norra Sverige används som jämförelsematerial.

1.5 Avgränsningar

Projektet är avgränsat till att undersöka förekomsten och egenskaper hos sulfidhaltiga jordar inom Svealand och Götaland. I projektet ingår prover från Mälardalen, Storstockholm, Småland, västkusten och Nynäshamn. Fokus ligger på att identifiera och karakterisera jordar med potentiellt försurande egenskaper, särskilt i regioner där denna jordtyp tidigare inte har varit föremål för systematisk provtagning eller miljöbedömning i samband med bygg- och anläggningsprojekt.

Projektet fokuserar på karakterisering av försurningspotential hos sulfidjordar. Det omfattar inte fullständig miljöbedömning eller hantering av andra typer av förorenade massor. Laboratorieanalyser begränsas till vissa parametrar: svavel, järn, kalcium och pH.

Projektet testar och vidareutvecklar ett befintligt digitalt bedömningsverktyg (Optimass.se). Verket ska vara användarvänligt och tillämpbart i projekt, utan krav på expertstöd.

Projektet syftar till att möjliggöra selektiv hantering av sulfidjordar. Resultaten är främst avsedda för entreprenörer, konsulter och infrastrukturförvaltare.

2 Sulfid- och sulfatjord

2.1 Allmänt

Sulfidjordar, även kallade potentiella sura sulfatjordar, är jordar som innehåller höga halter av järnsulfidmineraler, främst pyrit. Dessa jordar är särskilt problematiska ur miljösynpunkt, eftersom de vid oxidation bildar svavelsyra. Detta kan leda till extremt låga pH-värden och därmed försurning av både jord- och vattenmiljöer, vilket i sin tur kan frigöra tungmetaller.

2.2 Uppkomst

Sulfatjordar bildas när vattenmättad jord som innehåller sulfider utsätts för syre, vanligtvis genom att grundvattennivån sjunker. Detta sker ofta till följd av naturliga processer, som långvarig torka, eller mänsklig påverkan – främst genom dränering för jordbruk och skogsbruk. En annan orsak till oxidation är schaktning i sulfidjordar inför byggnation.

Oxidationen av sulfider drivs till stor del av mikroorganismer och resulterar i bildning av svavelsyra, varefter utfällning av trevårt järn orsakar kraftig pH-sänkning i jorden.

2.3 Förekomst i Sverige

Sulfidjordar förekommer inom kustområden där marina sediment har avsatts. I Sverige är dessa jordar vanligast inom områden som ligger under den marina gränsen från senaste istiden, särskilt i nordöstra delen av landet. Under Littorinhavets brackvattenperiod, som sträcker sig från cirka 7000 till 3000 år före nutid, se Figur 1, skapades gynnsamma förhållanden för bildning av sulfider genom hög biologisk aktivitet och tillförsel av organiskt material. Utöver marina sediment kan även sjösediment, som har dränerats artificiellt, utvecklas till sura sulfatjordar.



Figur 1. Littorinahavets utbredning för cirka 7 000 år sedan motsvarar nuvarande regioner med risk för sulfidloror (omarbetad från Koyos, Wikimedia Commons).

3 Genomförande

I projektet undersöktes sulfidjordar från södra Sverige, från Uppsala i norr och söderut. Totalt analyserades ca 170 prover med motsvarande analyser som referensproverna. Referensprover utgörs av sulfidjordar från Umeå i söder till Boden i norr, ca 500 analysvar från flertalet tidigare projekt.

Initiala analyser för att bedöma risk för försurning:

- Totalhalter av svavel-, järn-, kalcium, samt pH direkt vid provtagningstillfället och efter lufttorkning under 24 timmar

Baserat på analysresultaten har prover valts ut för vidare undersökning av förurningsegenskaper.

Förurningsegenskaperna undersöktes med tre metoder:

- 1) MRM-metoden som beskrivs i Trafikverkets vägledning 2007. Torkning av proverna mellan lakningsstegen utfördes vid 105°C, MRM-105 C.
- 2) MRM-metoden som beskrivs i Trafikverkets vägledning 2007, med modifieringen att torkning av proverna mellan lakningsstegen utfördes i rumstemperatur, MRM-24 C.
- 3) Inkubationstest, där provet fick torka vid rumstemperatur.

3.1 Lokaler

Provtagning har genomförts vid ett flertal lokaler i södra Sverige, samt vid utvalda referenslokaler i norra Sverige. Syftet med urvalet var att fånga regional variation i svavel-, järn- och kalciuminnehåll samt att jämföra oxidationsbeteenden mellan jordar med olika buffringskapacitet. Lokaler i södra Sverige (projektets huvudområde), där södra Sverige definieras här som området Uppsala och söderut. Följande lokaler ingick:

- Uppsala
- Roslagen
- Storstockholmsområdet
- Västerås
- Kalmar
- Göteborgsområdet (Västkusten)

Totalt analyserades cirka 40 prover på totalhalt från dessa regioner och 24 lakningsförsök fördelade på tre testmetoder:

- 8 st MRM-105C
- 8 st MRM-24C
- 8 st inkubationstester

Dessa prover valdes baserat på variation i svavel-, järn- och kalciumhalter samt pH (opåverkad och efter 24 h luftning), med fokus på att representera olika Ca/S- och Fe/S-kvoter.

För jämförelse har referensdata från referenslokaler i norra Sverige och tidigare projekt inkluderats, främst från Umeå-, Boden- och Luleå-området (från tidigare SBUF/Trafikverket-projekt). Dessa prover utgör drygt 400 analyser och har använts som referensram för att identifiera skillnader i buffringsförmåga, oxidationshastighet och Ca/S-gränsvärden mellan norra och södra Sverige.

3.2 Testmetoder

3.2.1 Totalhalter

Jordprov från skruvborr eller provgrop togs i en diffusionstät påse, där provet homogeniserades. Ur det homogeniserade provmaterialet togs jordmaterial till en 100 ml glasburk (B-prov). Minst 150 g lämnades kvar i den diffusionstätta påsen (A-prov). Glasburken med lera fylldes med kranvatten för att minimera oxidering av provet. Båda provbehållarna skickades till Eurofins. Eurofins utförde analys av svavel, kalcium och järn. Jordens pH mättes i laboratoriet direkt innan provet påverkas av luft, pH(opåverkad), och efter 24 h pH (ox, luftad 24h). Utifrån haltnivåer på svavel, järn, kalcium

och uppmätta pH valdes sedan prov för kompletterande MRM-lakningstest och inkubationstest. I dessa fall skickades B-provet till Luleå tekniska universitet för dessa kompletterande tester.

3.2.2 MRM-105C / MRM-24C

MRM-metoden återfinns som bilaga 1 i rapporten TRV (2007):100 – Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor. Testet har tio laksteg där varje laksteg tar ett dygn. Metoden bygger på upprepade aeroba laksteg där jordprov lakas under syretillförsel, vilket simulerar oxidationsförhållanden. Två parallella försök utfördes, där det ena provet lufttorkades medan det andra provet torkades vid 105C. MRM-metoden ger svar på följande:

- pH-förändringar på grund av oxidation:
 - Hur lågt pH sjunker när jorden är fullt oxiderad (försurningseffekt).
 - Hur snabbt pH sjunker vid oxidation (jordens "försurningshastighet"). Antal laksteg till pH < 4: Ett mått på försurningshastighet.
- Utvärdering av miljöpåverkan: Försurningens hastighet och det slutliga pH värdet vid exponering för syre ger indikation på hur miljön kan påverkas vid schaktning och uttorkning.

3.2.3 Inkubationstest

Inkubationstest användes för att bedöma om en jord har potential att bilda syra genom oxidation av sulfider. Testet går ut på att observera förändringar i pH över tid när jorden hålls fuktig under kontrollerade förhållanden. Provet hålls konstant fuktigt med avjoniserat vatten och inkuberas i rumstemperatur i minst 9 veckor, upp till 19 veckor. Under inkubationen mäts jordens pH regelbundet.

Metoden ger svar på om pH sjunker, vilket tyder på syraproduktion via sulfidoxidation. Ett pH-fall på minst 0,5 enheter och slutligt pH under vissa tröskelvärden klassificerar jorden. För mineraljord är gränsen pH < 4,0, och för organisk jord (t.ex. torv) pH < 3,0.

Om pH är stabilt, eller endast sjunker något, klassificeras jorden som ej försurande. Resultatet används för att avgöra om jorden är ett potentiellt miljöproblem, särskilt vad gäller försurning och metallutlakning (t.ex. aluminium). Metoden är relevant för klassificering av sura sulfatjordar i Sverige och Finland.

4 Resultat

4.1 Metodutveckling

En jämförande studie har utförts med tre tester, MRM(105C), MRM(24C) och inkubationstest. Undersökningen utfördes av LTU. De tre testmetoderna skiljer sig i flera punkter som kan påverka jordens och porvattnets pH. För både inkubationsmetoden och MRM-metoden användes 25 g jord som standardprovstorlek.

För MRM-metoden med torkning i ugn lufttorkades först ett färskt jordprov i 24 timmar som maldes därefter till ett fint pulver. 25 g av den förberedda jorden blandades med avjoniserat vatten vid ett L/S-förhållande på 3:1, fick stå och komma i jämvikt i 30 minuter innan det filtrerades. Filtratet analyserades för pH och elektrisk konduktivitet. Den återstående filtrerade jorden ugnstorkades vid 105 °C i 24 timmar.

MRM-metoden med lufttorkning följde samma procedur som MRM-ugnstorkningsmetoden, med undantaget att jordresten efter filtrering lufttorkades i rumstemperatur (24 °C) i 24 timmar istället för att ugnstorkas. Denna process av blandning, filtrering, mätning och lufttorkning upprepades under 18 cykler (18 dagar).

I inkubationstestet blandades 25 g färsk jord med avjoniserat vatten vid L/S-förhållande på 3:1. Efter 30 minuters filtrerades slurryn, och filtratet analyserades avseende pH och elektrisk konduktivitet. Den filtrerade jordresten lufttorkades sedan i rumstemperatur. Denna process – blandning, filtrering, mätning och lufttorkning – upprepades under 10 cykler (7–10 veckor), med en veckovis våt- och torrcykel.

Detta angreppssätt möjliggör en jämförelse mellan metoderna för bedömning av jordens förurningspotential. Resultaten från studien visar att MRM-105C generellt uppvisar ett lägre pH efter testet än både MRM-24C och inkubationstesten efter 10 veckor. Här görs ingen bedömning av metodernas lämplighet eller vilken testmetod som ger de mest representativa resultat på den förurning som kan ske naturligt. Utgångspunkten är dock att MRM-105C ger en konservativ bedömning av förurningsrisken, det vill säga de lägsta uppmätta pH-värdena och därmed den största bedömda risken för förurningseffekt, Thakur et al. 2025.

Sulfidjord från fem olika lokaler har undersökts. Lokalerna är Robertsfors, Umeå, Uppsala, Kalmar, Göteborg och Kungsbacka och Uddevalla. Jordarnas sammansättning med avseende på svavel, järn och kalcium redovisas i Tabell 1. Testresultaten från Göteborg, Uppsala och Umeå redovisas i Figur 2, medan resultaten i sin helhet från samtliga lokaler redovisas i bilaga 2.

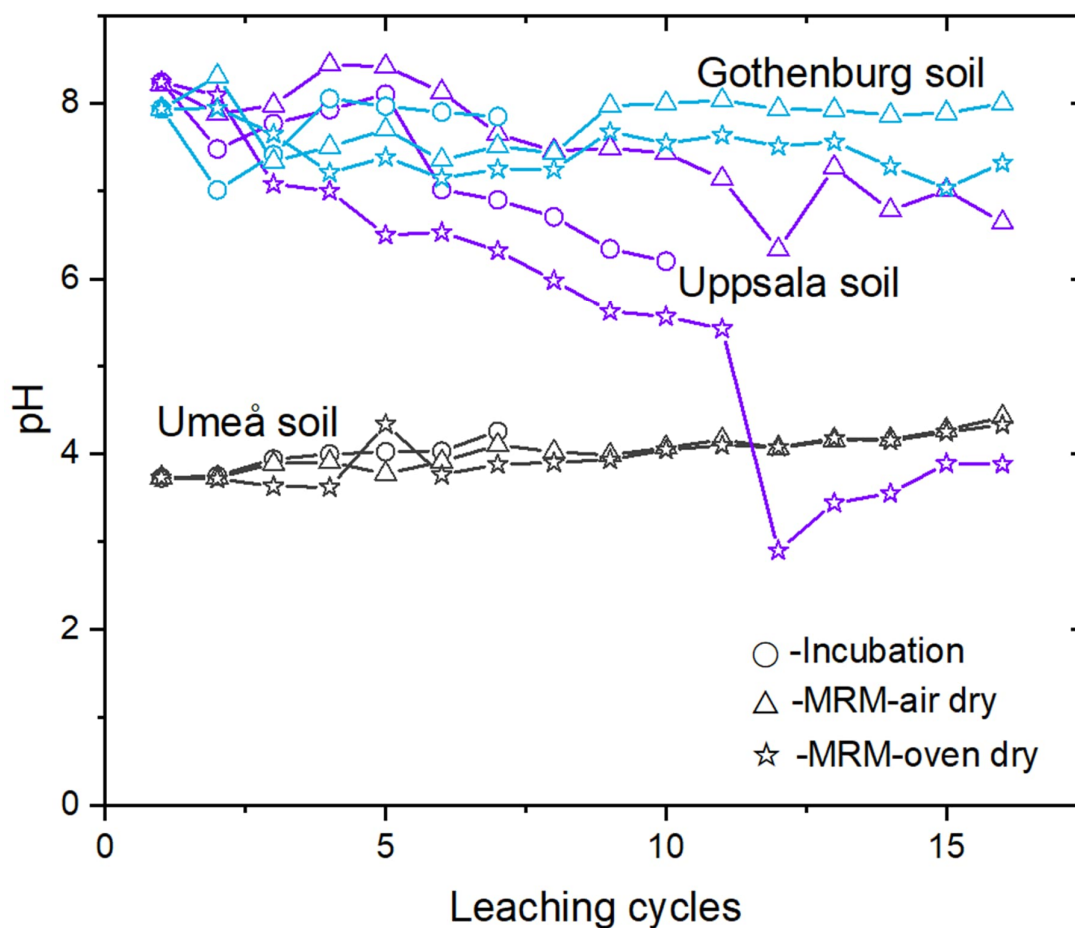
Tabell 1 Undersökta sulfidjordarnas pH, svavel, järn och kalciuminnehåll. Robertsfors visar oxiderat pH och Umeå pH både initialt (vid provtagning) och oxiderat (efter lagring). De övriga proverna var anaeroba och opåverkade av oxidation och förurning.

Element	pH	Svavel (S), mg/kg TS	Järn (Fe), mg/kg TS	Kalcium (Ca), mg/kg TS
Robertsfors ¹	4	17 400	68 500	22 200
Uppsala	8,2	9 300	44 000	6 000
Kalmar	6,8	4 900	25 000	4 400
Uddevalla	8,7	3 500	43 000	6 200
Kungsbacka	8,5	1 500	32 000	32 000
Göteborg	8,3	6 800	26 000	21 000
Umeå ¹	8,1 (3.8)	5 200	14 000	2 900

¹ Jordproverna var anaeroba vid provtagningstillfället och hade höga pH-värden. Lagring under oxiderande förhållanden i lab medförde pH-sänkningen.

Figur 2 visar pH-utvecklingen över successiva urlakningscykler för tre representativa sulfidjordar insamlade från Göteborg, Uppsala och Umeå. Resultaten visar pH och elektrisk konduktivitet uppmätta med de tre olika testmetoderna. Diagrammen för jordarna från Robertsfors, Kalmar, Kungsbacka och Uddevalla presenteras i bilagan tillsammans med data för de tre jordarna som visas här. Figuren illustrerar hur pH förändras beroende på tre olika testmetodiker: inkubation, MRM-lufttorkning (MRM-24C) och MRM-ugnstorkning (MRM-105C).

Sulfidjorden från Göteborg uppvisar en relativt stark buffringsförmåga, vilket avspeglas i dess högre pH-värden under hela inkubationsperioden. Denna buffringsförmåga kan kopplas till ett högt kalciuminnehåll, vilket skapar en mer alkalisk miljö som kan neutralisera de sura föreningar som bildas vid oxidation av sulfider. I MRM-24C förblir pH-kurvan stabil eftersom torkning i rumstemperatur antas bromsa oxidationshastigheten. MRM-105C däremot ger lägre pH-värden, eftersom temperaturen antas driva oxidationen även om den samtidigt hämmar mikrobiell aktivitet och mer naturlig oxidation i provet. Liknande buffringsbeteende observeras för Kungsbacka-jorden, som uppvisar stabila pH-värden vid inkubation och lufttorkning men snabbare försurning vid den accelererade ugnstorkade MRM-metoden.



Figur 2 Jämförande studie mellan tre testmetoder – MRM-105 °C, MRM-24 °C och inkubationstest – utförd av LTU. MRM-tester simulerar oxidation genom upprepade lakningscykler där L/S-kvoten ökar från 1 upptill 18 laksteg. MRM-metoden utförs på två veckor medan inkubationstest tar 7 - 10 veckor att slutföra. Skillnaderna mellan metoderna påverkar jordens och porvattnets pH-utveckling.

I kontrast uppvisar sulfidjordarna från Uppsala, Uddevalla och Kalmar en betydligt svagare buffringskapacitet, vilket sannolikt återspeglar lägre kalciuminnehåll och begränsad förmåga att neutralisera syra. Metoderna inkubation och MRM-24C ger längre tid för buffring att ske. Uppmätta pH-värdena visar delvis på återhämtning och kurvorna närmar sig varandra i slutet av testperioden. Däremot accelererar MRM-105C oxidationsprocessen, vilket resulterar i avsevärt lägre pH-värden jämfört med både inkubation och MRM-24C. Denna skillnad visar att oxidationshastigheten, styrd av temperatur och fuktförhållanden, i hög grad kan påverka försurningsgraden i dessa jordar.

Sulfidjordarna från Umeå och Robertsfors var redan oxiderade vid start som ett resultat av lagringen. Jorden från Umeå uppvisar konsekvent samma pH-värden i alla tre testmetoder under hela testperioden vilket tolkas som att jordens buffringsförmåga var förbrukad i och med att jorden redan var oxiderad. Med minimal buffringsförmåga kvar uppvisar Umeå-jorden ingen förändring i oxidationshastighet, och pH förblir lågt och stabilt oavsett metod.

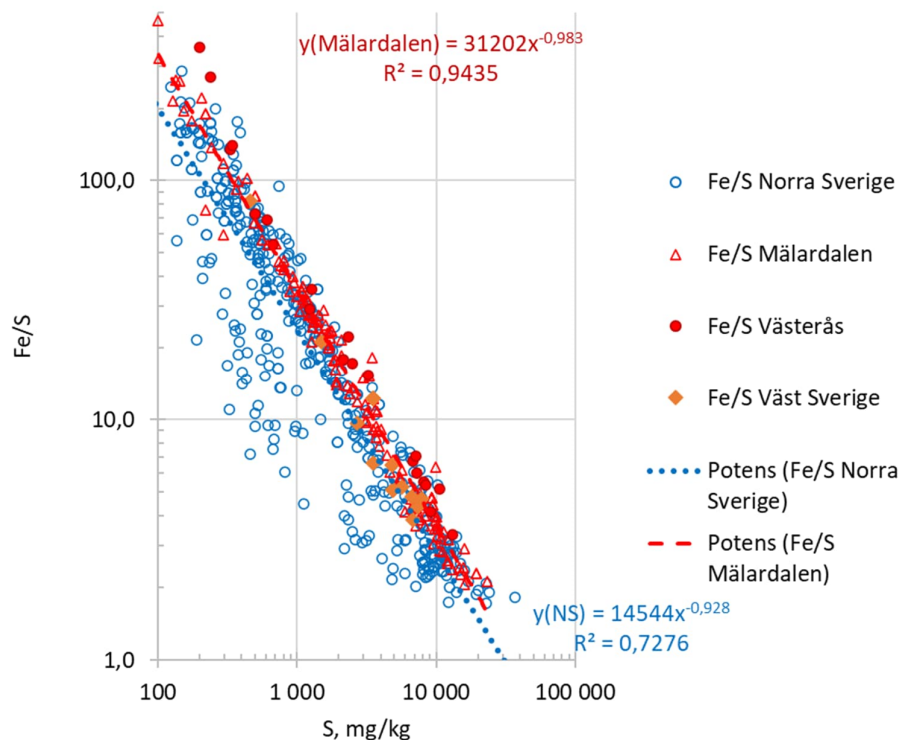
MRM-105C främjar kemisk oxidation och inaktiverar mikrobiell aktivitet, vilket orsakar kraftiga pH-fall, medan inkubations- och lufttorkningsmetoderna bevarar mikrobiella processer och efterliknar naturliga fältförhållanden bättre.

Baserat på utveckling av förurning under testen kan dessa sju jordar delas in i tre kategorier:

- Aktiva sura sulfatjordar (AASS): Robertsfors och Umeå, som redan uppvisar betydande oxidation och förurning med kontinuerligt låga pH-värden.
- Potentiella sura sulfatjordar (PASS): Uppsala, Uddevalla och Kalmar, som innehåller sulfider med hög förurningsrisk.
- Icke-försurande jordar: Kungsbacka och Göteborg, som visar minimal förurningsrisk på grund av lågt sulfidinnehåll eller god naturlig buffringskapacitet.

4.2 Förurningspotential

Flera faktorer påverkar jordens förurningspotential. En central aspekt är innehållet av svavel (S) och järn (Fe). I anaeroba, syrefria miljöer förekommer svavel främst som sulfid (S^{2-}) och järn som Fe^{2+} . Dessa föreningar kan bilda järnsulfider, till exempel FeS och FeS_2 , vilka är svårslösliga och stabila under anaeroba förhållanden. I aeroba, syrerika miljöer förekommer svavel däremot som sulfat (SO_4^{2-}) och järn som Fe^{3+} . Sulfat är lösligt, medan Fe^{3+} tenderar att bilda oxider och hydroxider som är svårslösliga. Följden blir att en typisk torrskorpelera där svavelhalten minskar med tiden från 1000-tals mg/kg till några hundra mg/kg. I och med att trevärt järn fälls ut som hydroxider kommer en torrskorpa att hålla behålla merparten av den initiala halten. Om jorden saknar buffringsförmåga bildas det sur sulfatjord som effekt av oxidationen. I figur 2 redovisas uppmätta svavel och järnhalter i jordar som klassades som sulfidjordar i Norra Sverige, Mälardalen och väst Sverige. Av resultaten framgår att det finns stora likheter men också att för samma Fe/S-kvot finns det en mycket större spridning av svavelhalten i norra Sverige. Detta kan tyda på annan sedimentationsprocess och/eller annan lakningsprocess.



Figur 3 Innehållet av S och Fe/S-kvot i sulfidjordar undersökta i norra Sverige, Mälardalen och Västsverige. Notera log-log-skala.

I Figur 3 redovisas ca 500 prover från Norra Sverige och ca 200 prover från södra Sverige. Av resultaten som redovisas i figuren framgår att sulfidjordar har en mer varierande sammansättning av svavel och järn i norra Sverige än i södra Sverige. Sulfidjordar norrut har något lägre medelhalt av svavel, järn och kalcium än motsvarande jordar inom Mälardalen och söderut, se Tabell 2. Sulfidjordarna i norra Sverige uppvisar tydligare samband mellan svavelhalt och Ca/S-kvot, medan sulfidjordar inom södra Sverige har generellt högre Ca/S-kvot. Kalciuminnehållet i sulfidjordar i Norra Sverige varierar mellan några hundra mg/kg TS till 44 000 mg/kg TS, medan södra Sverige varierar halterna mellan drygt 3000 mg/kg TS och drygt 55 000 mg/kg TS. Sulfidjordar i Norra Sverige har också något lägre initiala pH-värden än det som förekommer i Mälardalen och söderut. Viktigt att notera att efter oxidation kan sur sulfatjord bildas med liknande pH, pH < 3.

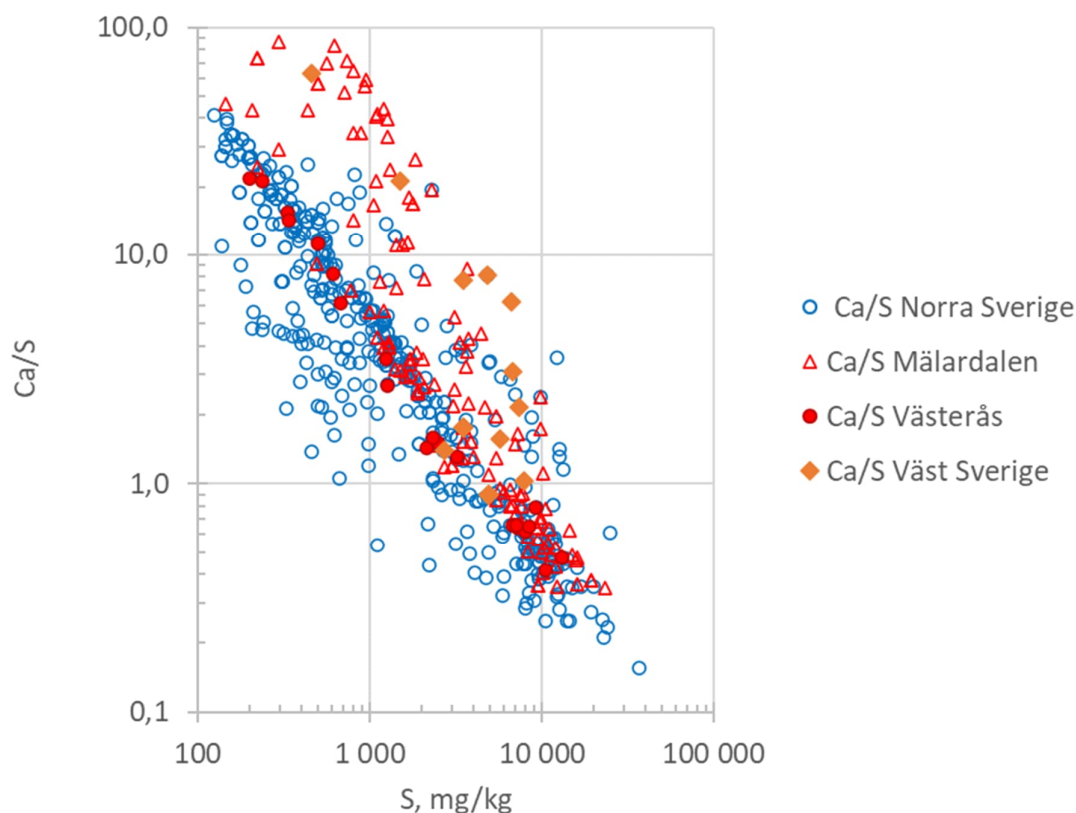
Sulfidjordar i södra Sverige har generellt lägre järnhalter, majoriteten av proverna har Fe-halt över 30 000 mg/kg, oberoende halt av svavel. Norra Sverige ligger medelhalten på 27 000 mg/kg TS medan södra Sverige över 37 000 mg/kg TS.

Tabell 2. Jämförelse av typiska halter och egenskaper hos sulfidjordar i norra respektive södra Sverige.

Mälardalen/södra Sverige							
	S	Ca	Fe	Fe/S	Ca/S	pH (init)	pH(24h)
Medel	4 781	14 688	37 834	44	24	7,33	7,08
Median	2 330	7 170	35 400	15	3,2	7,6	7,6
Max	24 000	55 500	70 000	464	291	9,7	9,0
Min	101	3 200	16 800	1,9	0,2	2,8	2,9
Norra Sverige							
	S	Ca	Fe	Fe/S	Ca/S	pH (init)	pH(24h)
Medel	3 436	5 498	27 442	39	7,0	6,2	5,7
Median	1 210	4 880	27 900	19	3,6	6,3	5,9
Max	36 600	44 700	70 000	285	41	8,9	9,0
Min	79	594	3 200	0,3	0,2	2,4	2,9

Även jordens innehåll av kalcium i form av kalцит (CaCO_3), exempelvis från skalrester eller kalkhaltigt material, har stor betydelse eftersom det kan verka buffrande mot försurning. Innehållet av organiskt material är ytterligare en faktor som påverkar försurningsprocesserna, liksom markens vattenmättnadsgrad. Som det redovisas i Tabell 2 och Figur 4 har sulfidjordar från södra Sverige generellt högre halter av kalcium än i norra Sverige. Här finns en bra korrelation mellan högre halt av kalcium och högre buffringskapacitet. Sulfidjordar i Södra Sverige har därav högre pH-värden. När det gäller sur sulfatjord ligger de lägsta pH-värdena på samma nivå, oberoende ursprung, dvs det kan förekomma sura sulfatjordar i södra Sverige som motsvarar sura sulfatjordar i norra Sverige. Det kan noteras att sulfidjord med svavelhalt över 4 000 mg/kg TS har ökad försurningspotential och halter över 10 000 mg/kg TS är generellt försurande om jorden påverkas aerobt dvs oxideras genom dränering eller schaktning.

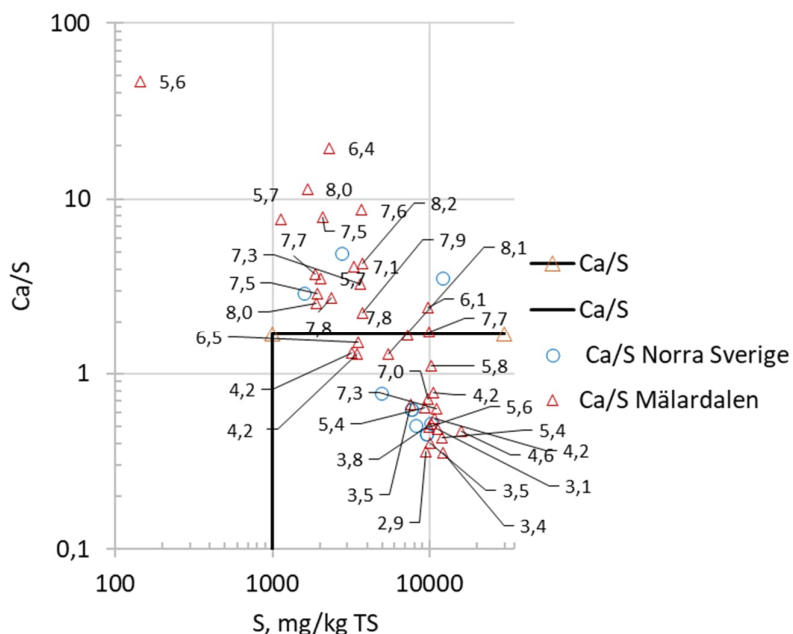
Innehållet av skalrester medför att försurningen kan buffras naturligt. Högre halt av kalcium i sulfidjordar i södra Sverige ger också högre pH-värden generellt, se Figur 4 och Tabell 2.



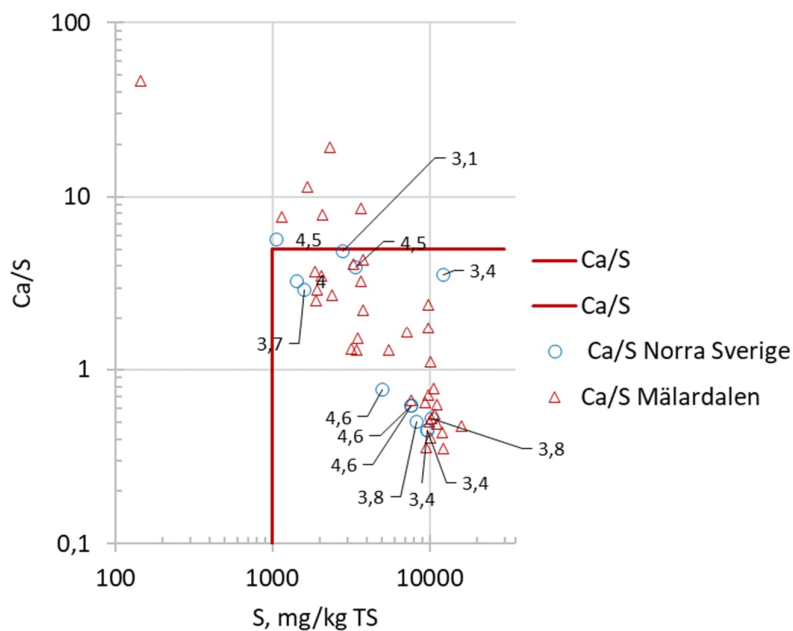
Figur 4 Innehållet av S och Ca/S-kvot i sulfidjordar undersökta i norra Sverige, Mälardalen och Västsverige. Notera log-log-skala.

4.3 Buffringskapacitet

Figur 5 och Figur 6 redovisar uppmätta pH efter MRM-105C-tester som har utförts på sulfidjordar från norra och södra Sverige. I Figur 5 redovisas uppmätta slutliga pH-värden för sulfidjordar från södra Sverige. Försurningseffekt kunde enbart uppnås om Ca/S-kvoten var under 1,7. Upp till svavelhalt på 10 000 mg/kg TS räckte en Ca/S-kvot på mer än 1,7 att hålla ett pH över 5,6 som lägst.



Figur 5 Uppmätta svavelhalter och Ca/S-kvot i sulfidjord från Norra Sverige, Mälardalen och Västsverige, med uppmätta pH-värden efter utförd MRM-105C test för proverna från södra Sverige. pH efter MRM-test indikerar pH i jorden efter att provet har oxiderats i tio cykler.



Figur 6 Uppmätta svavelhalter och Ca/S-kvot i sulfidjord från Norra Sverige, Mälardalen och Västsverige, med uppmätta pH-värden efter utförd MRM-105C test för proverna från norra Sverige.

De prov som ingick i dessa undersökningar har valts ut efter att provet har analyserats och bedömts ha försurningspotential. Det finns därmed inga prov som inte har försurningspotential. Undersökningen indikerar att för södra Sveriges sulfidjordar kan Ca/kvot på 1,7 användas som

"gräns" vid bedömningen av jordens försurningsrisk. För Norra Sverige kan en Ca/S-kvot på minst 5 indikera att jorden kan motstå försurning, Figur 6.

5 Analys

Resultaten visar både likheter och skillnader mellan olika sulfidjordar. Parametrar av intresse är jordartsbeskrivning (leSi, siLe, gyLe), svavelhalt, Fe/S-kvot, Ca/S-kvot samt pH initialt samt efter ett dygns oxidation.

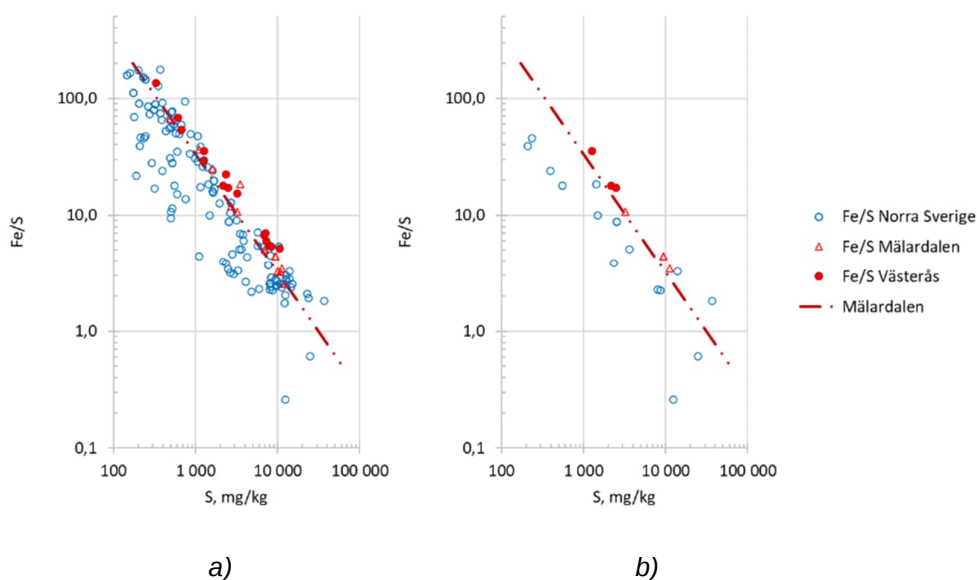
I södra Sverige består sulfidjordarna främst av leror och gyttjiga leror (Le–gyLe), medan norra Sverige domineras av ler- och siltjordar (Le–leSi) samt vissa gyLe eller gySi. Svavelhalten varierar kraftigt i hela landet, från några hundra mg/kg TS till över 30 000 mg/kg TS.

Förhållandet mellan svavelhalt och Fe/S-kvot beskrivs i södra Sverige av ekvation 1 (Figur 3):

$$S = 31\,202 \times (Fe/S)^{-0,983}$$

De flesta sulfidjordar från norra Sverige följer samma samband, men vissa avviker med lägre Fe/S-kvot, se Figur 7 a och b. Sulfidjord med pH mellan 4,3 och 6 är aerobt påverkade och kan klassas som anoxiska, det vill säga övergångsjordar som har påverkats av grundvattensänkning och är mellan utpräglat anaeroba respektive aeroba. Sambandet för anoxiska jordar enligt ekvation 1 är oförändrat i alla analyserade prover från södra Sverige och i de flesta från norra. I norr finns dock en grupp jordar med lägre svavelhalter än förväntat utifrån given Fe/S-kvot.

Avvikelse kan bero på skillnader i bildningsmiljö eller på lakning där järn och svavel lakas ut från jorden i samma proportioner, vilket gör att kvoten bibehålls trots minskad svavelhalt. Figur 7a visar att avvikelse främst gäller norra Sverige. Prover med pH <4,3 följer samma trend (Figur 7b). I Mälardalen och övriga södra Sverige bibehålls Fe/S-kvoten även i försurade jordar och torrskorpejordar. En möjlig förklaring är att siltiga jordar i norr, har högre hydraulisk konduktivitet och kan släppa ifrån sig mer löst järn (Fe^{2+}). FeS oxideras först när redoxmiljön blir anoxisk, medan FeS_2 förblir stabilt tills redoxmiljön övergår i alltmer aerobt tillstånd. Under mer syrerika förhållanden dominerar Fe^{3+} som fälls ut som järnhydroxid medan sulfaten lakas ur. I jordar med hög Ca/S-kvot buffras pH-sänkningen, vilket begränsar järnens löslighet. Att sulfidjordar i södra Sverige ofta har högre järnhalt och av högre innehåll av skalrester ($CaCO_3$) och därmed högre pH i markmiljön.



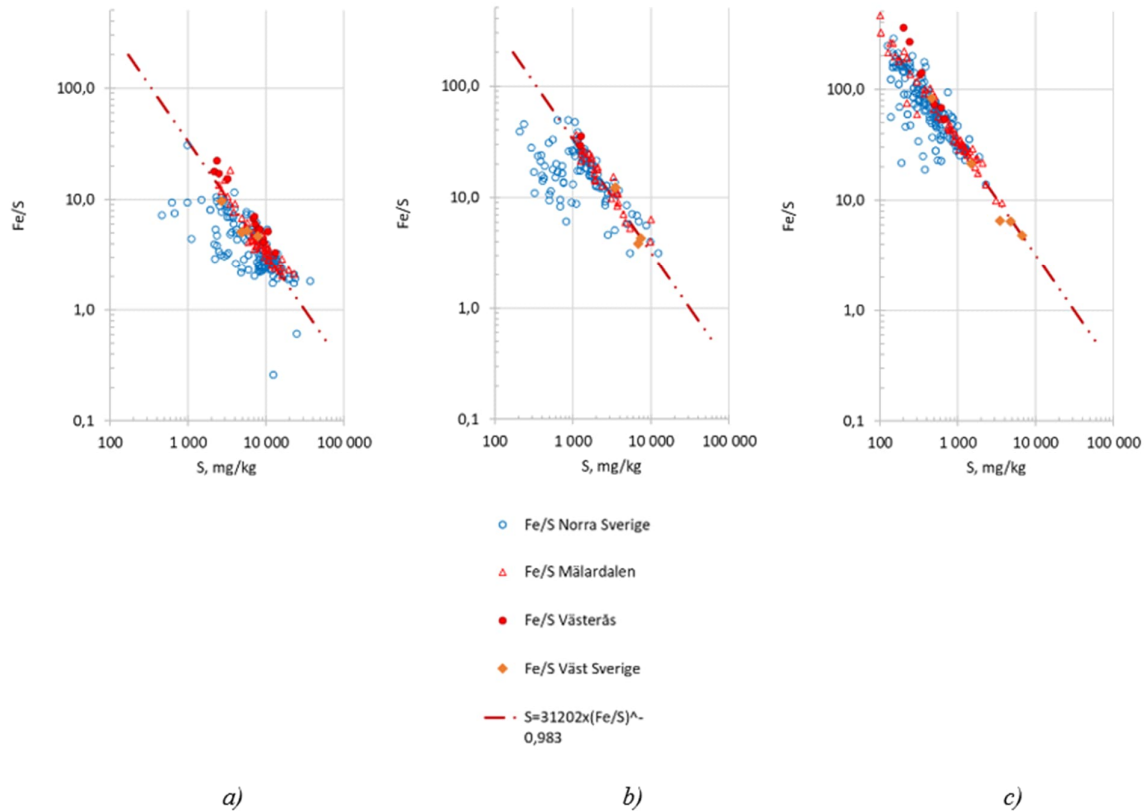
Figur 7 a) prover med pH under 6 och b) prover med pH < 4,3. Röda linjen representerar ekvation 1 för Mälardalens sulfidjordar.

Jordens Ca/S-kvot indikerar jordens buffringskapacitet, som ökar med stigande kvot. Högt innehåll av Ca (CaCO_3) kan hindra att sulfidjord försuras vid aerob påverkan, även vid högt sulfidinnehåll. I figur 6 redovisas sulfidjordars Fe/S-kvot mot svavelhalt för Ca/S-kvot mindre än 1,7, Ca/S-kvot mellan 1,7 och 5, och Ca/S-kvot mindre större än 5.

Första grupperingen är prover som har Ca/S-kvot <1,7. Denna gruppering domineras av sulfidjordar med svavelhalt över 3 000 – 4 000 mg/kg TS, där flertalet prov har över 10 000 mg/kg TS, se Figur 8a. Typiskt för dessa prov är Fe/S-kvot under 10. Dessa jordar klassas generellt som D2 (D1), dvs sulfidjordar med hög till mycket hög försurningspotential och minimal buffringskapacitet om jorden får oxidera fritt. Denna bedömning gäller sulfidjordar från både södra och norra Sverige.

I gruppen med Ca/S-kvot mellan 1,7 och 5 hamnar sulfidjordar med halter över 1 000 och under 10 000 mg/kg TS och med Fe/S-kvot mellan 3 och 50, Figur 8b. Här återfinns sulfidjordar från norra Sverige som är mer eller mindre aerobt påverkade och kan ha en avvikande Fe/S-kvot från ekvation 1. Sulfidjordar från norra Sverige i denna grupp klassas som D1 – D2, buffringskapaciteten bedöms inte kunna hindra försurning, men jordarna har viss buffringskapacitet. Sulfidjordar från södra Sverige bedöms inte kunna orsaka försurning vid Ca/S-kvoten är över 1,7 och svavelhalten är under 10 000 mg/kg TS.

Sista grupperingen, med Ca/S-kvot över 5 har generellt Fe/S kvot från ca 20 till > 100. Svavelhalten ligger under 2 000 mg/kg TS. Inget av dessa jordar har uppvisat pH under 4,3, Figur 8c.



Figur 8 Innehållet av S och Fe/S-kvot i sulfidjordar undersökta i norra Sverige, Mälardalen och Västsverige i jordar med a) Anaeroba sulfidjordar med Ca/S-kvot under 1,7, b) Anaeroba-anoxiska sulfidjordar med Ca/S-kvot mellan 1,7 och 5 och c) anoxiska- aeroba sulfid/sulfatjordar med Ca/S-kvot >5.

Sammanställningen visar att sur sulfatjord i norra Sverige finns med olika svavelhalter, från några hundra mg/kg TS till över 20 000 mg/kg TS. I södra Sverige har enbart svavelhalter över 2 000 mg/kg TS lokaliserats, se Figur 7b.

En annan indelning efter Ca/S-kvot visar tre grupper (Figur 8a, b och c):

- **<1,7:** domineras av jordar med svavelhalt >3 000 mg/kg TS och Fe/S-kvot under 10. Klassningen är D2 (D1)
- **1,7–5:** halter mellan ca 1 000 och 10 000 mg/kg TS och Fe/S-kvot 3–50. Här finns vissa aerobt påverkade jordar i norr som avviker från ekvation 1. Klassningen för Norra Sverige B, D1 och D2. Klassning för södra Sverige A0-A1.
- **> 5:** Fe/S-kvot ca 20–100. Inga jordar i denna grupp har pH <4,3. Klassning A0-A1.

Sammanställningen visar att sur sulfatjord i norra Sverige förekommer med svavelhalter från några hundra mg/kg TS till över 20 000 mg/kg TS, medan halter i södra Sverige generellt ligger över 2 000 mg/kg TS och risken ökar med högre svavelhalt.

Praktiskt innebär detta att entreprenörer kan använda totalhalt av svavel och Ca/S-kvot för att bedöma risk för försurning. Med Ca/S >1,7 som fältindikator i södra Sverige för om sulfidjorden kommer att kunna medföra försurning eller inte och kan återanvändas på plats, medan motsvarande gräns i norr bör vara ca 5. Det möjliggör säkrare och mer cirkulär hantering.

6 Slutsats

Sulfidjordar har traditionellt betraktats som ett problem främst längs Norrlandskusten, men ny forskning visar att dessa jordar även förekommer i Svealand och Götaland. Vid oxidation av sulfidjord frigörs vätejoner, vilket leder till bildning av sulfatjord och risk för försurning av mark och vatten. Detta kan orsaka betydande ekologiska skador samt fördyrade byggprojekt, eftersom massorna ofta måste deponeras. I södra Sverige saknas etablerade rutiner för bedömning och hantering, vilket skapar osäkerhet och ökade kostnader.

I projektet karakteriserades sulfidjordar i södra Sverige och jämfördes med motsvarande jordar från norra Sverige. Resultaten visar både stora likheter och tydliga skillnader mellan regionerna. Generellt gäller att jordar med svavelhalter över cirka 4 000 mg/kg TS och en Ca/S-kvot under 1,7 klassificeras som D2-jordar med hög försurningspotential och begränsad buffringsförmåga. Den mest framträdande skillnaden mellan regionerna är att sulfidjordar i södra Sverige, vid Ca/S-kvot över 1,7 och svavelhalt under 10 000 mg/kg TS, bedöms ha låg försurningsrisk. För norra Sverige krävs däremot en Ca/S-kvot över 5 för att uppnå motsvarande bedömning, oberoende av svavelhalt.

Sulfidjordar i Svealand och Götaland uppvisar generellt högre kalciumhalter, vilket ger bättre buffringsförmåga mot försurning. Projektets resultat indikerar att en Ca/S-kvot på minst 1,7 kan användas som vägledande gräns i södra Sverige, medan motsvarande riktvärde i norr är omkring 5. Dessa värden utgör en praktisk utgångspunkt för snabb bedömning av försurningsrisk och möjliggör ökad återanvändning av massor med låg risk, vilket minskar behovet av deponering, transporter och klimatpåverkan. Det bör dock understrykas att resultaten är indikativa och att lokala variationer alltid ska verifieras genom kompletterande MRM- eller inkubationstester innan slutlig hantering fastställs. Resultaten har integrerats i Optimass-verktyget som stöd för selektiv och cirkulär hantering av sulfidjordar.

För södra Sverige föreslås följande indelning för att klassa sulfidjordar utifrån försurningsrisk, Tabell 3:

Tabell 3 Bedömningsgrunder för sulfidjordar från södra Sverige.

S mg/kg TS	Fe/S mg/kg TS	Ca/S	pH	Fe mg/kg TS	Bedömning
				<15 000	Kontrollera låg Fe-halt
≤1 000	>40	>1	≥5		A0- (Ej sulfidjord)
≤4 000	>10	>8			A0 (Ej sulfidjord)
≤10 000	<100	≥1,7	≥5		A1 (sulfidjord med försumbar försurningsrisk)
>10 000		>1,7			Kontrollera med MRM eller inkubationstest, D2
<4 000	<40	<1,7	<5		C1 (sur sulfatjord med försurningsrisk)
<4 000	<20	<1,7	≥5		D1 (sulfidjord med hög försurningsrisk)
>4 000	<20	<1,7	<5		C2 (sur sulfatjord med mycket hög försurningsrisk)
>4 000	<20	<1,7	≥5		D2 (sulfidjord med mycket hög försurningsrisk)
Saknas svar					Kontrollera indata

7 Utvecklings- och forskningsbehov

Projektet har definierat flera områden och parametrar som kräver fördjupning och fortsatta utredningar.

7.1 Jordarters egenskaper och variation

Större förståelse behövs för skillnader mellan siltiga, leriga och gyttjiga sulfidjordar. Följande behöver undersökas:

- Hypotesen att siltiga jordar påverkas snabbare av redoxförändringar och därmed avger mer löst Fe^{2+} än leriga jordar
- Kopplingen mellan Fe^{2+} -löslighet, siltiga jordar och recipientpåverkan (utfällning av järnhydroxider och pH-sänkning)
- Betydelsen av anoxiska miljöer där Fe^{2+} är stabilt och hur detta påverkar Fe/S-kvoten.
- Karakterisering av Ca-halten för att säkerställa korrelationen mellan Ca och karbonater.

I detta projekt har över 600 provers analys på innehåll av svavel, järn, kalcium, samt pH ingått. Av dessa är ca 180 prover från södra Sverige, från Uppsala och söderut. Resterande prover är från Umeå och norrut. För majoriteten av dessa projekt saknas det ytterligare information om nivå, vattenkvot och jordartsbeskrivning. Sulfidjordar i norra Sverige är dock mer siltiga, men det förekommer leriga och gyttjiga sulfidjordar också. Mälardalen är det leriga och gyttjiga sulfidjordar som dominerar, baserat på den begränsade information om material som finns. De jordar som kommer från västkustområdet är nästan uteslutande lera. Som det framgår av jämförelsen mellan södra och norra Sverige har sulfidjordar i södra Sverige högre halt av kalcium, järn och svavel. Södra Sverige är Fe/S-förhållandet mot svavelhalt logaritmisk, medan för norra Sverige är sambandet inte lika uttalat. Sambandet orsakas av att järn och svavel har olika löslighet, där sulfat som är lösligt sköljs ut ur marken medan minst hälften av jordens järninnehåll stannar kvar som svårslutlig järnhydroxid. Detta förhållande gäller inte för anoxiska jordar från norra Sverige, dvs jordar med pH mellan 5 och 6 vilket är typiska för anoxiska redoxförhållanden. För dessa jordar sker ökad utlakning av järn, som resulterar i att Fe/S-kvoten inte ändras med minskad svavelhalt. Under redoxförhållanden i anoxisk miljö är Fe^{2+} stabilt. Hypotesen är att redoxmiljön i siltiga jordar förändras snabbare än i leriga och gyttjiga jordar. Det beror framför allt på att silt har högre permeabilitet, vilket gör att vatten och lösta ämnen kan transporteras och lakas ut snabbare. När anoxiska förhållanden väl uppstår kan Fe^{2+} bildas och bli löst i porvattnet. I siltiga jordar kan detta lösta Fe^{2+} relativt snabbt transporteras bort ur profilen, ofta tillsammans med SO_4^{2-} . Därför ökar Fe/S-kvoten i den kvarvarande jorden inte lika markant som i miljöer där jorden är mer aerob och där järnhydroxider bildas och stannar kvar i porvolymen.

I leriga jordar sker utlakning betydligt långsammare på grund av den låga permeabiliteten. När det bildas torrskorpelera ökar visserligen permeabiliteten, men samtidigt också syretillgången. Jorden blir då mer aerob och järnet förekommer huvudsakligen som utfällda oxider och hydroxider. En intressant fråga är om den höga lösligheten och mobiliteten hos Fe^{2+} i siltiga jordar bör lyftas särskilt. Oxidation av Fe^{2+} till Fe^{3+} leder till pH-sänkning och utfällning av järnhydroxider, vilket i sin tur kan påverka recipientmiljöer genom både försurning och järnutfällningar.

7.2 Geografiska kunskapsluckor

- Det saknas analysunderlag för området mellan Uppsala och Umeå.
- Det är oklart om jordar mellan Uppsala och Umeå ska klassas som "södra" eller "norra" typer.
- Mer studier behövs om varför sulfidjordar i södra Sverige buffras effektivare (Ca/S >1,7) än i norra Sverige (Ca/S >5).
- Vilken roll spelar skalrester och kalkhaltiga inslag i buffringen.

För sulfidjordar mellan Uppsala och Umeå saknas det analysunderlag. Det är tydligt att det finns stora skillnader mellan sulfidjordar söder om Uppsala och sulfidjordar norr om Umeå. För norra Sverige krävs det minst tre gånger högre halt av kalcium för att jorden ska kunna buffra eventuell försurning jämfört med för södra Sverige. Det finns därmed stor osäkerhet om hur sulfidjordar mellan Uppsala och Umeå ska klassas, dvs som typiska för södra eller norra Sverige.

7.3 Praktisk hantering och användning

- Studier kring selektiv schaktning och hur massor med olika risknivåer kan nyttiggöras på plats.
- Effekter av att använda kvalitetssäkrad sulfidjord i exempelvis jordtillverkning.
- Utredda konsekvenser för recipienter vid oxidation och järnutfällning.
- Koppla försurningsrisker till klimatpåverkan och transportminskning genom ökad återanvändning.

Selektiv schaktning och våtsiktning möjliggör att massor med olika risknivåer kan separeras och nyttiggöras lokalt, vilket minskar behovet av deponering och transporter. Kvalitetssäkrad sulfidjord kan efter behandling användas i exempelvis jordtillverkning, under förutsättning att pH-stabilitet och metallmobilitet verifieras. En integrerad hantering som beaktar försurningsrisker, recipientpåverkan och klimatnytta är avgörande för cirkulär och hållbar masshantering.

8 Litteraturförteckning / referenser

Nyman, A., Johnson, A., Yu, C., Sohlenius, G., Becher, M., Dopson, M., & Åström, M. (2023). A nationwide acid sulfate soil study — A rapid and cost-efficient approach. *Science of the Total Environment*, 9, 161845.

Optimass.se. (2023). Webb-baserat verktyg för bedömning av sulfidjordars försurningspotential.

SBUF. (2023). Utveckling av bedömningsverktyget för sulfidjordar (Projekt 13946).

Thakur, R. K., Mácsik, J., Do, T. M., Jia, Q., & Maurice, C. (2025). A comparative study of soil acidification using Incubation and MRM method in northern and southern Sweden. *10th International Acid Sulfate Soils Conference*, 99–100. Hämtad från <https://drive.google.com/file/d/1dEzx3xHI80KEOLGJVSidHv51w2EHTrq2/view>

Trafikverket. (2007). Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor (Publikation 2007:100).

Trafikverket. (2023). Effektiv bedömning och hantering av sulfidjordar. (Publikation 2023:219)

Wikimedia Commons. (2025). Baltic History 5500-BC.svg. Hämtad 20 november 2025 från https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/Baltic_History_5500-BC.svg

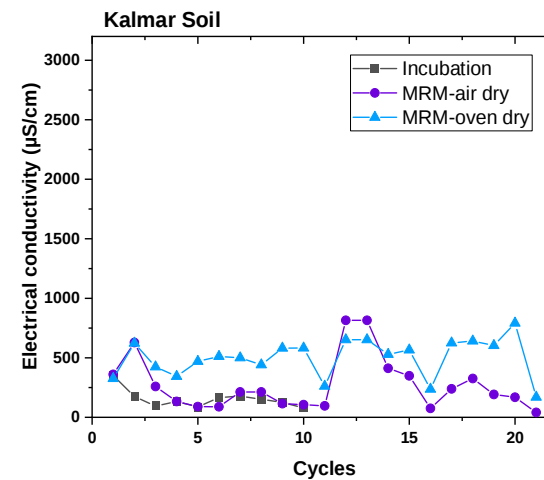
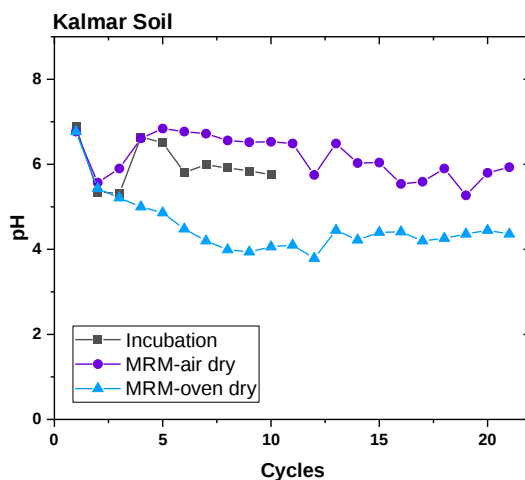
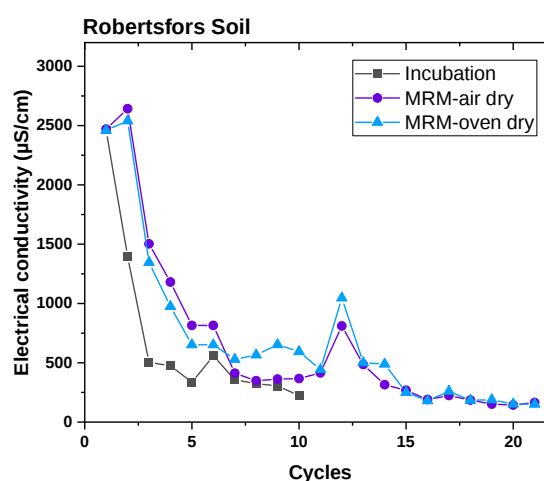
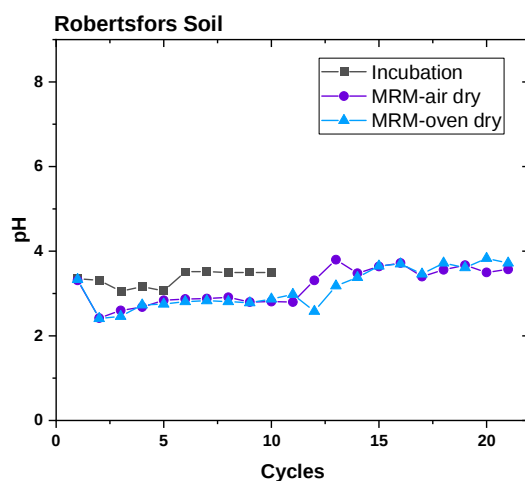
Bilaga 1 Indelning av sulfidjord utifrån förurningspotential

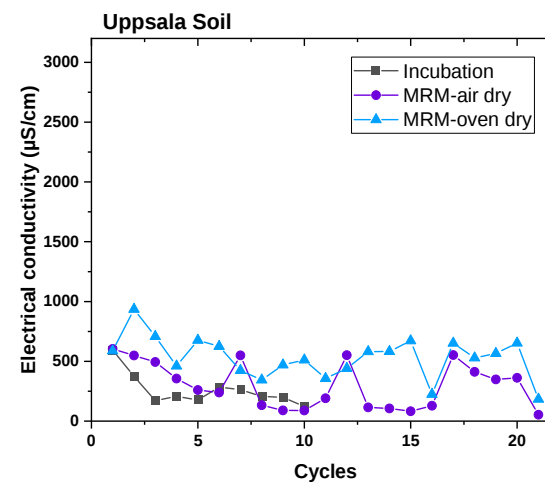
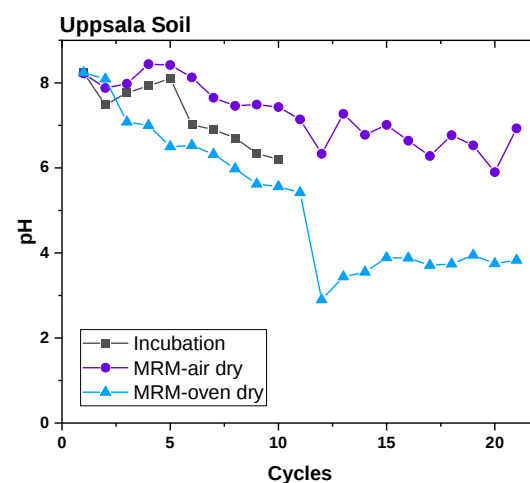
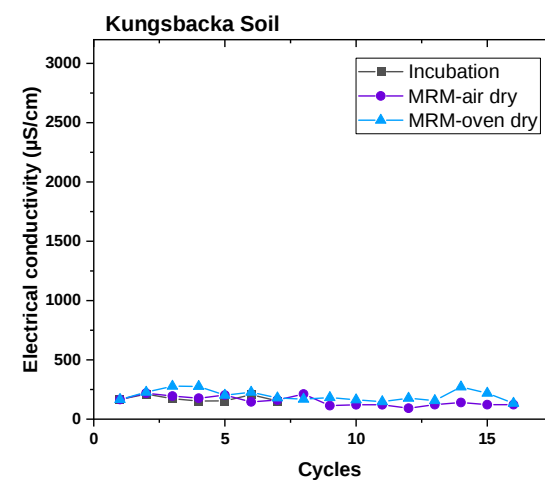
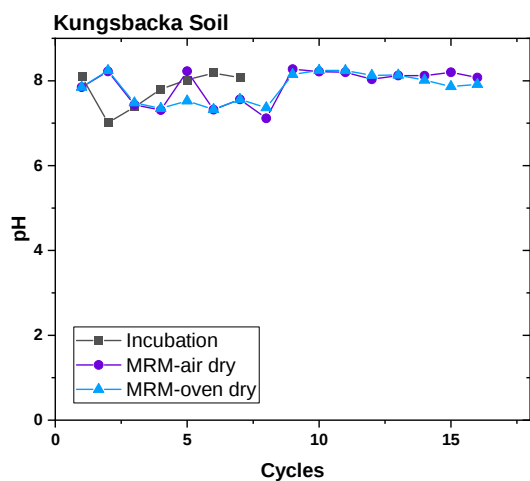
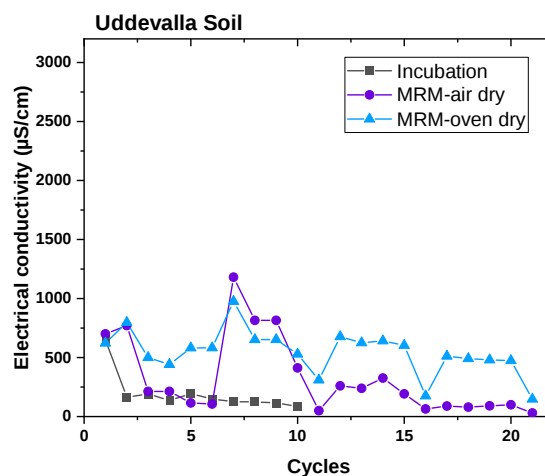
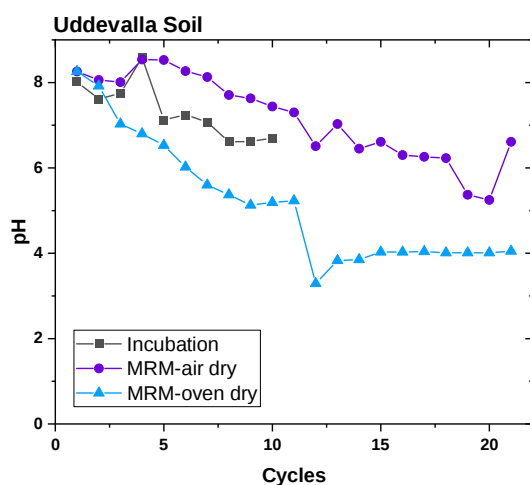
Ref TRV 2023

Beteckning	Klass	Beskrivning
Ao	Ej sulfidjord, Inte försurande, friklassad jord.	Jord med svavelhalter < 1 000 mg/kg TS och pH > 4,3.
A1	Sulfidjord/sulfatjord försumbar förurningsrisk	Jord med låga svavelhalter > 1 000 mg/kg TS och med hög buffringskapacitet.
B	Sulfidjord/sulfatjord låg förurningsrisk	Jord med svavelhalter >1 000 mg/kg TS och med buffringskapacitet.
C1	Sur sulfatjord låg förurningsrisk	Jord med låga svavelhalter <1 000 mg/kg, viss buffringskapacitet kvar, med lågt pH (< 4,3), torrskorpa.
C2	Sur sulfatjord med hög - mycket hög förurningsrisk	Jord med svavelhalter >1 000 mg/kg TS och utan buffringskapacitet. pH < 4,3 (torrskorpa- anoxisk).
D1	Sulfidjord med låg buffringsförmåga, hög förurningsrisk	Jord med svavelhalter mellan 1 000 och 4 000 mg/kg TS, låg buffringskapacitet.
D2	Sulfidjord utan buffringsförmåga, mycket hög förurningsrisk	Jord med svavelhalter >4000 mg/kg TS och utan buffringskapacitet.

Bilaga 2 Testresultat MRM- och inkubationstesterna

Element	pH	Svavel (S), mg/kg TS	Järn (Fe), mg/kg TS	Kalcium (Ca), mg/kg TS
Robertsfors	4	17 400	68 500	22 200
Uppsala	8,2	9 300	44 000	6 000
Kalmar	6,8	4 900	25 000	4 400
Uddevalla	8,7	3 500	43 000	6 200
Kungsbacka	8,5	1 500	32 000	32 000
Göteborg	8,3	6 800	26 000	21 000
Umeå	8,1 (3.8)	5 200	14 000	2 900





Bilaga 3 Ordlista

Anoxisk jord - Jord som befinner sig i syrefattig miljö där oxidation ännu inte har skett fullt ut. Typiskt pH-intervall är mellan 5 och 6. Jordtypen utgör ofta en övergång mellan helt anaeroba och aeroba förhållanden.

AASS – Aktivts sur sulfatjord, C2 och i viss mån C1 jordar.

Buffringskapacitet - Jordens förmåga att neutralisera syrabildning, främst genom närvaro av kalciumkarbonat (CaCO_3) eller andra basiska mineral. En hög buffrings-kapacitet innebär låg risk för försurning och bedöms vanligtvis genom kvoten mellan kalcium och svavel (Ca/S-kvot).

Ca/S-kvot - Förhållandet mellan kalcium och svavel uttryckt i mg/kg torrs substans (TS). Kvoten används som indikator på jordens buffringsförmåga. För södra Sverige innebär en Ca/S-kvot under 1,7 risk för försurning, medan motsvarande gräns i norra Sverige är cirka 5.

Fe/S-kvot - Förhållandet mellan järn och svavel i jorden. Kvoten visar jordens bildningsmiljö och graden av oxidation. En låg Fe/S-kvot tyder ofta på hög halt sulfider och större risk för syraproduktion.

Försurningspotential - Ett mått på hur snabbt och hur mycket pH sjunker när en sulfidjord exponeras för syre. Bedöms utifrån halter av svavel, kalcium, järn samt förändringar i pH vid laborietest.

Inkubationstest - Ett laborietest där jord hålls fuktig under kontrollerad miljö vanligen under 9 till 19 veckor. Under testet följs pH-förändringar över tid för att avgöra om jorden har potential att bilda syra genom oxidation av sulfider.

MRM-test - Metod som används för att simulera oxidation av sulfidjord. Jorden utsätts för upprepade lakningscykler för att mäta pH-fall och försurningshastighet. Resultaten visar hur snabbt och hur långt pH sjunker vid oxidativa förhållanden.

MRM-105 °C - Variant av MRM-testet där provet torkas vid 105 °C mellan lakningsstegen. Detta ger en konservativ eller "worst-case"-bedömning eftersom mikroorganismer dör och oxidation sker enbart kemiskt.

MRM-24 °C - Variant av MRM-testet med torkning vid rumstemperatur. Metoden steriliserar inte provet och ger ofta en mer representativ bild av naturliga fältförhållanden.

Optimass - Ett digitalt verktyg (www.optimass.se) som används för att bedöma sulfidjordars försurningspotential baserat på laboratordata. Verktöget används som beslutsstöd.

PASS – Potentiell sur sulfatjord, D1 och D2 jordar

pH(init) - Jordens pH-värde vid provtagningstillfället innan oxidation skett efter provtagning. Anger jordens naturliga pH-tillstånd.

pH(24 h) - pH-värde uppmätt efter 24 timmars luftning. Används som snabb indikator på jordens oxidationskänslighet.

pH(ox) - pH-värde efter fullständig oxidation i laboratorietest, MRM eller inkubationstest. Anger den "slutliga" försurningsnivån.

Selektiv schaktning - Metod där jordmassor separeras vid schaktning utifrån deras egenskaper, såsom färg, lukt, pH eller Ca/S-kvot. Syftet är att kunna återanvända massor med låg försurningsrisk och hantera riskmassor separat.

Sulfidjord - Naturlig jord, ofta bestående av lera, silt eller gyttja, som innehåller järnsulfider såsom FeS eller FeS₂. Jorden är stabil under grundvattenytan men kan försuras snabbt vid kontakt med syre.

Sur sulfatjord - Sulfidjord som redan oxiderat och bildat svavelsyra. Dessa jordar har ofta pH-värden under 4,3 och kan laka metaller samt orsaka försurning i mark och vatten.

Svavelhalt (S) - Total svavelhalt i jorden, uttryckt i mg/kg TS. En hög svavelhalt indikerar hög andel sulfider och därmed större risk för syraproduktion.

Torrskorpa - Den översta delen av tidigare vattenmättad lera som har torkat och oxiderat. Torrskorpan har ofta lägre svavelhalt men högre järnhalt än underliggande material.

TS (torrsubstans) - Andelen torrt material i ett prov efter torkning. Används som standardenhet för analys av halter och kvoter.

Uppkomst av sulfidjord - Sulfidjord bildas i syrefria marina eller sjömiljöer rika på organiskt material och järn, ofta under Littorinhavets utvecklingsfas. När sedimenten senare dräneras eller schaktas exponeras sulfiderna för syre och kan oxidera.

Bilaga 4 Provtagningsmanual av sulfidjord

1. Bakgrund

I tidigare projekt har sulfidjordar från Umeå i söder till Boden i norr undersökts, och ett bedömningssystem togs fram för att bedöma jordarnas förurningspotential. I det nu aktuella projektet vill vi undersöka sulfidjordar från södra Sverige, dvs sulfidjordar från Uppsala i norr söderut och vidareutveckla bedömningssystemet för att gälla även dessa sulfidjordar.

Sulfidjord förekommer främst i områden där det finns postglaciala sedimentmaterial, dvs lera, siltig lera och lerig silt samt gyttjiga leror. En bra indikator kan vara om materialet är svart eller svartbandat, men sulfider kan förekomma i lera som har grå färgnyans också, se figur 1. Naturlig sulfidjord är generellt ett jordmaterial som har metallhalter under riktvärdena för känslig markanvändning, dvs rena material.



Figur 1 Provtagning i sulfidhaltig lera södra Sverige. Sulfidlera behöver inte vara svart, allt som är svart är inte sulfidlera.

2. Syfte och mål

Syftet med projektet är att lokalisera och analysera sulfidjordar samt undersöka hur dessa kan påverkas av förurning vid oxidation. Målsättningen är att vidareutveckla bedömningssystemet för dessa sulfidjordar.

3. Metod

I projektet söker vi byggprojekt inom områden där postglacial lera förekommer. Vid fältundersökning tas ett dubblett jordprov i markprofilen (Prov A och Prov B), se tabell 1. Båda proverna skickas till lab. Ena provmängden (Prov A) analyseras på svavel, järn och kalcium, så kallad sulfidjordsanalys, inklusive jordens pH¹. Dubbletten (Prov B) sparas av laboratoriet för eventuell vidare undersökning av jordens förurningspotential, dessa prov skickas till Luleå tekniska universitet². Urvalet av vilka B prov som undersöks vidare görs av projektet baserat på analysvar vad gäller svavelhalt, Ca/S- och Fe/S-kvot.

Provtagning av jordprover och analys på geo- och miljölabb för jordar görs som ett förberedande arbete för att kunna avgöra bästa sätt att omhändertaga jorden. Prover kan tas som störda prover från schaktgrop, med skruvprovtagare alternativt som ostörda prover med kolvprovtagare.

Proverna hanteras som miljöprover, dvs läggs i diffusionstät påse/glas behållare och förpackas i fält direkt efter provtagning se tabell 1. Fältanteckningar förs med följande indata:

- marknivåns höjd över havet,
- provets nivå under markytan, och bedömd grundvattennivå.
- jordart, foto
- anmärkningar och labanalys.

Från respektive nivå tas ett prov på ca 500 g och homogeniseras i en diffusionstät påse. Ur det homogeniserade provmaterialet uttas jordmaterial till en 250 ml glasburk. Undvik luft i behållaren, eventuellt tomrum fylls med vatten så att prover är täcks. Burken tillsammans med provet i den diffusionstäta påsen skickas på analys till lab. (*OBS! Provmängden anpassas så att efter uttag av 250 ml prov finns det minst 150 g prov kvar i den diffusionstäta påsen.*) Jordanalys utförs enligt kemisk analys av sulfidjord. Analys av S, Fe Ca och pH. Jordens pH mäts direkt innan provet påverkas av luft, pH(opåverkad).

Utifrån haltnivåer på S, Fe, Ca och uppmätta pH väljs prov ut för kompletterande MRM-läkningstest, se Tabell 1.

Tabell 1. Miljöanalys för klassning.

Exempelvis skruvprovtagning (störd)
a. Fält - Plats (kommun) • Foto • Jordartsbestämning³, nivå (möh och under grundvattenytan) - Eventuell pH-mätning - Paketering Prov A - diffusionstät påse där provet homogeniseras, uttag av prov B ur påsen med homogeniserad sulfidjord i 250 ml burk. Burken fylls med vatten. b) Miljölabb – Diffusionstät påse (prov A) - Analys av S-, Fe-, och Ca-halter i jord, samt pH i jord utan extra torkning. - Vattenkvot (TS-halt) c) Miljölabb (Prov B) 250 ml burk - <i>OBS! burken fylls med vatten. Dessa prov förvaras av labbet för vidare transport till LTU.</i> • LTU -geolab: Lakanalys enligt MRM-metoden.

Viktigt att fältnoteringar, foto finns och att provet homogeniseras innan fördelning och kan kopplas till analysresultat.

Prov-A. Jordanalys utförs enligt sulfidjordsanalys. Jordens pH mäts direkt innan provet påverkas av luft, pH(opåverkad), och sedan efter att provet fått torka 24 h, pH(luftat).

Prov-B. Från respektive lokal och nivå sparas för eventuella MRM-lakterester för verifiering av försurningspotentialen på lång respektive kort sikt. Provmängd, 250 ml räcker för att komplettera med försurningstest.