



# RAPPORT

## Effektiv bedömning och hantering av sulfidjordar

RESULTAT FRÅN FOI-PROJEKTET MANAGEMENT OF  
SULPHIDE SOILS (MOSS 2)

# Innehåll

Innehåll .....	2
Förord.....	4
Sammanfattning.....	5
1. Bakgrund.....	7
1.1 Syfte och målsättning .....	8
1.2 Rapportens uppbyggnad .....	9
2. Sulfid- och sulfatjordar .....	9
2.1 Bedömning/karakterisering .....	10
2.2 Oxidation och buffring.....	11
2.3 Klassning av sulfidjordar för korrekt hantering .....	11
2.4 Lakningsegenskaper .....	12
2.5 Digitalt verktyg.....	13
3. Planering för en mer hållbar sulfidjordshantering i tidiga skeden .....	14
3.1 Klassificering under planläggningskedet .....	15
3.2 Plan för sulfidjordshantering som en del av bygghandlingen .....	16
3.3 Erfarenheter från Norrbotniabanan.....	17
4. Selektiv hantering av sulfidjord under byggskedet .....	17
4.1 Planering för selektiv schaktning .....	19
4.2 Provtagning.....	19
4.3 Framtagande av schaktmodell .....	20
4.4 Fältbaserad XRF-mätning .....	21
4.5 Erfarenheter från Norrbotniabanan och Sunderby sjukhus .....	22
5. Avsättning av schaktad sulfidjord .....	25
5.1 Metoder att tillgå.....	25
5.2 Stabilisering av jordmassor genom inblandning av buffrande material.....	29
5.3 Ytbehandling av jordmassor.....	33
5.4 Stabilisering av jordmassor med bindemedel .....	35
6. Slutsatser och rekommendationer .....	38
7. Referenser.....	42
Bilaga 1 - Bedömning av sulfidjord, försurningspotential .....	43
Bilaga 2 - Provtagningsplan, förslag på innehåll.....	51

Bilaga 3 – Stabilisering av sulfidjord .....	54
1 Bakgrund och syfte.....	0
2 Kemisk stabilisering av schaktad sulfidjord.....	2
2.1 Bakgrund.....	2
2.2 Syfte.....	3
2.3 Behandling av lakvatten .....	3
2.3.1 Metod .....	3
2.3.2 Resultat .....	4
2.4 Behandling av porvatten – inblandning av tillsatsmedel i jord ...	5
2.4.1 Metod .....	5
2.4.2 Resultat.....	6
2.5 Behandling av porvatten – jämförelse av lager och inblandning av tillsatsmedel i jord .....	10
2.5.1 Metod .....	10
2.5.2 Resultat .....	11
2.6 Direkta effekter av lagrade överskottsmassor .....	13
2.6.1 Metod .....	13
2.6.2 Resultat.....	13
3 Geoteknisk stabilisering av schaktad sulfidjord .....	15
3.1 Syfte.....	16
3.2 Material och metod .....	16
3.3 Resultat .....	18
4 Slutsatser .....	23
5 Referenser.....	25

## Förord

Denna rapport är resultatet av FoU projektet management of sulphide soils (MoSS<sub>2</sub>). Projektet finansierades av SBUF och Trafikverket, samt deltagande aktörer. I projektets referensgrupp deltog: Urban Qarlsin, Skanska, Jens Nolin, Peab, Niklas Nilsson, NCC och Gustav Sohlenius, SGU.

Rapporten syftar till att ge en fördjupa förståelsen för sulfidjordars egenskaper och risker. Målet är att främja en hållbar hantering av dessa jordar inom ramen för bygg- och infrastrukturprojekt genom att tidigt identifiera försurningsproblem och att hantera jordarna utifrån deras försurningspotential.

Projektdeltagare:

Ecoloop  
Luleå Tekniska Universitet  
Ramboll  
Swerock  
Mitta  
Ragn-Sells  
Dåva DAC  
Lumire Luleå Miljöresurs

## Sammanfattning

Sulfidjordar har höga ler- och silthalter och är därför besvärliga ur ett geotekniskt perspektiv. Försurning kan uppstå när sulfidjord med försurande egenskaper utsätts för syre, antingen naturligt på grund av landhöjningen eller när sulfidjord grävs upp och exponeras för luft. Luften oxiderar jorden vilket leder till att jordens pH sjunker, vilket i sin tur leder till att jordens metaller kan komma att lakas ut. Utlakning av metaller kan medföra skador på vattenlevande organismer.

Genom god kunskap om sulfidjordars egenskaper kan schaktad jord hanteras säkert och försurning kan undvikas. Syftet med den här rapporten är att presentera kunskap och underlag för en miljö- och resurseffektiv hantering av schaktad sulfidjord i bygg- och infrastrukturprojekt. Målet är att främja en hållbar hantering av överskottsmassor genom att tidigt i byggprocessen identifiera förekomst av sulfidjord. Det ger möjlighet att underlätta hanteringen genom att redan i planeringen kunna skilja ut olika typer av massor beroende på försurningsrisken. Målet är att kunna förbereda en selektiv schaktning där behov finns samt att hantera schaktad sulfidjord för att kunna avsätta dem på bästa sätt.

Projektet bygger på klassificering av sulfidjord utifrån försurningsegenskaper och presenterar utifrån den kunskapen ett digitalt verktyg som hjälpmedel (<http://68.183.223.77:5000/> på [optimass.se/](http://optimass.se/)). Verktöget kan användas redan i planeringsskede för att bedöma schaktmassors försurningspotential. Bedömningen baseras på innehåll av svavel, järn, kalcium, pH-värden samt information om provtagningsnivåns läge jämfört med grundvattennivån. Utifrån kunskapen om försurningsegenskaperna kan en masshanteringsplan tas fram där sulfidjord schaktas och hanteras selektivt utifrån försurningsrisk. Schaktmassorna bör kontrolleras löpande med fältinstrumentet XRF (X-Ray fluorescence). För att säkerställa korrektheten i fältkontrollerna krävs att ett och samma XRF-instrument används i samma projekt.

För att testa resultat i projektet gjordes klassificering, masshanteringsplan och selektiv schaktning i full skala vid planering och byggande av Trafikverkets Norrbottniabanan, sträckningen Umeå - Dåva. Erfarenheten från Norrbottniabanan visar på vikten att börja tidigt med planeringen för hanteringen av sulfidjord. En viktig lärdom var att masshanteringsplan och schaktmodell bör tas fram redan innan entreprenaden upphandlas. En annan viktig lärdom var att de geotekniska markundersökningarna tidigt i projekteringsprocessen bör kombineras med miljöteknisk undersökning för att identifiera sulfidjord.

Kompetensnivån behöver öka i alla led med avseende bedömning av sulfidjordar, från tidig planering till byggskedet. Det digitala verktyget kan minska beroendet av expertkunskap vid klassningen, men behovet av

utbildning är ändå stort. Utan att ha en tidig och god kunskap kan sulfidjordens volym både lätt underskattas. En grå sulfidjord kan till exempel lätt missbedömas att vara vanlig lera, vilket leder till underskattningar av volymen sulfidjord i ett projekt och därmed underskattningar i de ekonomiska kalkylerna. Selektiv schaktning och hantering gav dock en säkrare användning av de schaktade sulfidjordarna. Användningen baserades på jordens bedömda försurningspotential, där jord med risk för försurning har fått bättre täckning för att minimera oxidation. Den selektiva hanteringen säkrade också att enbart sulfidjord med försurningspotential som deponeras. Övriga schaktmassor kunde hanteras separat som icke försurningsbenägna jordar och nyttjas på annat sätt.

## 1. Bakgrund

Sulfidjordar är besvärliga ur geotekniskt perspektiv. Pålning, stabilisering eller schaktning och bortforsling är alternativen för att ge en stabil grundläggning. Schaktmassor som består av sulfidjord med försurningspotential utgör dock också en miljörisk, då dessa vid felhantering kan orsaka försurning av yt- och grundvatten med förhöjda halter av aluminium med skador på vattenlevande organismer som konsekvens.

Sulfidjord bildas under anaeroba (syrefria) förhållanden på havsbotten, är finkornig och innehåller järnsulfider. Områden i Sverige där sulfidjord förekommer i markprofilen är längs Östersjökusten från Mälardalen i söder till Haparanda i norr, ofta på nivån under 65 meter över havet vilket sammanfaller med Littorinahavets utbredning efter senaste istiden. På motsvarande sätt förekommer sulfidjord längs den finska kusten av Bottenviken (Figur 1).

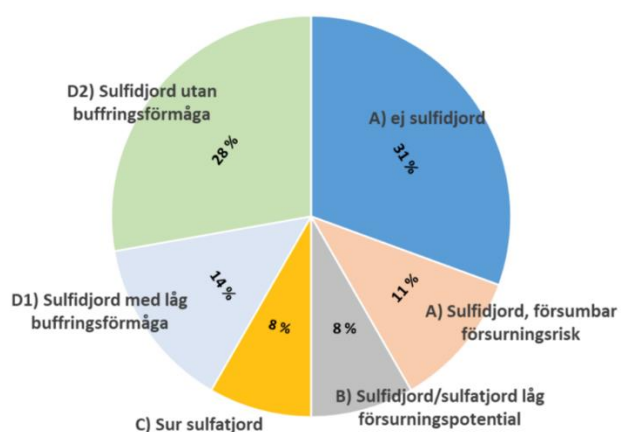
**Figur 1. Förekomst av sulfidjord är ungefär den samma som utbredningen av Littorinahavet efter senaste istiden. Källa: Wikipedia**



Grundvattensänkning som orsakas av infrastrukturprojekt kring byggnads- och vägprojekt, men också av dikning för jord- och skogsbruk, gör att sulfidjordar dräneras vilket medför försurning. Utan en snabb klassning av sulfidjordar utifrån försurningsegenskaper saknas den ekonomiska möjligheten att utveckla anpassade och miljöriktiga hanteringsalternativ. Detta innebär att sulfidjord ofta, för säkerhets skull, läggs på deponi vilket kan leda till långa transporter, ökade CO<sub>2</sub>-utsläpp och en dyr hantering. Hantering av sulfidjord bromsas alltså av att branschen saknar snabb och tillförlitlig metod att sortera, selektivt schakta och förflytta olika sulfidjordar.

Projektet MoSS 1-Management of Sulfide Soils, som genomfördes 2017–2019, utvecklade ett bedömnings- och klassningssystem för sulfidjordar (Figur 2). Detta användes därefter för att revidera Trafikverkets Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor.

**Figur 2. Principskiss på indelning av sulfidjord baserat på det föreslagna bedömnings-och klassningssystemet som togs fram i FOI projektet MoSS 1. Källa: Mácsik, 2019**



Bedömnings och klassningssystemet, som klassar sulfidjord utifrån försurningsegenskaper, öppnar möjligheten till friklassning av sulfidjord som saknar försurande egenskaper. Genom en förbättrad metodik för karaktärisering och klassning av sulfidjordar kan minst 40 % av den volymen som klassades som sulfidjord friklassas och användas (Mácsik, 2019). Ett väl utvecklat hanteringssystem baserat på klassning utifrån försurningspotential gör att ytterligare 30 % av sulfidjorden kan användas genom stabilisering som buffrar försurningseffekterna.

## 1.1 Syfte och målsättning

Syftet med den här rapporten är presentera kunskap och underlag för en miljö- och resurseffektiv hantering av schaktad sulfidjord. Underlaget ska kunna utgöra en grund till vägledning om sulfidjord.

Målet är att bygg- och infrastrukturprojekt ska främja en hållbar hantering av överskottsmassor genom att kunna:

- Identifiera förekomst av sulfidjord och underlätta hanteringen av denna, genom att tidigt i byggprocessen skilja ut olika typer av massor beroende på försurningsrisken.
- Förbereda selektiv schaktning där behov finns.
- Hantera schaktad sulfidjord för att kunna avsätta dem på bästa sätt.



## 1.2 Rapportens uppbyggnad

Rapporten redogör för det övergripande resultatet av projektet Management of Sulphide Soils, MoSS 2. I kapitel 2 finns en allmän beskrivning över vad en sulfidjord är och mer specifikt vad som karakteriserar dessa jordar samt hur det digitala verktyget för klassificering fungerar. I kapitel 3–5 beskrivs hur en mer hållbar hantering av sulfidjordar kan uppnås i byggprocessen. I kapitel 6 ges sedan övergripande slutsatser och rekommendationer för hantering och avsättning av sulfidjordar.

I bilaga 1 finns en detaljerad manual för användning av klassificeringsverktyget och i bilaga 2 en provtagningsplan. I bilaga 3 återfinns mer detaljerad information om avsättning av schaktade sulfidjordar, antingen genom kemisk behandling eller geoteknisk behandling.

## 2. Sulfid- och sulfatjordar

En förutsättning för begreppet sulfidjord är att jorden innehåller en viss mängd svavel (S-) och järn ( $\text{Fe}_{2+}$ ) och att jorden är anaerob (ligger under grundvattenytan). Sulfidjordar karakteriseras av förhöjda halter av järnsulfider, exempelvis FeS och  $\text{FeS}_2$ , vilka under reducerande (syrefria) miljöer är mycket stabila. En sulfidjords halt av svavel (S-) och järn ( $\text{Fe}_{2+}$ ) är beroende på var och när sulfidjorden har bildats. Jordarnas halt av järnsulfider kan variera stort, till och med mellan olika närliggande dalgångar. Typisk svavelhalt i en sulfidjord varierar mellan 1 000 och 20 000 mg/kg TS, men halter över 20 000 mg/kg TS förekommer. Sulfidjord kan efter många års aerob påverkan oxideras och omvandlas till sulfatjordar. Under denna oxidation sänks markens och porvattnets pH, och om jorden saknar kapacitet att buffra kan oxidationen leda till pH under 4, det vill säga sur sulfatjord bildas. Vid nederbörd lakas höga halter av sulfat och aluminium till närliggande vattendrag. Generellt gäller att en högre halt av järnsulfid i jorden ökar risken för att det bildas sur sulfatjord vid grundvattensänkning orsakad av dränering.

Grundvattennivåns variation leder till cykler av oxiderande och anaeroba förhållanden som efter många år till decennier utarmar jorden på sitt innehåll av svavel. Den oxiderade torrskorpan, högst upp i markprofilen, blir till slut utlakad på svavel. Svavelhalten ökar sedan vanligtvis med djupet. Sulfatjordars pH är en produkt av järnsulfiders försurande kapacitet och jordens buffrande kapacitet.

Beroende på oxidationsnivå och pH dominerar därför sulfatjord i den oxiderade delen av finjorden (torrskorpan) och sulfidjord under

grundvattenytan. Gränsen mellan sulfidjord och sulfatjord är diffus, men ligger runt pH 6,3.

Metodiken som utvecklades i projektets del 1 återges i kapitel 2.1. Metoden använder försurningspotentialen för att avgöra om sulfidjorden på sikt kan orsaka sänkning av pH eller inte. Svavelhalter på 1 000 mg/kg TS har satts som nedre gräns för anaeroba sulfidjordar som kan orsaka försurning. Som jämförelse kan nämnas att en studie utförd av (SGU 2015) visar att svavelhalter <2 000 mg/kg TS ger som mest en pH-sänkning på cirka 2 enheter. Principiellt betyder det att om jorden har pH>6,3 bör dessa sulfidjordar inte klassas som försurande vid svavelhalter lägre än 2 000 mg/kg TS.

## 2.1 Bedömning/karakterisering

Faktorer som påverkar jordens försurningspotential

- Innehåll av S och Fe

Sulfidjord – I anaeroba (syrefria) miljöer förekommer svavel som sulfid ( $S^{2-}$ ) och järn som  $Fe^{2+}$ . Dessa bildar järnsulfider, såsom  $FeS$ ,  $FeS_2$ . Järnsulfider är svårlösliga och är stabila i anaeroba förhållanden.

Sulfatjord - I aeroba (syrerika) miljöer förekommer svavel som sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) och järn som  $Fe^{3+}$ . Sulfat är lösligt medan  $Fe^{3+}$  bildar oxider och hydroxider som är svårlösliga.

- Innehåll av Ca (kalцит,  $CaCO_3$ ) i form av skalrester, kalkhaltigt material som kan verka buffrande.
- Innehåll av organiskt material.
- Vattenmättnadsgrad
- Jordmaterialets pH och redoxmiljö. Oxiderad finkornig jord, (torrskorpa) utgörs ofta av sur sulfatjord med låga pH, (pH<4,3). En anaerob sulfidjord under grundvattenytan har normalt ett högre pH än 6,3.

För bedömning/karakterisering av sulfid- och sulfatjordars försurande egenskaper, se bilaga 1.

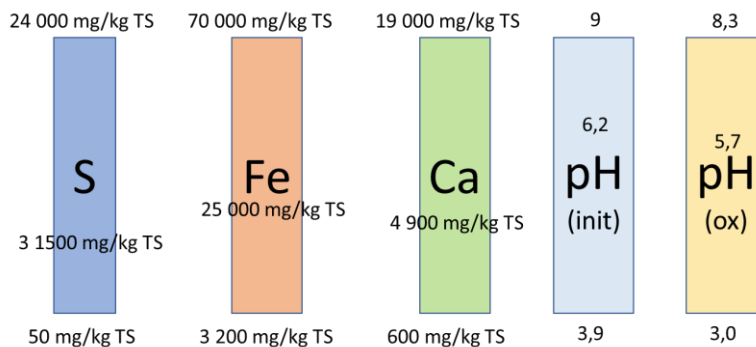
## 2.2 Oxidation och buffring

Sulfidjordens pH, redox, svavel- och järnhalter förändras när jorden påverkas av oxidation (syresättning). Vid aerob påverkan sänks pH och en typisk sur sulfatjord har pH <4,3 (Figur 2).

Jordens försurningspotential bestäms av pH-sänkningen som initieras av att jorden oxideras. För en opåverkad sulfidjord med svavelhalt >2000 mg/kg TS kan sänkningen vara markant (SGU, 2015). Oxidationen medför att markens svavelinnehåll minskar genom utlakning och sulfidjorden omvandlas till sulfatjord. När oxidation har pågått länge är denna sänkning markant och kvarvarande halten av svavel är på en nivå på några hundra mg/kg TS, medan jordens pH har sänkts under pH 4 (Figur 3). Sänkningen av pH buffras om jorden innehåller kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) som kan neutralisera försurningen.

Jordens kalcithalt utgör en naturlig buffert och höga halter av kalciumrika skalrester kan buffra försurning även om sulfidjordens svavelhalt är hög. Torrskorpan lakar även järn, men halterna som är kvar i jorden som oxider/hydroxider är hög. Det medför att kvoten mellan Fe/S ökar om en anaerob sulfidjord omvandlas till sur sulfatjord (Figur 3). Profilens Fe/S-kvot sjunker därmed med djupet. I jordar som inte är sulfidjord sker det ingen sänkning av pH till värden under 6,3 och halten av svavel är generellt låg med Fe/S-kvot långt över 60.

**Figur 3. Sulfid-/sulfatjordars typiska pH-värden samt, svavel- och järn- och kalciumhalter (max, medel och min).**



## 2.3 Klassning av sulfidjordar för korrekt hantering

Klassningen av sulfidjord bör utgå från jordens svavelinnehåll, dess pH och dess försurnings-/buffringspotential. För en mer hållbar hantering av sulfidjordar är det viktigt att kunna identifiera jordar som inte är sulfidjord, samt sulfidjordar vars buffringskapacitet kan hindra försurning. Idag bedöms dessa jordar ofta felaktigt som sulfidjord med "försurningspotential". Det innebär att sulfidjordar, oberoende av faktisk försurningspotential, hanteras

genom deponering som i sin tur leder till brist på deponiplats till höga kostnader. En bättre sortering av jordar utan försurningsrisk kan hanteras enklare och tar inte upp deponiutrymme.

På samma sätt är det viktigt att oxiderad sulfidjord (sulfatjord) separeras från anaerob sulfidjord. En hopblandning kan leda till att även den anaeroba sulfidjorden oxideras och försuras. Halten av svavel samt pH hos sulfatjordar, samt kvarvarande försurningspotential är viktiga parametrar för att dessa jordar ska kunna hanteras och eventuellt användas. Sulfatjordar behöver inte nödvändigtvis vara sura om jordens buffringkapacitet är tillräckligt stor eller om jorden buffras innan användning. Effekten är samma, det vill säga utlakning av metaller är minimal.

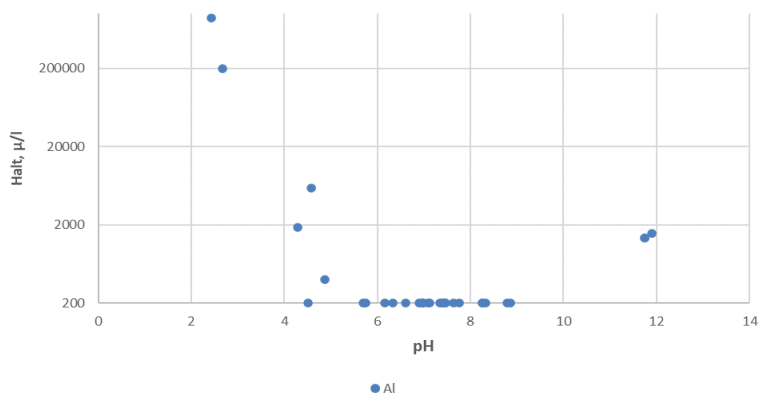
På motsvarande sätt kan anaeroba sulfidjordar buffras/stabiliseras beroende på försurnings- och buffringspotential. De sulfidjordar som bedöms som besvärliga, på grund av stor försurningspotential och/eller dåliga geotekniska egenskaper, behöver även i fortsättningen deponeras för att minimera risken för oxidation och försurning. Alternativet är exempelvis in situ-stabilisering.

Bedömning tidigt i projekteringen kommer att vara nödvändig för att kunna selektivt schakta, sortera och hantera sulfid- och sulfatjord. Det är viktigt att metodiken är enkel och fältmässig.

## 2.4 Lakningsegenskaper

Sulfidjord och sur sulfatjord med svavelhalter mellan 3000 mg/kg TS och 25 000 mg/kg TS, kan laka bland annat aluminium vid låga och höga pH (Figur 4). Sur sulfatjord (med pH under 4) lakar mycket höga halter av aluminium. Vid pH 2,4 kan lakvattnets aluminiumhalt överstiga 200 000 µg/l. Vid pH-värden mellan cirka 4,3 och 8,9 är halten aluminium däremot under detektionsvärdet (<200 µg/l). Vid tillsats av mer än 8 % bindemedel, exempelvis cement, kan lakvattnets pH stiga till > 11, med ökad aluminiumutlakning som följd (Figur 4).

**Figur 4 Aluminiumhalt i lakvatten från sulfidjord med och utan tillsats av stabiliseringsmedel.**



## 2.5 Digitalt verktyg

Som stöd till arbetet med att identifiera förekomst av sulfidjord och därmed kunna underlätta hanteringen, har ett digitalt verktyg tagits fram av MoSS 2, (<http://68.183.223.77:5000/> på [optimass.se](http://optimass.se)) samt en manual för användning (Bilaga 1).

Verktyget är framtaget med data från fler än 300 sulfidjordsprover som analyserats vid Norrbotniabanan sträckan Umeå - Dåva. Baserat på dessa resultat klassades sulfidjordsproverna utifrån försurningsegenskaper. Det digitala verktyget utför bedömningen av vilken typ av sulfidjord som finns längs sträckan baserat på analys svar av svavel-, kalcium, järnhalter och pH.

Utdata från det digitala verktyget ger en indelning i olika klasser utifrån potentiell försurningsrisk, från friklassning (ej sulfidjord) till sex olika nivåer av försurningspotential (Tabell 1.). Målsättningen med verktyget är att minska beroendet av expertkunskap vid klassningen och därmed korta ner svarstiden. Klassificering ger möjlighet att i ett tidigt skede upprätta masshanteringsplan som inkluderar sulfidjordarna, vilket i sin tur möjliggör selektiv schaktning och hantering och säkrare användning av de schaktade sulfidjordarna. Användningen baseras på jordens bedömda försurningspotential, där jord med risk för försurning får mer avancerad täckning för att minimera oxidation.

**Tabell 1. Klassning av sulfidjordens potentiell försurningsrisk. Klassningen ger underlag för att avgöra bästa sätt att omhänderta jord som ska skiftas ut eller schaktas bort**

Beteckning	Klass	Beskrivning
A0	Ej sulfidjord	Svavelhalt < 1 000 mg/kg TS och pH > 4,3 Inte försurande. Friklassad jord.
A1	Sulfidjord/sulfatjord försumbar försurningsrisk	Svavelhalt > 1 000 mg/kg TS och med hög buffringskapacitet. Försumbar försurningsrisk.
B	Sulfidjord/sulfatjord låg försurningsrisk	Svavelhalt > 1 000 mg/kg TS och med buffringskapacitet. Låg försurningsrisk.
C1	Sur sulfatjord låg försurningsrisk	Svavelhalter < 1 000 mg/kg, viss buffringskapacitet kvar. pH < 4,3, torrskorpa. Låg försurningsrisk.
C2	Sur sulfatjord med försurningsrisk	Svavelhalt > 1 000 mg/kg TS och utan buffringskapacitet. pH < 4,3, torrskorpa - anoxisk. Försurningsrisk – mycket hög försurningsrisk.
D1	Sulfidjord med låg buffringsförmåga, hög försurningsrisk	Svavelhalt mellan 1 000 och 4 000 mg/kg TS, låg buffringskapacitet. Hög försurningsrisk.
D2	Sulfidjord utan buffringsförmåga, mycket hög försurningsrisk	Svavelhalt > 4000 mg/kg TS och utan buffringskapacitet. Mycket hög försurningsrisk.

För att få tillförlitliga svar i klassificeringen bör jordens pH mätas vid två tillfällen, där det första är direkt vid provtagning, det vill säga jorden påverkas minimalt och representerar jordens befintliga pH, och det andra tillfället där jorden har låtit oxidera efter provtagning (

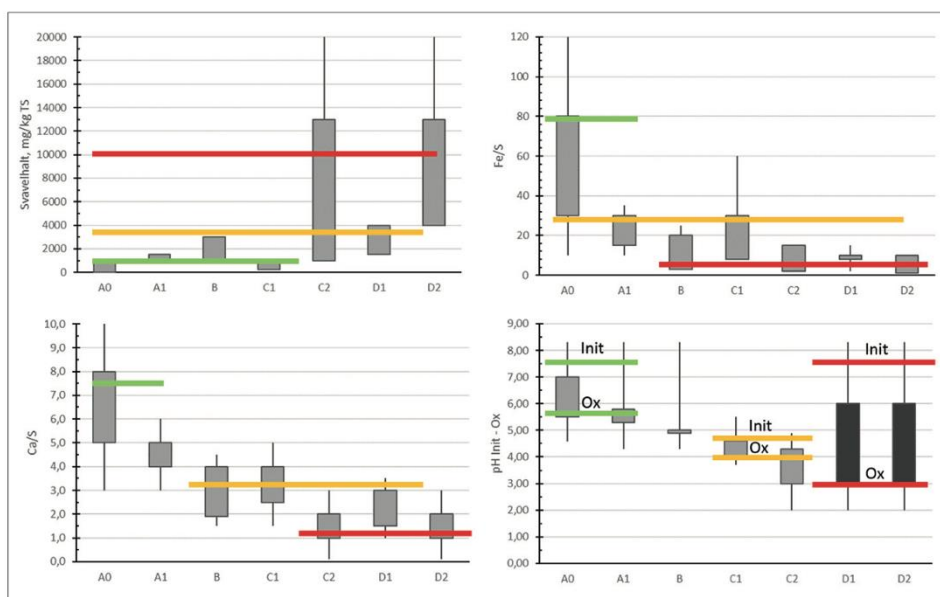
Tabell 2).

**Tabell 2 Analyser och provmängd för bedömning av försurningspotential.**

Analysparameter	Beskrivning	Parameter	Provmängd**
Svavel	Uppslutning med salpetersyra	S	50
Järn	Uppslutning med salpetersyra	Fe	50
Kalcium	Uppslutning med salpetersyra	Ca	50
pH (init)	pH direkt i lab	pH	100
pH(ox)	pH efter 24 h luftning	pH	100

Principen för kriteriegrunderna visas nedan, med exempel på tre olika jordar, en som inte är sulfidjord, en som är sur sulfatjord med låg försurningsrisk och en sulfidjord med hög försurningsrisk (Figur 5).

**Figur 5. Grundläggande bedömningskriterier för S, Fe/S-kvot, Ca/S-kvot och pH, med tre olika exempeljordar med jord som inte är sulfidjord (A0, grön linje), sur sulfatjord med låg försurningsrisk C1, gul linje) och sulfidjord med hög försurningsrisk (D2, röd linje).**



### 3. Planering för en mer hållbar sulfidjordshantering i tidiga skeden

För att uppnå en hållbar och resurseffektivhantering av sulfidjord krävs en bedömning av jorden redan i tidiga skeden av plan- och byggprocessen.

Provtagning och planering för sulfidjorden behöver sedan finnas med och inkluderas genom hela plan- och byggskedet. I de tidiga skedena kan arbetet baseras på arkivkunskap eller enstaka jordprover för att sedan succesivt förfinas till detaljerad kunskap som bygger på både provtagning, detaljerade fältmätningar och observationer.

**Figur 6. Planläggningsprocess på en övergripande nivå från åtgärdsvalsstudie, via till vägplan eller järnvägsplan, till byggskede (Källa: Trafikverket, 2023)**

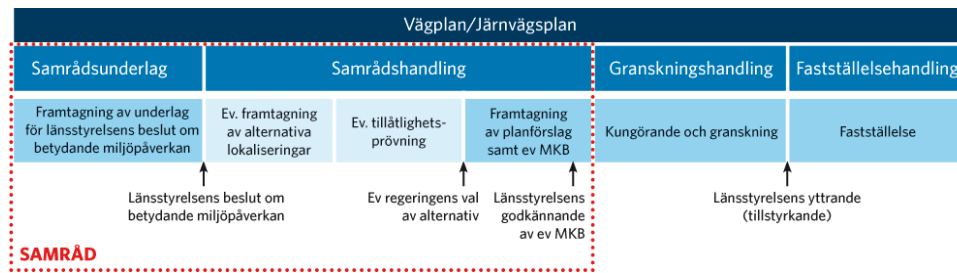


Planeringen av en väg eller järnväg startar i och med en konstaterad brist i transportsystemet, genom en så kallad *åtgärdsvalsstudie* (Figur 6). En sådan studie behandlar vilka typer av åtgärder, oavsett trafikslag, som är möjliga att vidta för att lösa ett konstaterat transportproblem. Efter åtgärdsvalsstudien startar planläggningen. Inom ramen för planläggningen planeras var och hur vägen eller järnvägen ska byggas. Redan under den tidiga planläggningen, lokaliseringsskedet, bör den första klassificeringen av sulfidjord tas fram (se kapitel 3.1). Resultatet av planläggningsprocessen beskrivs och redovisas i en *vägplan* respektive en *järnvägsplan*. När väg- eller järnvägsplanen är klar upprättas bygghandling. Bygghandlingen fungerar som underlag för byggarbetet och innehåller också krav på försiktighetsmått och skyddsåtgärder. Under bygghandlingsskedet bör sulfidjorden på nytt klassificeras baserat på fler dataanalyser och med hjälp av fältinstrument (se kapitel 3.2) Utifrån klassificeringen detaljplaneras för schaktning, lokal hantering av dessa massor och eventuella skyddsåtgärder. Sulfidjordshanteringen kopplat till byggskedet beskrivs i kapitel 4.

### 3.1 Klassificering under planläggningsskedet

Detta verktyg kan användas som stöd för att kunna planera för sulfidjordshanteringen under hela planläggningsprocessen och bli en del av beslutsunderlaget i såväl lokaliseringsutredningen som planförslag och MKB (Figur 7). Med hjälp av verktyget kan mängden sulfidjord med försurande egenskaper prognosticeras utifrån enkla data.

**Figur 7. Planläggningsprocessen med vägplan eller järnvägsplan för projekt som eventuellt har olika lokaliseringar; eventuell tillåtlighetsprövning samt eventuellt betydande miljöpåverkan. Källa: Trafikverket, 2023.**



Under de tidiga planeringsskedena, vid framtagningen av samrådshandling, är det inte alltid som jordprover med analys svar finns att tillgå, dock kan det i ett sådant tidigt skede finnas arkivdata eller enstaka provresultat som kan användas. Klassificeringen blir då inte lika säker men kan användas som indikation på om det finns sur sulfatjord längs den planerade stäckningen och som ett underlag för vidare utredningar. Klassificeringen kan enkelt och snabbt göras om fler gånger, när fler provtagningar och analyser finns att tillgå. Under entreprenaden utgör klassificeringen underlag för schaktplan, selektiv schaktning och kontroll.

### 3.2 Plan för sulfidjordshantering som en del av bygghandlingen

När bygghandlingen för ett byggprojekt tas fram ska dessa utgå från resultat som tagits fram under planläggningen. Under framtagande av bygghandling kompletteras planläggningens provtagningar med en detaljerad plan för hur olika sulfidjordar ska hanteras. Planen inkluderas med fördel i PM masshanteringsanalys och inkluderar:

- klassificering av sulfidjordens försurningsegenskaper baserat på fler prover och en beskrivning hur respektive klass ska hanteras
- Volymer per klass (A<sub>1</sub>-D<sub>2</sub>)
- beskrivning av var de olika jordarna är med xyz-koordinater.
- förslag på schaktmodell
- val av plats och konstruktion där sulfidjorden kommer att användas med volymer och funktion,
- Kalibrering av laboratorieanalys- och fältinstrumentet XRF (X-Ray fluorescence) med avseende på jordens svavelhalt.

Målsättningen är att planera användning som konstruktionsmaterial i så utsträckning det går.



Under byggskedet kan vald entreprenör och konsult använda underlaget, som eventuellt kompletteras för att förfina schaktmodellen, korreleringen och/eller indelningen av sulfidjorden.

### 3.3 Erfarenheter från Norrbotniabanan

Klassningen sulfidjordens potentiell försurningsrisk användes och testades i ett pilotprojekt längs Norrbotniabanan, sträckan Umeå - Dåva. Masshaneringsplan med selektiv schaktning och hantering togs fram utanför FoU-projektets ramar. Inför upphandlingen av entreprenör togs cirka 50 prover för att beskriva om det förekom sulfidjord eller inte. Dessa prov analyserades med avseende på innehåll av svavel, järn, kalcium samt jordens pH. Provsvaren användes sedan för att bedöma försurande egenskap (syrabildande och buffrande potential), se Tabell 1 samt Bilaga 1. I den inledande klassningen delades sulfidjord in i sju olika klasser från jord som inte är försurande (A<sub>0</sub> - C<sub>1</sub>) till jord med stor försurningspotential (C<sub>2</sub>- D<sub>2</sub>). Baserat på klassningen av sulfidjordsprofilen prognosticerades mängden sulfidjord med försurande egenskaper.

Erfarenheten från projektet är att klassningen fungerade väl. De för platsen aktuella besvärliga geotekniska förhållandena, se

Figur 8, med flytbenägen jord, nederbörd etc. och en sulfidjord som var skiktad begränsades antalet klasser som kunde separeras och hanteras selektivt till två klasser (se kapitel 4.3)

**Figur 8. Sulfidjord med besvärliga geotekniska egenskaper, från Dåvasträckan.**



## 4. Selektiv hantering av sulfidjord under byggskedet

Under byggtiden finns det ett behov av mätmetoder som konsulter/entreprenörer kan använda för kvalitetssäkring i fält, som

komplement till dagens manuella bedömningsystem. I detta kapitel beskrivs förutsättningar som bör vara uppfyllda för att praktiskt kunna tillämpa selektiv schaktning och hantering i sulfidjordsområden.

Att schakta selektivt är i sig ingenting nytt, det finns mycket erfarenheter från projekt som av olika orsaker separerat olika typer av jordar. Anledningen till att schakta selektivt kan variera, allt ifrån att nyttiggöra värdefulla material till att avgränsa föroreningar eller separera jordar med låg bärighet. I detta fall används klassificeringen av sulfidjords förurningspotential som grund för den selektiva hanteringen.

Det man bör göra inför entreprenadstart, under framtagande av bygghandlingen, är att utarbeta en plan som en del av masshanteringsanalysen, för hur sulfidbärande massor kan nyttiggöras i projektet kopplat till dess svavelinnehåll (se även kapitel 3.2). Byggskedets masshanteringsplan bör sedan innehålla information om hur massor med olika egenskaper är tänkt att nyttjas, bortskaffas, lagras inom arbetsområdet samt hur och på vilket sätt respektive jordtyp avser att nyttiggöras genom återvinning eller återanvändning inom eller utom projektet.

Genom att känna till områdets förutsättningar kan man i ett tidigt skede projektera avsättningsområden för sedimenten (till exempel parkeringsytor, bullervallar eller andra konstruktioner) alternativt ansöka om tillstånd för återvinning i anläggningsändamål. Dessa konstruktioner och dess massbehov behöver projekteras tidigt och följas upp löpande. Behovet av schaktmassor, exempelvis till en bullervall, ger viktig input till masshanteringsplanen. Att överskatta eller underskatta schaktvolymen kan fördyra hanteringen. Volymen som inte har avsättning kan i vissa fall behöva deponeras med långa transporter som följd. I anmälan alternativt tillstånd för att nyttja sulfidjord i exempelvis bullervallskonstruktion, finns volymangivelser som begränsar användningen av extra volymer som tillkommer under projektets gång på grund av att volymen underskattats. Det är viktigt att underlaget som används vid tillståndsärenden är väl underbyggda.

Idag genomgår ofta exploateringsområden såväl miljöteknisk som geoteknisk undersökning inför exploatering. Vid den geotekniska undersökningen görs en okulär bedömning om förekomst av sulfidjord i profilen. Den görs ofta på plats. Vid den miljötekniska undersökningen tas som regel prover för kemiska analyser. Den okulära undersökningen baseras på jordens utseende och konsistens och det händer att sulfidjord felaktigt klassas som en "vanlig" jord i det fall den är exempelvis "grå". Sulfidjordars, många gånger karakteristiska svarta färg beror på vilken form svavlet i jorden föreligger i. Exempelvis kan en jord innehållandes järnmonosulfid (FeS) få en väldigt distinkt svart/gråsvart färg, ofta i skiktningar medan en jord innehållandes pyrit (FeS<sub>2</sub>) inte ger någon färgskiftning alls då den är färglös,

detta innebär att potentiell färglös sulfidjord kan misstas som "vanlig" jord. Om den okulära bedömningen missar förekomst av sulfidjord analyseras inte provet och det förblir oidentifierad som sulfidjord. Utifrån tidigare utförda projekt som hanterat sulfidjordsschakter kan det inte nog beläggas vikten av att i ett tidigt stadium avgränsa vilka områden och schaktdjup/nivåer som bedöms påverkas av selektiv schaktning. Att utgå ifrån geotekniska undersökningar som utifrån jordarnas färg klassificerat finhaltiga jordar som sulfidbärande eller ej har visat sig opålitligt eftersom järnsulfiden pyrit (se kapitel 5.2.2) misstas då den är färglös.

#### 4.1 Planering för selektiv schaktning

Inledningsvis kontrolleras arbetsområdet, det vill säga det geografiska område som sätter ramarna för utförande av respektive objekt. Arbetsområdet kommer i sin tur, i enlighet med miljöbalken (1998:808) 15 kap, 1–2 §§ att påverka möjligheterna att återanvända eller återvinna schaktmassor i en entreprenad. För att få ett så bra upphandlingsunderlag som möjligt bör områden med potentiellt sulfidbärande sediment undersökas ur ett geotekniskt perspektiv inför planerad schakt. Som ett första steg att ta reda på om det finns sådana sediment inom ett specifikt område kan initialt en kontroll göras mot Sveriges Geologiska Undersöknings (SGU) webbaserade kartvisare för sur sulfatjord göras.

En masshanteringsplan bör tas fram tidigt i byggskedet och uppdateras löpande i takt med att ny information tillkommer som påverkar denna. Som stöd till masshanteringsplan samt förberedande arbete kan klassificeringssystemet i kapitel 3 ovan med fördel användas som underlag för beslut. Masshanteringsplanen blir avgörande för att uppnå massbalans, maximerat nyttiggörande av såväl inerta som sulfidbärande massor inom projektet samt minskade transport och deponeringsbehov.

Undersökning av områden där sulfidjord har potential att förekomma bör kompletteras med analyser. Ju mer genomarbetad undersökning desto bättre beslutsunderlag erhålls till projekteringsstadiet.

#### 4.2 Provtagning

En provtagningsplan tas fram vilken baseras på områdets förutsättningar såsom infrastruktur, befintlig bebyggelse, potentiell sulfidjordsförekomst, potentiellt förorenade områden, skyddsvärda områden. Provtagningsplanen för undersökning av sulfidförande sediment bör samordnas med geoteknisk provtagningsplan och eventuell provtagningsplan för undersökning av eventuell föroreningsförekomst. Ju mer detaljerad provtagningsplanen är, desto bättre underlag vid bedömning av eventuella risker och negativ påverkan de potentiellt sulfidbärande sedimenten kan medföra. Förslag på en provtagningsplans innehåll samt genomförande av provtagningen kan ses i Bilaga 2

### 4.3 Framtagande av schaktmodell

Resultatet från provtagningen sammanställs och utvärderas baserat på de projektspecifika förutsättningar som gäller för det angivna projektet samt framtagen masshanteringsplan. Som stöd för utvärderingen av resultaten används informationen från fältprotokoll samt utfall på analyser i enlighet med den metodik som beskrivits ovan för separering av olika typer av jordar med eventuellt skilda egenskaper. Utifrån erfarenheter från andra projekt rekommenderas inte att dela upp schaktplanen i mer än 2-3 olika typer av jordtyper i schaktmodellen.

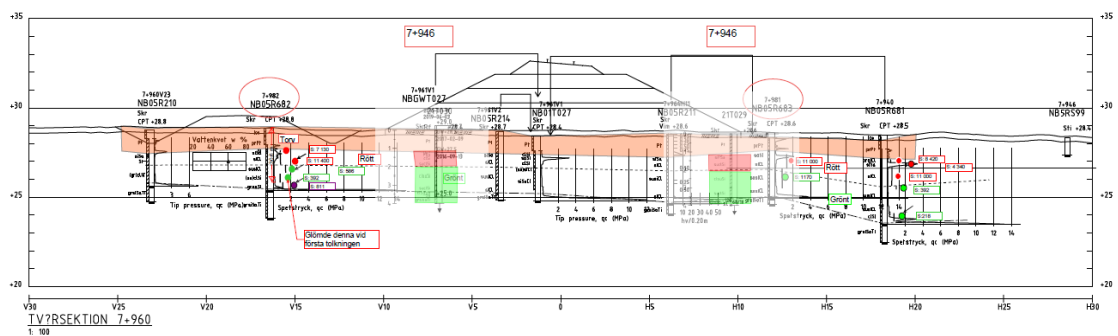
Schaktmodellen bör vid större schakt vara färdig innan schaktning påbörjas, eventuella tillägg i modellen bör inte göras under pågående schakt utan bör göras med god framförhållning för att säkerställa att det finns förankring hos samtliga inblandade parter.

Vad gäller sulfidjord finns karakteristiska drag och mönster över dess egenskaper, däribland hur svavelhalten avtar allt eftersom profilen syresätts och oxiderar och omvandlas från anaerob sulfidjord till sulfatjord (se även kapitel 2).

För att möjliggöra en tillämpad schaktmodell krävs att vissa förenklingar tillåts vid klassuppdelningen då till exempel svavelhalten varierar naturligt inom vissa intervall i såväl horisontal- som vertikalled. Utfallet inom en tänkt schaktvolym kan variera mellan 2 eller fler klasser enligt kap 2 och 3 ovan. I praktiken kan en viss halt på svavel behöva överskridas vid vissa tillfällen för att kunna ta fram en tillämpad schaktmodell, till exempel högre halter i tunnare skikt. Detta då det i praktiken är svårt att schakta "tunna" skikt, särskilt i flytbenägna och plastiska jordar. Bedömningen är dock robust i och med att det är tre tydliga intervall på svavelhalt, < 1000 mg/kg TS, 1000 – 4000 mg/kg TS och >4000 mg/kg TS som används vid klassningen. Variationen hur försurningspotentialen bedöms utgår sedan från jordens buffringskapacitet och dess pH. Detta ger att mindre variationer i exempelvis svavelhalt påverkar på marginalen hur jorden klassas.

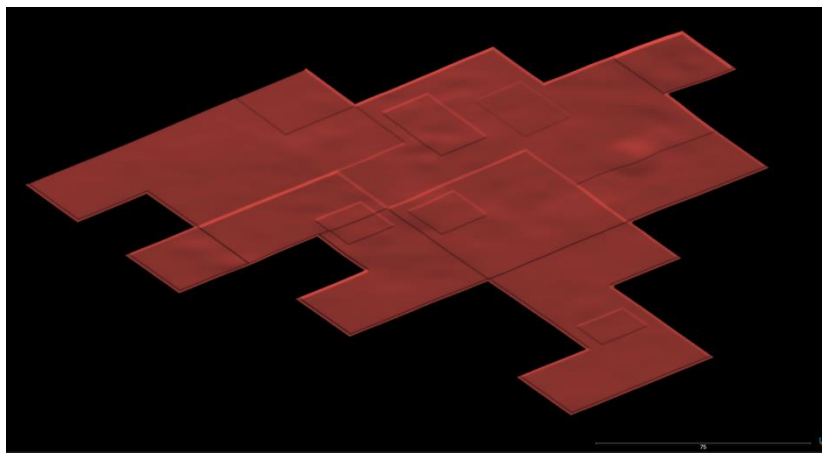
Baserat på den initiala masshanteringsplanen delas jorden in i selektiva schaktvolymmer baserat på jordens svavelinnehåll och fortsatt avsättning inom och utanför entreprenaden. Baserat på geodata från provtagningen tas en schaktmodell fram för kommande schakter utifrån bygghandlingar anpassade för projektet, bland annat översikts- och olika sektionssritningar. Utifrån koordinatsättning av respektive provpunkt samt information om lagerdjup från provtagningen säkerställs att samtliga data finns tillgänglig för fungerande maskinstyrningsfiler till lämpliga resurser som senare kommer nyttjas för schakten. Exempel nedan är ett exempel på sektionssritning från Norrbotniabanan som används vid selektiv schaktning av sulfidjord.

**Figur 9. Ex på sektionsritning vid selektiv schaktning i sulfidjord med uppdelning av 2 typer av klasser (Källa: Trafikverket, Norrbottniabanan).**



Storleken på de selektiva schaktvolymerna (SEV) avgörs från fall till fall och bestäms utifrån svavelhalt och eventuellt avsättningsområden. Vad som styr kontrollen av massorna är förändringar av jordlager alternativt förändringar i jordtyp i sidled. Detta innebär att utformningen av SEV:ar även kan skilja sig där utformning likt sektionsskissen nedan (Figur 10) kan tänkas vara lämpliga utformningar av planerad schaktvolym.

**Figur 10. Illustration från 3D-modell vid schaktstyrning vid åtgärder vid schaktningsförfarande (Källa: Swerock).**



#### 4.4 Fältbaserad XRF-mätning

I det fall det tillkommer områden inom entreprenaden där schakt behöver utföras medan produktionen redan är igång är ett kalibrerat och plats-korrelerat XRF-instrument ett bra verktyg att använda för snabba underlag för beslut under produktion. Med att instrumentet är korrelerat menas att utfall från XRF-instrumentet är överensstämmande med kemiska laboratorieanalyser för motsvarande material som analyseras, se kapitel 2.3 ovan.

För de fall XRF-nyttjas som beslutsunderlag för schakt finns inte samma förutsättningar som för de fall kemiska analyser utgör beslutsunderlaget.

Från provtagningstillfället kommer fältobservationer kunna ge underlag gällande:

- Om det är en Silt/lerjord med potentiellt svavelinnehåll
- Variationer och mäktigheter på eventuella synliga lager
- Indikationer och omfattning av grundvattennivåvariationer, nivå på torrskorpa
- Oxiderade/Anaeroba skikt av sulfat/sulfidjord
- Kvantitativa nivåer av järn och svavel i respektive jordprov

Utifrån det arbete som gjorts i masshanteringsplanen för att hantera olika typer av jordar används data ovan för att snabbt kunna ta beslut om styrning av material. Fördelaktigt är att använda utrustning för koordinatsättning och dokumentering av lagerföljder mm. Handhållen pH-mätare kan även det användas för de fall det är intressant att kontrollera övergångs-och/eller oxiderad zon. Fotografering är ett bra komplement till fältprotokoll och relationshandlingar.

XRF-instrumentet används som beslutsunderlag i samband med schaktningsarbeten för att kontrollera att schaktade jordar klassade efter svavelinnehåll följer schaktplanen. Provtagning för kemisk analys utförs stickvis för att verifiera mätinstrumentets uppmätta halter.

Resultat vid mätning med XRF-instrument mellan olika fabrikat på XRF-instrumenten kan dock variera. Det kan också förekomma skillnader i mätresultat mellan XRF-instrument av samma fabrikat. Därför är det viktigt att man använder samma XRF hela projektet från start till slut. Det är också viktigt att använda samma laboratorium och samma analyspaket eftersom det kan föreligga skillnader i mätresultat mellan laboratorier och analyspaket. Även jordens fuktinnehåll, kornstorlek, mängd organiskt material osv kan påverka resultaten.

## 4.5 Erfarenheter från Norrbotniabanan och Sunderby sjukhus

### **Norrbotniabanan**

Den schaktmodell som upprättades för Norrbotniabanans sträckning Umeå-Dåva under tiden som entreprenaden pågick och baserades på resultat från

fält- och laboratorieanalyser av jordprover där jordlagerföljderna var opåverkade, dvs. innan schaktning skett.

Efter komplettering, med ca 300 analyser med tillhörande bedömning om försurningspotential tog entreprenören fram underlag till maskinstyrd selektiv schaktning. I och med att kompletteringen utfördes av entreprenören ökade också entreprenörens förståelse av klassningen, målsättningen med den selektiva schaktningen och hanteringen av sulfidjord. Detta upplevdes som viktigt av de involverade då samtliga parter anser att kompetensen kring sulfidjord i branschen generellt sett är låg. Förståelsen av arbetet från projektören till maskinoperatören som utförde schaktningen upplevdes också som en viktig faktor för att den selektiva schaktningen fungerade trots svåra markförhållanden. Entreprenören upplevde dock tidspress under entreprenadens tid, då schaktarbetenas framdrift stördes av kompletterande provtagningar och att den konceptuella jordmodellen inte var klar i tid. Beställare och utförare är överens om att för att effektivisera arbetet med selektiv schaktning måste fler analyser utföras i förväg. Med dessa kan schaktmodell tas fram i god tid, vilket underlättar planering av selektiv schaktning och hantering av massorna utifrån försurande egenskaper. Kontrollen kan då fokuseras på att bekräfta schaktmodellen istället för att ta fram underlaget till densamma.

Det som hände vid praktisk tillämpning sedan var att jorden ställvis ”flöt” ut på grund av högt fuktinnehåll vilket försvårade att schakta efter modellen.

Den initiala klassindelningen av de sulfidbärande sedimenten till allt för många typer av jordar var därför inte tekniskt genomförbart.

Utöver den selektiva schakten undersöktes jordproverna för Norrbotniabanan även med XRF-instrument i syfte att korrelera instrumentets uppmätta svavelhalt mot laboratorieanalysens detekterade halter. Tre mätinstrument användes, två av samma märke med samma inställning och en tredje av ett annat fabrikat men med samma filter och inställning. Apparaterna visade olika resultat och behövde korreleras var för sig, det vill säga korreleringen är apparatspecifik. Efter kalibreringen av respektive XRF bestämdes att det fanns två haltnivåer på svavel som med säkerhet kunde hanteras för att skilja lågförsurande och högförsurande sulfidjord. Erfarenheten är att respektive XRF-instrument, även från samma fabrikat, behöver korreleras mot laboratorieanalyser. XRF är bra vid mindre avsteg utanför schaktmodell eller mindre tilläggsarbeten, där snabba svar behövs. Stora avsteg från schaktmodell eller större tilläggsarbeten, leder till fler kontroller, förseningar och fördyringar.

Erfarenheter Norrbotniabanan har även noterat att vissa av analyserna som nämns i kapitel 2 och 3 ovan inte är tillförlitliga vid XRF-analys, däribland kalcium. I stället kommer underlaget som tagits fram inför

masshanteringsplanen, fältobservationer från provtagningstillfällena samt Fe och S analyser utgöra grunden för att kunna fatta beslut om hantering av olika jordtyper. Notera, likt kapitel 4 att erfarenheter av tidigare utförda korrelationer på svavel indikerat att vid låga (<1000 mg S/kg TS) eller höga halter (>10 000 mg S/kg TS) minskar noggrannheten av XRF-analysen.

Målsättningen var att kunna klassa jorden på plats och kunna använda sulfidjordsmassor utan att äventyra miljön genom försurning av ytvatten. Applikationen som sulfidjorden skulle användas i var:

- a. bullervall för sulfidjord med försurningspotential, med 1 m moräntäckning.
- b. tryckbankar för sulfidjord med försumbar till låg försurningspotential med täckning av cirka 0,2 m morän

Masshanteringsplan för Norrbotniabanan togs fram baserat på volymen sulfidjord i de olika klasserna. Volymen sulfidjord med försurande egenskaper bedömdes bli cirka 10 000 m<sup>3</sup>. Den upphandlade entreprenören fick senare uppdraget att ta ytterligare prov i sulfidjordsprofilen och ta fram en schaktmodell för selektiv schaktning. Även dessa prov har undersökts med handhållna XRF-instrument för att korrelera svavelhalten mellan analys och XRF. Totalt har drygt 250 nya prov tagits på sträckan.

Volymen sulfidjord uppskattades baserades på en geoteknisk bedömning som registrerade svart sulfidjord som sulfidjord men som missade registrera grå lera med höga sulfidhalter som potentiellt försurande sulfidjord. Under entreprenaden ökade den totala volymen sulfidjord som hamnade i bullervallen cirka tre gånger jämfört med den först prognosticerade volymen i förfrågningsunderlaget. Generellt bör geoteknisk och miljöteknisk undersökning gå hand i hand för att undvika liknande felbedömningar. Inom sulfidjordsområden bör det beaktas att sulfidjord inte är alltid svart eller svartflammig, utan kan vara grå och se ut som vanlig silt eller lera. Med bättre kompetens vad gäller bedömning av förekomst av sulfidjord hade volymen inte underskattats på samma sätt. Andra bidragande faktorer kan härledas till XRF-instrumentens osäkerhet vad gäller detektering av svavelhalt. För att vara på den säkra sidan klassades en del schaktmassor som försurande, som med ökad säkerhet hade kunnat klassas som icke försurande. Ytterligare bidragande orsak till den större volymen var de dåliga markförhållandena med tunna sulfidjordsskikt (< 0,5 m) och hög vattenkvot som också bidrog till volymökningen. Behovet av kunskapshöjning om sulfidjordar kan konstateras vara stort.



## Sunderby sjukhus, Luleå kommun

Selektiv schaktning som schaktmetod har använts vid ny- och utbyggnad av Sunderby sjukhus, Luleå kommun under 2018. Överskottsmassor i detta fall nyttjades som konstruktionsmaterial vid anläggandet av en parkeringsyta inom sjukhusområdet. Området där parkeringsytan anlades konstruerades dels av vallar av kalkinblanford sulfidjord som användes för att bygga celler. I cellerna placerades därefter obehandlad sulfidjord varfter övertäckning av sulfidjorden skedde med minerogent material (bärlager) för att slutligen påföras asfalbeläggning. Trots en relativt stor schakt på ca 100 000 ton mineraliska finhaltiga massor fungerade den selektiva schakten väl. En framgångsfaktor har varit kontinuerlig avstämning och kvalitetskontroll före och efter schakt dagligen. Färdigblandad sulfidjord och konstruktioner kontrollerades avseende avseende utförande. Resultatet delgavs projektgruppen dagligen via morgonmöten och kommande produktion anpassades löpande dag för dag.

Under tiden för själva uppförandet av parkeringsytan omgärdertogs och behandlades grundvatten i schaktet till projektspecifika pH-halter och halter av suspenderade ämnen.

## 5. Avsättning av schaktad sulfidjord

Resultat nedan baseras på laboratorie- och fältförsök som har utförts i samarbete med DÅVA DAC i Umeå som har tillhandhållit sulfidjorden. Jordmassorna som DÅVA DAC hade tagit emot kom från anläggningen av en järnvägsterminal, vid DÅVAs industriområde.

### 5.1 Metoder att tillgå

De främsta utmaningarna vid avsättning av schaktade sulfidhaltiga jordar är hantering av den försurning som kan uppstå om sulfidmineralen utsätts för syre. Massornas dåliga geotekniska egenskaper - med vattenhalt över materialets flytgräns, låg hållfasthet och sättningsbenägenhet - utgör ytterligare utmaningar. Avsättning av schaktade sulfidhaltiga jordar kan antingen ske utan eller efter behandling. Både försurningsrisken och den låga hållfastheten hos schaktade sulfidjordar måste hanteras om dessa skall kunna avsättas under säkra former och användas i konstruktioner.

De vanligaste strategierna för hantering av icke-behandlad schaktad sulfidjord är att hindra oxidation genom att placera jorden under syrefria förhållanden, eller att behandla lakvattnet innan det når recipienten. Flera alternativ för hantering av sulfidjord, utan föregående behandling, finns och listas nedan.

**Förvaring under grundvattenytan:** Oxidationen hindras genom att placera massorna under vatten, i en miljö som efterliknar den de kommer från. Detta görs exempelvis i speciella vattenmättade deponiceller (t.ex. DÅVA DAC eller Sunderbyns avfallsanläggning (Figur 11) eller utfyllnader i vatten, liksom den som byggdes i Skurholmsfjärden i Luleå (Figur 12).

**Figur 11. Sulfidjordsdeponi vid Sunderbyns avfallsanläggning för deponering av sulfidjord under vatten.**



**Figur 12. Utfyllnad för förvaring av sulfidjord under vatten, i Skurholmsfjärden, Luleå.**



**Förvaring under semi-vattenmättade förhållanden:** Avsättning av icke-behandlad sulfidjord kan ske i utfyllnader som är delvis vattenmättade; exempelvis läggs massorna i en delvis vattenfylld cell. Metoden har använts vid DÅVA DAC (Figur 13) och längs Väg 97 mellan Luleå och Boden. Massorna som finns ovanför grundvattenytan antas förbli nära vattenmättade och därmed inte oxideras. Kapillärkraften och vattenhållningsförmågan gör, tillsammans med täckningen, att massorna förblir fuktiga.

Figur 13. Deponering av sulfidjord i delvis saturerade celler vid Dåva DAC, Umeå. Kalkning av cellens sidor med Mesa.



**Förvaring under dränerande förhållanden:** Massorna placeras i en vall, antingen omslutet av andra massor som en kärna i vallen (t.ex. bullervallen vid Tavelån i Umeå) eller med en täckning, som terrängmodellering som byggdes 2005 i Södra Sunderbyn längs väg 97.

Flera alternativ används för att både motverka försurningen som uppstår när sulfidmineralen oxideras och för att förbättra massornas geotekniska egenskaper. Inom ramen för denna studie har neutralisering av lakvatten genom ökad buffertkapacitet samt tillsats av bindemedel för ökad bärighet, undersökts.

Massornas hållfasthet kan höjas genom inblandning av bindemedel såsom cement, i storleksordningen 5-15 vikt-% (geoteknisk stabilisering). Massornas egenskaper höjs till den nivå som krävs för den tilltänkta applikationen. Cementbaserade bindemedel höjer också pH och en neutralisering av lakvattnet uppnås således samtidigt.

I applikationer där jordens geotekniska egenskaper inte behöver ändras, kan den oxiderade jorden neutraliseras genom buffring av jordmassorna eller av utgående lakvatten (kemisk stabilisering), Figur 14. Olika kalkprodukter tillförs i syfte att höja buffringkapaciteten, höja pH samt fastlägga metalljoner.

**Figur 14. Anläggning för behandling av surt lakvatten genom kalkning av bäckfåran. Bild: Ramboll Sweden AB.**



Flera aktörer tar emot sulfidjordar, exempelvis DÅVA DAC, Ragn-Sells, Envix, Greencare och Skellefteå kommuns avfallsanläggning. Behandling av sulfidjordmassor med buffrande kalkhaltigt material, i syfte att höja pH, klassas som en avfallsbehandling. Efter inblandning av buffrande material fortgår oxidationen medan försurningens effekter mildras och metallutlakningen stoppas. Massorna har fortfarande hög vattenhalt och bärigheten är låg.

Tillsats av buffrande material kan ske på jordmassornas yta där kalken och oxidationsprodukten kan bilda ett skyddande skikt som minskar oxidationsfrontens utveckling, vilket minskar oxidationstakten. I ett forskningsprojekt vid Oulu Universitet i Finland har injicering av en kalklösning i jord genom spricksystemet undersökts (Wu et al 2015),

**Figur 15.**

**Figur 15.** Kalksuspension sprider sig i spricksystemet. Bild: Thomas Andersson, från projektet PRECIKEM.



## 5.2 Stabilisering av jordmassor genom inblandning av buffrande material

Målet med behandlingen är att tillföra tillräckligt pH-höjande/buffrande material, vanligtvis kalkbaserade produkter och avfall, så att försurningen som sulfidoxidationen ger upphov till neutraliseras. När pH hålls kring 7 fastläggs metalljoner, till exempel aluminium, och lakvattenkvaliteten höjs. Även om lakvattnets kvalitet förbättras, hindras inte sulfidoxidationen och lakvattnet som bildas innehåller sulfatjoner som sprids till recipienten. Metoden klassas som avfallsbehandling och den stabiliserade jorden är ett avfall, ur ett juridiskt perspektiv.

Doseringen av tillsatsmedel bestäms utifrån svavelhalten i sulfidjorden. Antagandet görs att allt svavel förekommer som pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) och buffrande material tillsätts för att motverka försurningspotentialen i pyriten.

Neutralisering av en mol pyrit kräver en mol kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Förhållandet mellan svavel och kalciumkarbonat kan uttryckas i mängd kalciumkarbonat som behövs 31 kg/ton sulfidjord som innehåller 10 000

mg/kg TS svavel (=1 % svavel). Mängden kalciumkarbonat som behövs är proportionerlig till halten svavel och doseringen bli tre gånger mer kalciumkarbonat än svavel, med avseende på torrsvikt.

Den teoretiskt beräknade mängden buffrande material behöver dock justeras, dels för att blandningen inte är perfekt, dels för att allt buffrande material inte blir tillgängligt för kemisk reaktion, på grund av att järnhydroxider bildar en beläggning på kalcitmineralen. Enligt Pousette (2007) rekommenderas minst en dubbling av den teoretiska mängden för att ta hänsyn till kalkverkan som går förlorad. För att enklare avgöra hur mycket buffrande material som behöver tillsättas en jord, har de australiensiska och finländska miljömyndigheterna tagit fram doseringstabeller för behandling av jord och jordbruksmark, som utgår från halten svavel i jorden (Queensland Government, 2022) (Miljöministeriet, 2015).

Sättet att tillföra det buffrande materialet kan variera. I MoSS-projektet har blandning med skopa utvärderats. Resultaten visade att två blandningsomgångar var tillräckligt för att uppnå en fördelning av bindemedlet, även om delar med lägre halter förekom. Att uppnå en jämn inblandning är inte lika avgörande vid kemisk stabilisering som vid geoteknisk stabilisering. Porvattnet som rör sig igenom jordmassorna buffras, jämfört med geoteknisk stabilisering där jordmatrisens hållfasthet styrs av den svagaste länken. Vid enbart buffring bedömdes två blandningsomgångar ge tillräcklig effekt.

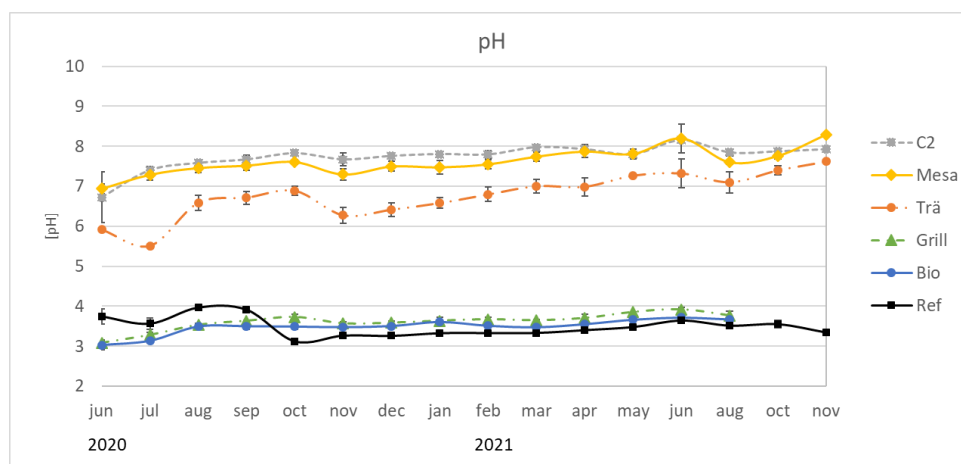
Att tillsätta kalk i lager i stället för att blanda in i jordmassorna, ledde till lägre effektivitet då kontaktytan mellan bindemedlet och porvattnet blev mindre. Stabiliseringseffekten som kan uppnås enligt rekommendationen ovan jämfördes med en behandling med en fjärdedel av denna mängd. Doseringen enligt rekommendationen som användes i försöken visade sig effektivt hindra uppkomst av surt lakvatten och mobilisering av metaller i två år, under laboratorieförhållanden.

I

**Figur 16** redovisas förändringarna i pH som uppnåddes under försöket som genomfördes under MoSS-projektet (se bilaga 3 för närmare information). Tre kalkhaltiga tillsatser undersöktes (trädgårdskalk (Trä), ett finmalt kalkmaterial (C<sub>2</sub>) och Mesa-kalk (Mesa)) och blandades med sulfidjord. Även två biokol undersöktes (ett grövre, grillkolsliknande material (Grill) och ett finare material (Bio)). Kalken som i normala fall används i trädgårds- och

jordbrukssammanhang (Trä), visade sig ha en sämre buffringskapacitet än både C2 och Mesa-kalk, förmodligen på grund av dess grövre kornstorlek. C2 och Mesa visade sig kunna hålla ett pH mellan 7 och 8 under större delen av försöket medan biokolen och den obehandlade jorden hade pH mellan 3 och 4.

**Figur 16. Förändring i pH över tid i de olika behandlingarna. Det är en tydlig skillnad i buffringskapacitet mellan kalk (C2, Mesa, Trä) och kol (Grill, Bio).**



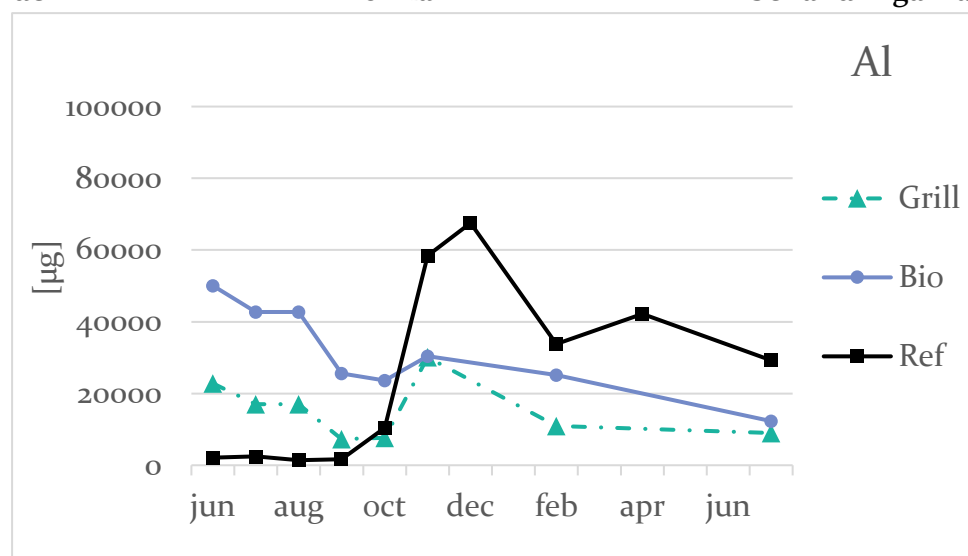
I försöken användes ett finkornigt kalkmaterial som bedöms vara mycket reaktivt och en grövre fraktion av trädgårds/jordbrukskalk. För jord med svavelhalt 1700 mg/kg som behandlades med 10 kg/m<sup>3</sup> (teoretisk mängd 5,7 kg/ton) visade resultaten på en effektiv stabilisering av jorden. Resultat från tester utförda vid Novia, i Oulu, Finland, visade liknande resultat (Stasis Project, 2022). Jordmassor behandlade med 60 kg kalk per procent svavel uppvisade inget tecken på oxidation medan jord stabiliserad med en fjärdedel av mängden blev sur, även med det mest reaktiva kalktillsatsen.

Tillsatsmedlet kommer även att påverka sulfidjordens textur. Utvärderingen av laboratorieförsöken visar att vattentransport och oxidation sker längs sprickorna som finns i jordmassan, medan jordklumpar förblir opåverkade under lång tid. I praktiken blir endast en mindre andel av jordmassan oxiderad från början och oxidationsfronten växer allteftersom. Försöken

utförda med biokol visar att tillsats av biokol förbättrar jordens textur, det vill säga gör den mer porös och genomsläpplig. Biokol används i jordbrukssammanhang för att förbättra täta jordar och öka dess vattenhållningsförmåga samtidigt som jorden blir mer porös. För sulfidjord ledde denna "förbättring" till en jämnare transport av vatten genom jordmassan och en snabbare utlakning av oxidationsprodukten som fanns i jorden vid start. En förbättrad vattentransport genom jorden tillsammans med en begränsad kapacitet i biokolet att fastlägga alla oxidationsprodukter ledde till en hög utlakning redan vid start. Enligt det här försöket ledde inbladning av biokol inte till någon förbättring.

I Figur 17 visas mängden av aluminium som lakades ut vid varje steg av försöket som utfördes, för de olika behandlingarna. Koppar och zink uppvisade samma beteende. I lådorna med kalktillsatser var metallhalterna (aluminium, koppar och zink) generellt under rapporteringsgränsen och dessa redovisas inte i figurerna. Se bilaga 3 för mer detaljer.

**Figur 17. Mängden utlakad aluminium vid varje provtagning över tiden för de olika behandlingarna.**

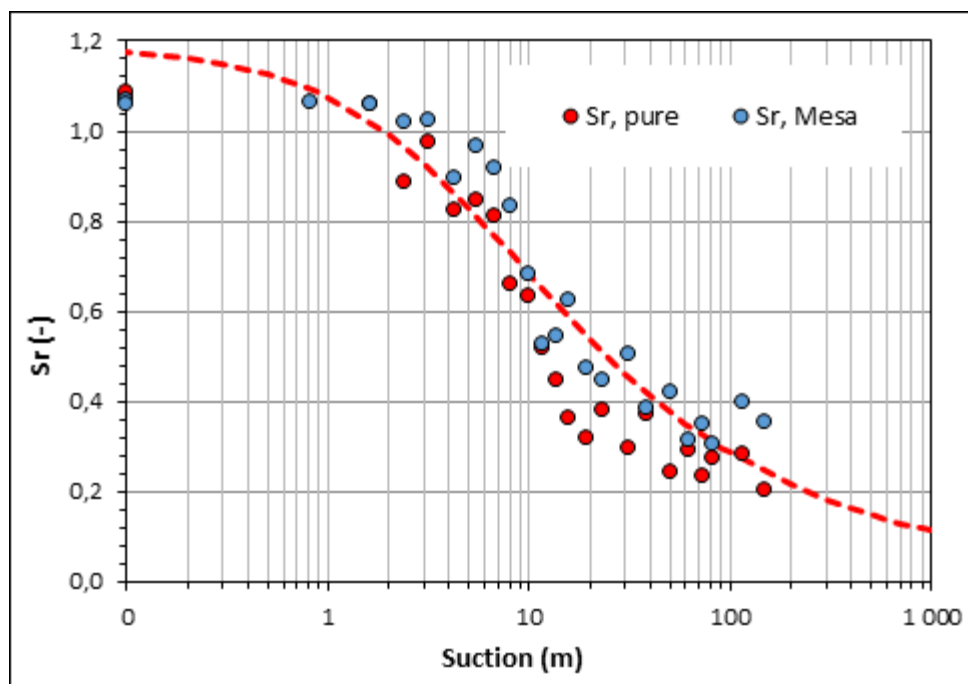


Även tillsats av kalk kommer att förändra sulfidjordens struktur och textur på sikt. En jämförelsestudie av vattenhållningsförmågan i Mesa-stabiliserad jord och obehandlad jord visade att den Mesa-stabiliserade jorden snabbare förlorar sitt vatteninnehåll (



**Figur 18).** Skillnaden mellan den behandlade och obehandlade jorden var dock liten. För den aktuella jorden visade resultaten att vattenmättnadsgraden blir lägre än 85 % när avståndet till grundvattenytan överstiger 3-5 meter, en vattenmättnadsgrad som används som mått på när syrediffusion och sulfidoxidation börjar ske.

**Figur 18.** Vattenmättnadsgrad ( $S_r$ ) som en funktion av avstånd till vattenytan (Suction) i Mesa-behandlad ( $S_r$ , Mesa) och icke-behandlad sulfidjord ( $S_r$ , pure).



Resultaten innebär också att, även om sulfidjord är ett relativt tätt material kommer upplagda jordmassor att dräneras och oxidationen att sätta i gång. Sprickor i jordkroppen kan accelerera processen avsevärt och det är därför viktigt att inte deponera frusen jord som skapar stora hålrum i utfyllnaden och, om möjligt, packa jorden för att minska antalet stora porer.

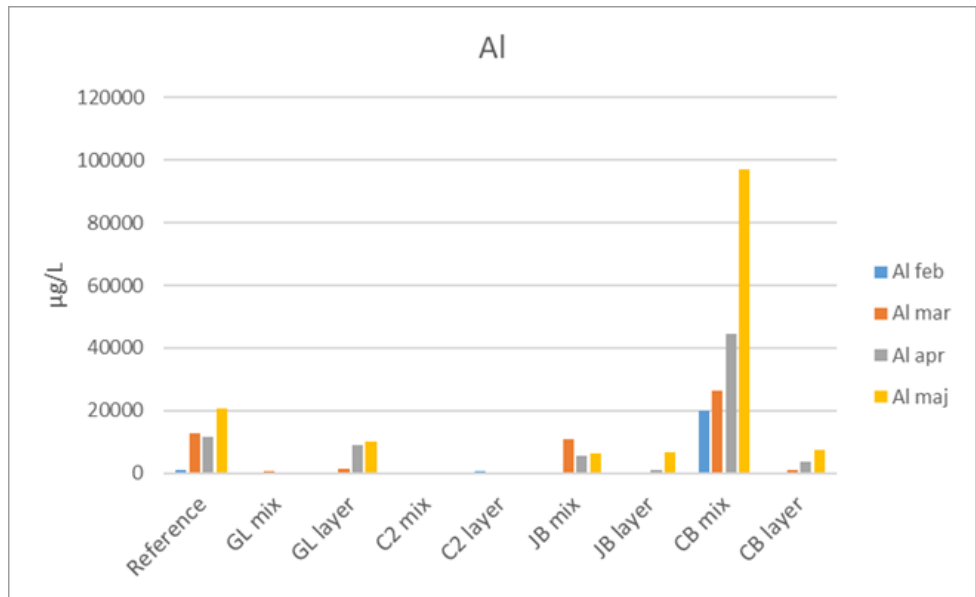
### 5.3 Ytbehandling av jordmassor

Målet med behandlingen är att tillföra tillsatsmedlet på ytan där oxidationen sker eller där porvattnet sipprar ut till grund- eller ytvattnet. Tillsatsmedlet kan tillföras på ytan av en jordhög, där sulfidmineralen kommer i kontakt med luften eller i ett underliggande lager som behandlar det sipprande porvattnet enligt principen för en permeabel reaktiv barriär. Resultat visar att både biokol och kalk kunde fungera i en sådan barriär.

Biokol har fördelen att vara permeabel och finfördela porvattenflödet genom hela materialet. Reningen sker via adsorption på kolpartiklarna. Därför kan ett lager biokol vara effektivt medan blandning av biokol i jordmassan ökar vattentransporten och överbelastar biokolets kapacitet. Kalken reagerar kemiskt med porvattnet och höjer pH. Kalk antas kunna bilda en tätare barriär genom vilken vattentransport sker längs preferentiella kanaler. En konsekvens är att en del av kalken inte kommer till nytta och att ett lager kalk därmed är mindre effektivt än om samma mängd blandas i jordmassan.

Figur 19 sammanställer resultaten från en studie där både kalk och biokol tillförts antingen i lager eller blandats med jorden. Analysen av aluminiumhalter i lakvattnet från de olika testerna (lager och inblandning av tillsatsmedel) visar att biokol var mest effektivt med avseende på immobiliseringen av metalljoner när kolet (JB och CB) applicerades i ett lager under sulfidjorden jämfört med metoden där kolet blandades med jorden. För kalciumkarbonat visade resultaten det motsatta vara sant. Kalciumkarbonaten (GL och C<sub>2</sub>) hade störst effekt på immobiliseringen av metalljoner när den blandades med sulfidjorden, i jämförelse med när det applicerades i ett lager under jorden. Se bilaga 3 för mer information om försöken.

**Figur 19. Mängden utlakad aluminium då tillsatsmedel applicerats i lager (layer) eller blandats (mix) med jorden. Tillsatser: trädgårdskalk (GL), finkornig kalk (C<sub>2</sub>), Aktiverat biokol (JB) och biokol (CB).**



Metoden som utvecklats av Novia om att injektera en kalklösning i jordens spricksystem kan i princip tillämpas på jord upplagt i hög. Kalklösningen kommer att spridas i sprickorna och täta till dessa. Tekniken har dock inte testats inom ramen för projektet.

Behandling av en schaktfront i sulfidjord är möjligt, om behovet föreligger. Utlakning och ursköljning av oxidationsprodukt kan i princip minskas med hjälp av ett buffrande lager.

Tillsättning av kalk i pulver eller lös form på en jordhög bedöms i första hand vara en tillfällig åtgärd för att sänka oxidationstakten. På sikt finns risk att tillsatsmedlet sköljs bort och att nya sprickor utvecklas. En viktig skyddsåtgärd vid upplag av massor är att säkerställa att fina jordpartiklar inte sprids med dagvatten från plasten.

## 5.4 Stabilisering av jordmassor med bindemedel

Målet med behandlingen är att öka sulfidjordens geotekniska egenskaper för att kunna använda dessa som konstruktionsmaterial. Att öka en jords geotekniska egenskaper med tillsats av bindemedel klassas inte som avfallsbehandling.

Sulfidjord har generellt en låg hållfasthet på grund av en hög vattenhalt, ofta över materialets flytgräns vilket innebär att materialet lätt kan omvandlas till en smet. Inblandning av bindemedel syftar till att öka jordens hållfasthet så att den kan användas i olika typer av konstruktioner. Till skillnad från cement/kalkpelare där massorna omvandlas till monolit, är målet att skapa ett friktionsmaterial som beter sig som en jord.

Under projektets gång användes en skopblandare (ALLU) för blandningsförsöken i fullskala (Figur 20). DÅVA DAC använder den här

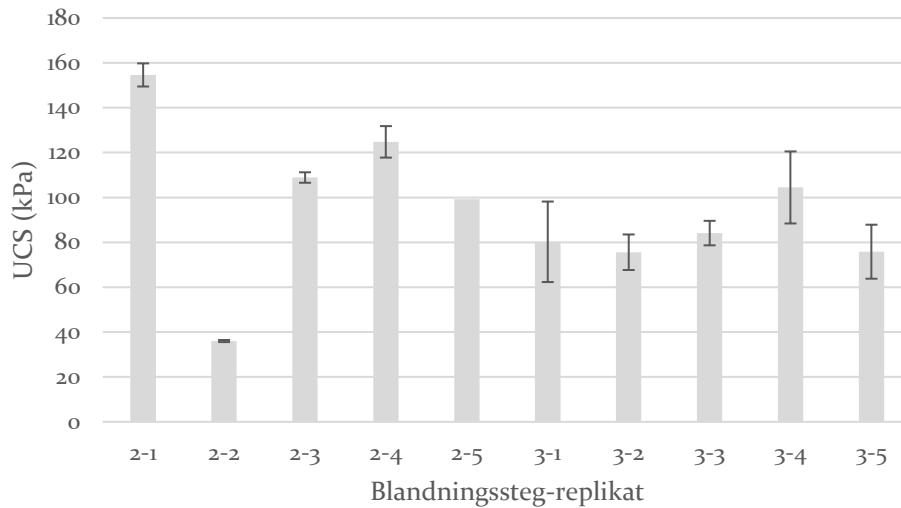
skopan när Mesa-kalk blandas i sulfidjord på deras anläggning. Fördelen med den typen av skopa är att den kan hantera blöta och mjuka material.

**Figur 20. Skopblandare av typ ALLU som användes för blandning av tillsatsmedel. Tillsatsmedlet sprids på jorden innan det blandas med skopan.**

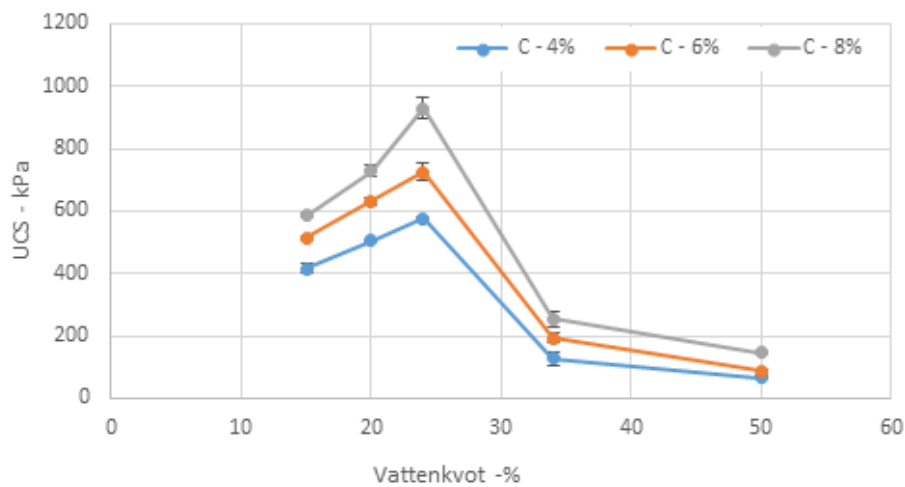


En viktig fråga är hur många blandningssteg som är nödvändiga för att säkerställa att bindemedlen blir tillräckligt bra fördelat i jordmassan och säkerställa att svaga områden inte bildas. Under ett försök undersöktes effekten av flera blandningssteg på blandningens homogenitet och hållfasthet. Resultaten visade att en jämn hållfasthet kunde uppnås efter tre blandningssteg (Figur 21). Vidare blandning ledde till högre homogenitet men hållfastheten blev inte bättre, sannolikt på grund av att jorden började bli mer flytande.

**Figur 21. Enaxliga tryckförsök (UCS) i jord som stabiliserats med cement efter två respektive tre blandningssteg. Vid varje blandningssteg delades jordvolymen i fem delar som provtogs separat. Efter två blandningssteg (medelvärde två replikat,  $n=2$ ) och tre blandningssteg (medelvärde av fem replikat,  $n=5$ ). Standardavvikelser redovisas. Omarbetat från Ziagharib (2023).**



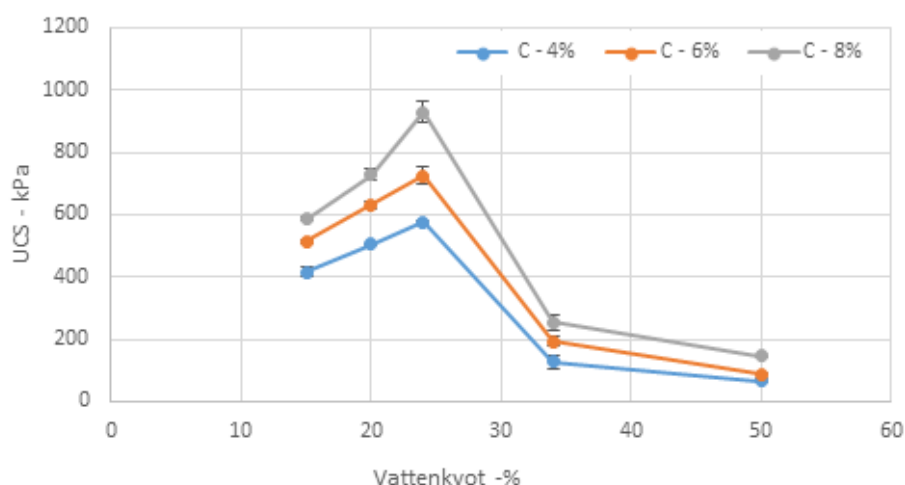
Figur 22. Enaxliga tryckförsök (UCS) i jord som stabiliserats med cement som en funktion av den ursprungliga vattenkvoten i jorden. Jämförelse av dosering med 4, 6 respektive 8 vikt-%. Omarbetat från Ziagharib (2023).



visar hållfastheten i materialprov stabiliserade med 4, 6 respektive 8 % Multicem, vid olika vattenkvot, efter 28 dagns härdning. Jordmaterialet hade en optimal vattenkvot vid vilken hållfastheten var högst. Hållfastheten är proportionerlig till andelen medel som tillsätts (mellan 600 kPa vid 4 % upp till 950 kPa vid 8%). Vattenkvoten hade en större inverkan på den slutliga hållfastheten än cementhalten. Vid en vattenkvot på 50% (jordens naturliga vattenkvot) var UCS < 200 kPa oavsett cementhalt, 3 till 5 gånger lägre än vid den optimala vattenkvoten.

Skillnaden antas bero på att porositeten är lägst vid den optimala vattenkvoten och att cementering av partiklarna blir mer effektivt (avståndet mellan partiklarna är minst och cement kan effektivt fylla porositeten).

**Figur 22. Enaxliga tryckförsök (UCS) i jord som stabiliserats med cement som en funktion av den ursprungliga vattenkvoten i jorden. Jämförelse av dosering med 4, 6 respektive 8 vikt-%. Omarbetat från Ziagharib (2023).**



De geotekniska egenskaperna hos sulfidjord är vanligtvis dåliga på grund av en hög vattenhalt. Hög vattenhalt är även ett problem för schaktad sulfidjord och vid stabilisering av dessa med cementbaserade bindemedel. Resultaten visade att den högsta hållfastheten nås vid en optimum vattenhalt som var långt under jordens naturliga vattenhalt. Att minska vattenhalten hos massorna inför stabilisering är därför fördelaktigt.

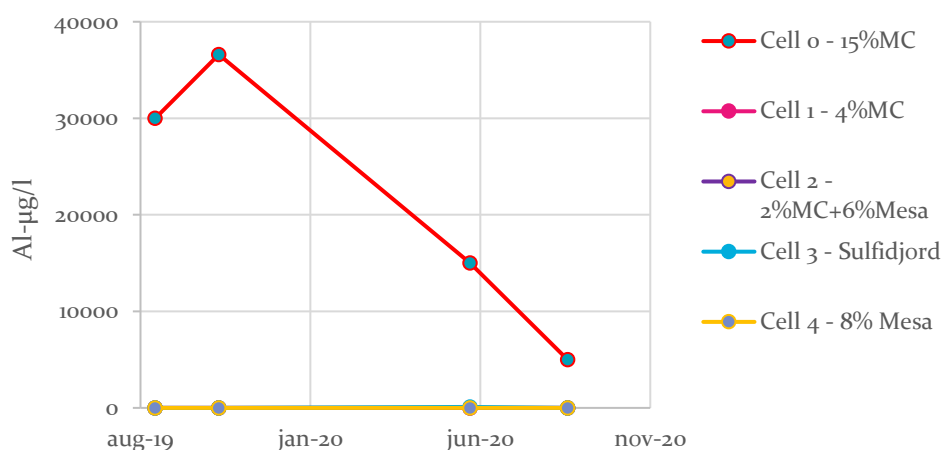
Fördelning av bindemedel i jordvolymen är avgörande för att uppnå en jämn hållfasthet. Resultaten från fältförsöken indikerar att tre blandningar med skopa var nödvändiga för att minska variabiliteten mellan olika delar av jordvolymen.

Sulfidjordar är siltjordar som lätt övergår i flytande form vid omrörning, och vatten kan frigöras. En förlängning av blandningstiden eller antal omgångar ökar därför risken för att blandningen blir alltmer flytande och att den slutliga genomsnittliga hållfastheten minskar, samtidigt som en jämnare kvalitet uppnås.

Genom att öka mängden cementbaserat bindemedel ökar hållfastheten samtidigt som porvattnet neutraliseras varvid metallers mobilitet minskar. Men om andelen bindemedel överstiger 10 % kan pH-värdet i jorden stiga

över 12, vilket medför en ökad mobilitet hos vissa metaller som t.ex. Al, Cu och Ni. Uppföljning av vattenkvaliteten från ett fältförsök där olika blandningar av bindemedel användes visade att utlakning av aluminium var uppemot 35 000 µg/l från cellen som behandlats med 15 % Multicem (Figur 23).

**Figur 23. Aluminiumhalten i lakvatten från respektive cell under första året efter konstruktion. Samtliga resultat förutom Cell 0 - 15 % är nära noll. Halt i µg/l.**



## 6. Slutsatser och rekommendationer

För en miljö- och resurseffektiv hantering av schaktad sulfidjord är det viktigt att redan i ett tidigt planeringsskede identifiera olika typer av sulfidjordar och att planera för hanteringen och avsättningen. Vissa jordar kan då friklassas och skiljas ut på grund eftersom de inte försurar yt- och grundvatten (Tabell 1.). Genom att planera tidigare och hantera sulfidjordar mer selektivt utifrån deras försurningspotential kan transportbehovet reduceras, CO<sub>2</sub>-utsläppen reduceras och kostnader i bygg- och anläggningsprojektet sparas. Inom ramen för MoSS projektet har ett digitalt verktyg utvecklats som förenklar klassificeringen av sulfidjordar. Detta verktyg finns tillgängligt på (<http://68.183.223.77:5000/> på [optimass.se/](http://optimass.se/))

Att hantera frågan tidigt är avgörande för att hinna planera för hantering och avsättning, men även för att i god tid kommunicera med tillsynsmyndigheten om lämpliga konstruktioner och avsättningsområden. Det är därför viktigt att planeringen för möjliga avsättningsområden och konstruktioner (t.ex.

bullervallar) för jordarna ingår som senast i projekteringsstadiet. Sulfidjordar går att klassificera tidigt under planläggningen genom ett framtaget digitalt klassificeringsverktyg som kan bedöma sulfidjordens försurningspotential (se bilaga 1). Klassningen av sulfidjord utgår ifrån jordens innehåll av:

- svavel
- kalcium (kalcit)
- järn, samt
- jordens pH

Utifrån den tidiga klassificeringen av jorden kan sulfidjordshanteringen inkluderas i masshanteringsanalyser såväl som masshanteringsplaner. Masshanteringsplanen bör hur selektiv schaktning kan utföras av jorden och därmed separera problemjordar från de som inte är problematiska från ett försurningsperspektiv. I masshanteringsplanen beskriv även eventuellt behov av tillfälliga och eller bestående skyddsåtgärder. Bestående skyddsåtgärder bör i så lång utsträckning som möjligt undvikas då det kan leda till/ofta leder till efterföljande kontroller efter avslutad entreprenad.

Bygg- och anläggningsprojekt bör alltså kunna beskriva vilka jordar som kan användas var och peka ut särskilda områden inom entreprenaden där användning ska undvikas, t.ex. närhet till ytvatten såsom vattendrag eller sjöar och områden.

### **Lärdomar från Norrbotniabanan**

Metodiken för klassificering, fältkontroll med XRF och selektiv schaktning har testats i Norrbotniabanan, sträckan Umeå-Dåva. En viktig lärdom därifrån är att metodiken behöver alltid behöver anpassas specifikt till den lokala platsen. Till exempel så bedömdes det inte vara motiverat att använda fler än 2–3 klasser av sulfidjordar för det aktuella projektet. Klassindelningen bör ses som projektspecifik, och antalet kan variera mellan två och sju klasser.

Arbetet med selektiv schaktning med två till tre typjordar gick bra, trots riktigt dåliga markförhållanden i och med hög vattenkvot och flytbenägen siltig/lerig konsistens. Grävmaskinförarna blev informerade om vikten att kunna selektivt schakta och hantera olika sulfidjordar. Kunskapshöjningen och kommunikationen vad som skulle göras och varför bidrog till att arbetet fungerade väl trots svåra förhållanden.

En annan viktig lärdom var att XRF-instrument måste användas i hela projektet för att korrelerationen mellan analys och XRF ska vara relevant. XRF-apparatens nedre gräns för säker bedömning av svavelhalt ligger runt 1000 mg/kg. Svårigheten att mäta svavelhalt med XRF-instrument är en



begränsning idag och utveckling behövs. För att få bättre schaktmodell krävs det bättre underlag, dvs fler punkter och nivåer som analyseras i laboratorium i förväg. Samlingsprov från schaktprovtagning behöver utföras några dagar i förväg, speciellt för stora projekt där schaktningstakten är uppåt hundratals m<sup>3</sup>/h. Ett stopp påverkar produktionen och leder till att produktionskalkylen inte håller.

Viktigt att geoteknisk rutinundersökning och sulfidjordskontroll (analys av S, Fe, Ca och pH) görs inom sulfidjordsområden, oberoende lerans färg. En gråfärgad sulfidjord kan vara minst lika försurande som en svartfärgad. Behovet av kunskapshöjning om sulfidjord är stort hos hela aktörskedjan.

Dåva-sträckan var intill en av de få existerande deponier som kan ta emot och hantera sulfidjord. Kommande sträckor ligger allt längre från lämplig deponi, vilket leder till ökade transport- och klimatkostnader om sulfidjorden inte kan hanteras lokalt. För lokal hantering krävs bra planering, underlag som möjliggör kalkyl av volym sulfidjord som ska hanteras och metoder som kan neutralisera effekterna av försurningen samt förbättra massornas byggegenskaper. Summerat möjliggörs då olika typer av avsättningar. En trefald ökad volym kommer att bli svår att hantera, speciellt om det är specifika bullervallskonstruktioner som är avsättningen, där behovet är fast. Dåva sträckan kunde misslyckas utan stora ekonomiska konsekvenser. Kommande sträckor har möjlighet med lärdom från det utförda demonstrationsprojektet kunna hantera sulfidjordar på ett effektivt kostnads- och resurseffektivt sätt.

### **Metoder för avsättning av schaktade sulfidjordsmassor**

Stabilisering av sulfidhaltiga schaktmassor kan utföras i syfte att hindra att surt lakvatten bildas vid oxidation och/eller för att öka massornas hållfasthet inför användning i någon typ av konstruktion. Olika typer av material med buffrande och cementserande egenskaper finns att tillgå.

Behandling med biokol och kalk har utvärderats, och den generella slutsatsen är att kalk fungerar bättre än biokol för att uppnå önskad effekt. Gällande inblandning av bindemedel, tillsats av 4-6 % cementbaserat bindemedel ökade jordens hållfasthet samtidigt som en buffringseffekt uppstod. Samtidigt hade vattenhalten i jorden en tydlig påverkan på hållfastheten som kunde uppnås.

Genom inblandning av kalkhaltigt material minimeras de negativa effekterna som sulfidoxidation har på vattenkvalitén. Materialen som testades inom ramen för denna studie, dvs. trädgårdskalk med partikelstorlek <1,5 mm resp. <3,15 mm, Nordkalks finkorniga C2 med partikelstorlek 2,5 µm samt Mesa-kalk från pappersmassa-industrin, visade alla tre på effektiv behandling av de oxiderande massorna. Mängden kalksten som behövs för att behandla massorna är inte bara en funktion av jordens sulfidhalt, utan beror även på

tillsatsmedlets kornstorlek. Finkorniga material har större specifik yta och blir därmed mer effektiva. Därför behövs en överdosering i förhållanden till svavelhalten för att säkerställa behandlingen. Inblandning av de kalkbaserade tillsatsmedlen är mer effektivt jämfört med tillsats av samma mängd i skikt. När materialet tillsätts i lager ökar risken att källmaterialet blir tätare med tiden och att porvattnet därmed transporteras längs kanaler. Sammantaget förbrukas bara en bråkdel av buffringskapacitet till behandlingen och blandningen underlättar kontakt mellan porvattnet och kalkpartiklarna.

Spridning av finkornig kalk på ytan av en jordhög är möjligt för att begränsa bildning av surt lakvatten. I laboratorieförsök har behandlingen visat sig effektiv för rening av dräneringsvattnet. Då en viss ytavrinning och -erosion av partiklar uppstår är det svårt att extrapolera dessa resultat till fältskola.

Biokolen, trots hög adsorptionsförmåga, visade sig ha en negativ inverkan på utlakning av metaller när det blandats i jordmassorna, vilket antas bero på att biokol ökar porositeten och vattentransport i jorden. Vid tillsats i lager hade biokol däremot en positiv effekt på porvattnets kvalitet utan att jordegenskaperna förändrades.

De geotekniska egenskaperna hos sulfidjord är vanligtvis dåliga på grund av en hög vattenhalt vilket också är en begränsande faktor vid stabilisering av dessa med cementbaserade bindemedel. Resultaten visade att den högsta hållfastheten nås vid en optimal vattenhalt som var långt under jordens naturliga vattenhalt. Även fördelning av bindemedel i jordvolymen är avgörande för att uppnå en jämn hållfasthet. Resultaten från fältförsöken indikerar att tre blandningar med skopa var nödvändiga för att minska variabiliteten mellan olika delar av jordvolymen. För intensiv blandning leder till att sulfidjordar lätt övergår till flytande form vid omrörning vilket minskar den slutliga genomsnittliga hållfastheten. Genom att öka mängden cementbaserat bindemedel ökar hållfastheten samtidigt som porvattnet neutraliseras varvid metallers mobilitet minskar. Men om andelen bindemedel överstiger 10 % kan pH värdet i jorden stiga över 12 vilket medför en ökad mobilitet hos vissa metaller som till exempel aluminium och koppar.

## 7. Referenser

Al-Jabban, W. (2019). Soil modification by adding small amounts of binders: A laboratory study. Doctoral thesis. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.

Stasis Project. (2022). En hållbar behandling av kustnära deponerad sulfidjord.

Sohlenius, G. Aroka, N. Wåhlén, H. Uhlbäck, J. och Persson, L. (2015) Sulfidjordar och sura sulfatjordar i Västerbotten och Norrbotten, SGU-rapport 2015:26.

Ziagharib, A. (2023). Mechanical properties of excavated sulfur rich soil stabilized with cement - A laboratory and field experiment. Licentiate thesis. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.

Xiaofen Wu, Pekka Sten, Sten Engblom, Pawel Nowak, Peter Österholm, Mark Dopson (2015). Impact of mitigation strategies on acid sulfate soil chemistry and microbial community. *Science of the Total Environment* 526 (2015) 215–221.

<https://precikem.eu/foersoek-med-ostoerda-jordprov-2011-2014/>

Queensland Government. (2022, 12 22). *Acid sulfate soils explained*. Retrieved from <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/acid-sulfate/explained>

Miljöministeriet (2015). Anvisning om muddring och deponering av muddermassor

# Bilaga 1 - Bedömning av sulfidjord, försurningspotential

Författare: Josef Mácsik, Ecoloop

## Inledning

Verktyget, (<http://68.183.223.77:5000/> på [optimass.se/](http://optimass.se/)) utför bedömning av sulfidjordens försurningspotential och ger förslag på indelning som följer Trafikverket vägledningsdokument (remiss). I Trafikverkets vägledning ges också förslag på hur jorden kan hanteras beroende på klassning. Nedan ges kort introduktion till verktyget och de analyser som behövs.

## Provtagning och analys

### Inledande provtagning och analys

Provtagning av jord och analys av jordar görs för att kunna klassa jorden med avseende på potentiell försurningsrisk. Det ger ett underlag för att avgöra bästa sätt att omhänderta jord som ska skiftas ut eller schaktas bort.

Prover kan tas med kolvprovtagning eller skruvprovtagare och läggs i diffusionstät påse/behållare (hanteras som miljöprover). Proverna skickas till ackrediterat laboratorium för att bestämma innehåll av Fe, S, pH, Ca. Jordanalysen utförs enligt SS-ISO 11464, uppslutning exempelvis med HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Jordens pH mäts direkt innan provet påverkas av luft, pH(opåverkad), och sedan efter att provet fått torka, pH(oxiderad). Proverna skall även analyseras med avseende på jordart.

### Utökad analys - laktest

Prover bör även tas för kompletterande lakteter vid tveksamma fall och för att kunna bedöma försurningspotentialen på lång respektive kort sikt.

Provmängd på ca 25 g räcker för att komplettera med försurningstest med MRM-metoden, se bilaga 2. Med MRM-metoden bestäms jordens försurningspotential baserat på pH-mätning av jorden efter laktest. Lakningen utförs i tio aeroba steg. Om jordens pH under lakstegen sjunker under 4,3 anses jorden ha kvarvarande försurningspotential. Hur snabbt pH sjunker och till vilken nivå ger indikation på försurningshastighet och försurningsnivå.

## Bedömning och klassning

### Faktorer som påverkar jordens försurningspotential

- Innehåll av S och Fe
  - Sulfidjord - i anaeroba (syrefria) miljöer förekommer svavel som sulfid ( $S^{2-}$ ) och järn som  $Fe^{2+}$ . Dessa bildar järnsulfider, såsom  $FeS$ ,  $FeS_2$ . Järnsulfider är svårlösliga och är stabila i anaeroba förhållanden.
  - Sulfatjord - i aeroba (syrerika) miljöer förekommer svavel som sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) och järn som  $Fe^{3+}$ . Sulfat är lösligt medan  $Fe^{3+}$  bildar oxider och hydroxider som är svårlösliga.
- Innehåll av Ca (kalcit,  $CaCO_3$ ) i form av skalrester, kalkhaltigt material mm.
- Innehåll av organiskt material
- Vattenmättnadsgrad
- Jordmaterialets pH och redoxmiljö. Oxiderad jord s.k. torrskorpa utgörs ofta av sur sulfatjord med låga pH, ( $pH < 4,3$ ). En anaerob sulfidjord under grundvattenytan har normalt ett högre pH än 6,3.

### Karakterisering

För bedömning/karakterisering av sulfid- och sulfatjordars försurande egenskaper utförs följande moment (steg 1 till 4).

1. **Jordens oxidationsnivå.** Är jordprovet påverkat av syre, dvs är jorden aerobt påverkad (oxiderad) eller kommer provet från den vattenmättade zonen?
2. **Okulärbedömning** (ska anges i fältprotokoll alternativt labprotokoll)
  - a. oxiderad (torrskorpa), rostfärgat, grå till gråbrun i färgen och förhållandevis torr.
  - b. anaerob (under grundvattenytan), grå-/svartfärgad, flammigt.
3. **Innehåll av svavel.** Uppdelningen görs i tre intervall av svavelhalter.
  - a. Halt  $< 1\ 000$  mg/kg TS
  - b. Halt  $1\ 000 - 4\ 000$  mg/kg TS
  - c. Halt  $> 4\ 000$  mg/kg TS

4. **Jordens initiala pH** direkt vid provtagning (pH opåverkad) vid minimal påverkan av syre (kan utföras på laboratorium alternativt i fält).
- $\text{pH} < 4,3$
  - $4,3 < \text{pH} < 6,3$
  - $6,3 < \text{pH} < 9$
5. **Jordens oxiderade pH** efter förvaring av provet (pH oxiderat) efter påverkan av syre (utförs på laboratorium efter förvaring).
- $\text{pH} < 4,3$
  - $4,3 < \text{pH} < 6,3$
  - $6,3 < \text{pH} < 9$

**Bedömning med verktyget:**

Notera att verktyget använder något modifierade värden vid bedömningen jämfört med den manuella bedömningen. Skillnaden beror på att verktyget har klassat över trehundra sulfidjordsprover medan det manuella bedömningsverktyget, Trafikverkets vägledning (remiss), baseras på mindre än hundra sulfidjordsprover. Värdena inom parentes är de värden som återges i Trafikverkets kommande vägledning.

**Ej sulfidjord, Ao - Aerozt påverkad jord (oxiderad), med svavelhalt under 1000 mg/kg TS, kriterier för Ao:**

Svavelhalt	< 1000 mg/kg TS
pH(init)	> 4,3
pH(ox)	> 4,3
Fe/S	> 9 (> 60)
Ca/S	> 2,1 (>10)

**Sulfidjord med försumbar försurningsrisk, A<sub>1</sub> - Anaeroba jordar, med svavelhalt > 1500 mg/kg, kriterier för A<sub>1</sub>:**

<b>Svavelhalt</b>	<b>100 &lt; x &lt; 1500 mg/kg TS</b>
pH(init)	> 4,9 (> 6,3)
pH(ox)	> 4,3
Fe/S	> 15 (< 10)
Ca/S	> 1 (5 < x < 10)

*Kommentar A<sub>0</sub>- och A<sub>1</sub>-jordar:*

Jordar som inte bedöms kunna orsaka försurning har generellt ett högt initialt pH oberoende av oxidationsnivå eller halt av svavel. Det typiska för dessa jordar är att pH är över 4,3 även efter aerob lakning. Sulfidjord med högt innehåll av skalrester (CaCO<sub>3</sub>) kan effektivt neutralisera även vid förhållandevis hög svavelhalt i jorden.

**Sulfidjord med låg försurningsrisk, B - Anaeroba jordar, med svavelhalt > 1000 mg/kg, Kriterier för B:**

<b>Svavelhalt</b>	<b>900 &lt; x &lt; 3000 mg/kg TS</b>
pH(init)	> 5,6 (> 4,3)
pH(ox)	> 4,3
Fe/S	3 < x < 25 (ca 10)
Ca/S	1,89 < x < 4 (2 < x < 4)

*Kommentar B-jordar:*

Jorden har låg buffringskapacitet och bedöms vara sulfidjord med låg försurningsrisk.

**Sur sulfatjord C<sub>1</sub> - Aerobt påverkad jord, med svavelhalt < 1000 mg/kg TS, och pH < 4,3. Kriterier för C<sub>1</sub>:**

<b>Svavelhalt</b>	<b>200 &lt; x &lt; 1100 mg/kg TS (&lt; 1000 mg/kg TS)</b>
pH(init)	< 5,5 (< 4,3)
pH(ox)	< 5 (< 4,3)
Fe/S	> 10
Ca/S	> 2 (2 < x < 4)

**Sur sulfatjord C<sub>2</sub> - Aerobt påverkad jord, med svavelhalt > 1000 mg/kg TS, pH < 4,3. Kriterier för C<sub>2</sub>:**

<b>Svavelhalt</b>	<b>&gt; 1000 mg/kg TS</b>
pH(init)	< 5,9 (< 4,3)
pH(ox)	> 2 (< 4,3)
Fe/S	0,1 < x < 21 (< 10)
Ca/S	< 3,4 (< 2)

*Kommentar C<sub>1</sub>- och C<sub>2</sub>-jordar:*

Oxiderad aerob torrskorpa skapas genom dränerande förhållanden.

Torrskorpa som har S-halter över 1000 mg/kg TS anses vara sulfatjord, d v s aerobt påverkade sulfidjordar. Torrskorpans pH beror på jordens svavelhalt, oxidationsnivå och syraneutraliserande kapacitet. Om jorden uppvisar pH < 4,3 vid provtagningstillfället bedöms jorden vara sur sulfatjord.



**Sulfidjord med hög försurningsrisk, D1 - Anaeroba jordar, med svavelhalt 1000 – 4000 mg/kg, Kriterier för D1:**

<b>Svavelhalt</b>	<b>1500 &lt; x &lt; 4000 mg/kg TS</b>
pH(init)	> 5,8 (> 6,3)
pH(ox)	> 2 (< 4,3)
Fe/S	3,9 < x < 15 (3,9 < x < 10)
Ca/S	0,6 < x < 4,1 (0,6 < x < 2)

**Sulfidjord med mycket hög försurningsrisk, D2 - Anaeroba jordar, med svavelhalt > 4000 mg/kg. Kriterier för D2:**

<b>Svavelhalt</b>	<b>&gt; 4000 mg/kg TS</b>
pH(init)	> 5,8 (> 6,3)
pH(ox)	> 2 (< 4,3)
Fe/S	0,1 < x < 10 (< 3)
Ca/S	< 4 (< 0,6)

*Kommentar D1- och D2-jordar:*

Anaerob sulfidjord, med halter över 1000 mg/kg TS utgör en risk för försurning. Denna risk ökar med ökande svavelhalt. Jorden bedöms som ostörd sulfidjord om dess initiala pH är >6,3. Påverkan av syre leder till att den anaeroba jordens pH sjunker till mellan 4,3 och 6,3. Om pH stannar kvar vid pH >4,3 efter avslutade aeroba lakningscykler, anses jorden vara sulfidjord utan försurningspotential. Om jordens pH under lakstegen sjunker under pH 4,3 anses jorden ha försurningspotential.

## Verktyget

Notera att verktygets utseende kommer att ändras vid kommande uppdateringar. Verktyget utför bedömningen baserat på analys svar på svavel-, kalcium och järnhalter. pH mäts vid två tillfällen, 1) direkt i samband med provtagningen utan luftning av provet och 2) pH mätning efter att provet har torkat. Ange även plats, djup och jordartsbeskrivning.

Verktyget ger generellt entydigt svar om klassning av försurningspotential, A<sub>0</sub> – D<sub>2</sub>, se figur 1a. Om svaret visar att det är gränsszon, är jorden svårbedömd, dvs. hamnar mellan två klasser, som exempelvis mellan A<sub>0</sub> och A<sub>1</sub>. Om gränssonen är mellan exempelvis B och D<sub>1</sub> kan det vara av intresse att laka enligt MRM-metoden för att säkerställa jordens klassning. På motsvarande sätt kan det vara värt om gränssonen är mellan A<sub>1</sub> och B, se Figur 1b, eftersom hanteringen skiljer mellan dessa jordar vilket är kostnadsdrivande.

### Exempel på inmatning och bedömning av sulfidjord.

<b>Prov 2</b>	
Plats (Kommun)	Djup
Umeå - Dåva	0 - 1 m
Jord Typ	S (mg/kg TS)
Torrskorpa/leSi	2940
Ca (mg/kg TS)	Fe (mg/kg TS)
2780	9060
pH(init)	pH(ox)
4,6	4,2

Test Typ	Resultat
Klassificering	C2) Sur sulfatjord med försurningsrisk

Figur 1b. Exempel på inmatning och bedömning av sulfidjord.

**Prov 1**

Plats (Kommun)

Umeå - Däva

Djup

0,9 - 1 m

Jord Typ

Lerig silt

S (mg/kg T S)

1240

Ca (mg/kg TS)

4070

Fe (mg/kg T s)

21500

pH(init)

6,5

pH(ox)

5,4

Test Typ	Resultat
Klassificering	Kontrollera (gränzon)
Gräns Zon A	A1) Sulfidjord med försumbar försurningsrisk
Gräns Zon B	B) Sulfidjord låg försurningsrisk

I vissa fall kommer verktyget inte att kunna ge svar på sulfidjordens försurningspotential. Detta har varit fallet exempelvis för ett antal jordar som har låga svavelhalter men också låg halt av järn. Eftersom Fe/S kvoten är en viktig del i bedömningen kan låga järnhalter ge hög Fe/S-kvot som inte är typiskt för vare sig sulfid- eller sulfatjordar. Om jorden är torrskorpa och eller pH är högre än ca 5 bedöms jorden som Ao (ej sulfidjord). I annat fall kan lakning enligt MRM-metoden ger en klarare bild av om jorden är försurande eller inte.

Ett annat typfall där bedömningsverktyget inte fungerar är för sulfidjordar som kan karakteriseras som D<sub>1</sub> eller D<sub>2</sub>, dvs Fe/S-kvot lägre än 10, men innehåller höga halter av Ca (kalcit) och har Ca/S-kvot över 4. Dessa jordar bedöms ha tillräckligt med buffringskapacitet för att motverka försurning. Lakning enligt MRM-metoden kan användas för att verifiera jordens avsaknad av försurande kapacitet.

## Bilaga 2 - Provtagningsplan, förslag på innehåll

Författare: Marie Eldståhl och Johannes Pettersson, Swerock

1. Desktoputredning för att ta reda på områdets förutsättningar såsom geologi, närhet till skyddsvärda områden såsom hydrogeologi, ytvatten och brunnar (enskilda vattentäkter samt brunnar för energiuttag) samt natur- och kulturmiljö (skyddsvärda biotoper, fornlämningar, riksintressen, Natura2000 etc.) Denna information kan man bland annat finna på Sveriges Geologiska Undersöknings (SGU) webbaserade karttjänst, VattenInformationsSystem Sveriges (VISS) webbaserade karttjänst, Skogsstyrelsens webbaserade karttjänst "Skogens pärlor" Länsstyrelsernas webbaserade karttjänst "Skyddad natur".
2. En beskrivning vad provtagning ska syfta till.
3. Information om det finns risk för sulfidjord, potentiellt förorenat område där provtagning/schakt ska ske. Informationen om den senare finns på Länsstyrelsernas webbaserade karttjänst för MIFO-inventerade områden, den kommunala miljöförvaltningen och/eller Räddningstjänsten.
4. Placering av provtagningspunkter på en karta. Antalet provpunkter varierar från fall till fall. Enligt Naturvårdsverket rekommendation ska minst 5 provpunkter per hektar uttas när man inventerar ett förorenat område. Utifrån vad som kännetecknas av sulfidbärande sediment kan SGUs kartmaterial nyttjas, där låglänta områden med lera silt är möjliga. Försurat ytvatten kan tyda på att sur sulfatjord bildats. Eftersom mätning ska ske med XRF-instrument i fält kan förtätning av provpunkter ske i områden där jordlagerföljder förändras och glesas ut i områden där jordtyper är mer homogena.
5. En beskrivning av provtagningsmetodiken och ange om prover ska uttas med hjälp av kolv- eller skruvprovtagning (borrbandvagn) eller i provgrop (grävmaskin) (banddriven är att föredra då jordarna ofta kan vara lösa) och där omfattningen av provtagningen, t.ex. vad som ska provtas, hur stor mängd provmaterial, vilken ty av provkärl (av laboratoriet anvisat) beskrivs. Beskriv om prover ska tas ut som samlingsprover samt antal per volymenhet eller om enskilda prover ska tas ut. Beskriv hur proverna ska förvaras och hur provtagningsutrustningen ska rengöras. Om fältmätningar ska göras med XRF ska antal mätningar per prov samt provtagningstid anges samt beskrivning av hur mätning av pH ska utföras.
6. Ett avsnitt om arbetsmiljö/säkerhet i fält ska ingå i provtagningsplanen.
7. Till provtagningsplanen bifogas fältprotokoll som fältingenjören fyller i samband med fältundersökningen. I protokollet ska datum och namn på provtagare anges samt även provnamn, provtagningsdjup, jordart, oxidationsskikt, om prover är torra eller fuktiga samt andra iakttagelser

noteras. Om fältmätningar ska utföras med avseende på pH, svavel- och järninnehåll noteras även medelvärdet av dessa för respektive prov. Därtill ska fältinstrumentens fabrikat anges.

### **Genomförande av provtagning**

1. Upprätta en arbetsmiljöplan och identifiera risker kopplade till provtagningen. Potentiella risker kan t.ex. vara pååkning av tunga arbetsfordon, fall från hög höjd (vid provgrovsgrävning). Beskriv risker med att jobba i områden där det ställvis kan vara plastiska och även flytbenägna jordar (t.ex. en siltjord som utsätts för rörelser och vibrationer).
2. Okulär kontroll av jordlagerföljd, förekomst och djup av torrskorpa, mäktighet och jordart, färgskiftningar, andra iakttagelser (t.ex. fuktighet, djup till grundvatten om det är möjligt osv), avvikande lukter utan att lukta i proverna. Anteckna iakttagelserna i fältprotokoll.
3. Provuttag, använd av laboratoriet anvisat provkärl (diffusionstät påse alternativt burk med skruvlock med teflon). För de fall XRF-instrument, eller pH-mätning avses användas i fält ska prov tas i duplikat. Ett av proven undersöks med fältinstrument på plats och det andra provet uttas till anvisat provkärl för vidare analys på laboratorie. Var noggrann med att prov som tas i duplikat uttas på samma ställe så att provet som mäts i fält representerar det prov som skickas för kemisk analys. Förslut och förvara mörkt och svalt i kylväska. Se till att provet är utan luftbubblor, dvs se till att excess luft pressas ut från provtagningspåsen.  
  
Tänk på att försöka få en spridning av mätvärden med XRF för de prover som skickas för kemisk analys. Detta är en förutsättning för att få en god korrelation.  
  
Mätning genom provpåse skall undvikas då just svavelanalysen störs ut av plasten. Mät gärna med tunnare skyddspapper mellan mätögat och jorden alternativt direkt mot jorden om inget skyddspapper finns tillgängligt. Vid direktmätning mot jord bör det säkerställas att mätögat inte skadas samt att rengöring av skyddshöljet utförs mellan mätningar.
4. Minsta antal parametrar för en kvantitativ selektiv schaktning är Fe, S, Ca, TS, och pH vid två tillfällen, direkt när provet ankommer till laboratoriet och minst ett dygn senare. Okulär bedömning på plats omfattar utseende på provet, om provet kommer från över eller under grundvattennivån, är från torrskorpan. Utför gärna pH-initial på plats.
5. Skicka proverna skyndsamt till laboratoriet för kemisk analys.
6. Upprätta en korrelering mot fältanalyser kopplat till laboratorieanalyserna, se även avsnitt 4.1. Ju mer fält- och laboratorieanalyser samt spridning i halter desto säkrare blir korreleringen. På detta sätt erhålles värden som sedan används som beslutsunderlag i fält vid bedömning av svavelhalten i jorden.

7. Vid eventuellt tillkommande provtagning, exempelvis för att avgränsa tidigare påvisad sulfidförekomst, tänk på att använda samma fältinstrument, samma laboratorium och samma analysmetod. Detta då instrument, laboratorium och analysmetoder kan skilja sig åt.

## Bilaga 3 – Stabilisering av sulfidjord

Författare: Emma Flodin, Qi Jia, Ida Kronsell, Christian Maurice, Johanna Paulsson, Siri Ranung Alaleh Ziagharib. Luleå tekniska universitet

### Innehåll

- 1 Bakgrund och syfte
- 2 Kemisk stabilisering av schaktad sulfidjord
  - 2.1 Bakgrund
  - 2.2 Syfte
  - 2.3 Behandling av lakvatten
    - 2.3.1 Metod
    - 2.3.2 Resultat
  - 2.4 Behandling av porvatten – inblandning av tillsatsmedel i jord
    - 2.4.1 Metod
    - 2.4.2 Resultat
  - 2.5 Behandling av porvatten – jämförelse av lager och inblandning av tillsatsmedel i jord
    - 2.5.1 Metod
    - 2.5.2 Resultat
  - 2.6 Direkta effekter av lagrade överskottsmassor
    - 2.6.1 Metod
    - 2.6.2 Resultat
- 3 Geoteknisk stabilisering av schaktad sulfidjord
  - 3.1 Syfte
  - 3.2 Material och metod
  - 3.3 Resultat
- 4 Slutsatser
- 5 Referenser

# 1 Bakgrund och syfte

Förekomst av sulfidhaltiga jordar i samband med infrastrukturprojekt är ett växande problem för entreprenad- och byggbranschen. Vid grundvattensänkning och schaktning i dessa typer av massor utsätts sulfidmineralen i massorna för syre från luften och en oxidationsprocess sätts i gång. Även perkolation av nederbörd genom massorna leder till oxidation av sulfidmineralen och till bildning av ett surt lakvatten, vilket i sin tur ökar mobiliteten av olika metaller som förekommer tillsammans med sulfidmineralen. Lakvattnet, som nu har ett lågt pH och högt innehåll av vissa metaller, rör sig vidare till recipienter och riskerar att skada de akvatiska ekosystemen.

Sulfidjordar utgörs generellt av finkorniga sediment som bildades på havsbotten och har hållits under vattenmättade förhållanden utan ytterligare konsolidering. I Norden förekommer sulfidhaltiga jordar och berg huvudsakligen längs kusten kring Bottenviken, men potentiellt även längs Sveriges övriga kust samt i området kring Oslofjorden, Figur 24. I Sverige och Finland utgörs sulfidjordarna av sediment som ursprungligen bildades på botten av Littorinasjön. Stora ytor av kustnära marker på båda sidor om Kvarken och Bottenviken utgörs av gamla havsbottnar. Dessa sediment bildades efter den senaste istiden och har lyfts upp med den pågående landhöjningen (Sohlenius & Öborn, 2004).

**Figur 24. Potentiell förekomst av sulfidhaltiga massor i de nordiska länderna (Boman, Åström, & Fröjdö, 2008).**





Problematiken med förekomst och hantering av sulfidjord är inte begränsad till markområdena i Norden, utan samma problem förekommer i kustnära områden runt om i världen, exempelvis i Asien, Nordamerika, Sydamerika samt Australien och Nya Zeeland. Sulfid- och sulfatjord täcker uppemot 17 miljoner hektar runt om i världen (Andriess & van Mensvoort, 2022). På vissa platser förekommer det även sulfidjordar i inlandet, exempelvis i de tropiska delarna av Australien där det tidigare vuxit mangroveskog (Queensland Government, 2022).

En vanlig strategi för hantering av icke-behandlad schaktad sulfidjord är att hindra oxidationen genom att placera massorna under vatten, exempelvis i vattenmättade deponiceller, eller placera massorna i centrum av en vall eller tryckbank, där de täcks med andra massor utan försurande egenskaper. I båda fallen antas att sulfidjordmassorna förblir nära vattenmättade och inte oxideras.

Vidare kan sulfidjordmassorna behandlas i syfte att förändra massornas geotekniska egenskaper och göra dem mer lämpliga för olika konstruktioner.

I denna studie sammanställs tidigare utförda undersökningar av olika behandlingsmetoder, vilka är tänkta att underlätta hantering av och möjliggöra avsättning för schaktade sulfidjordmassor. Metoderna som undersökts är:

- Kemisk stabilisering genom behandling av försurningseffekterna som följer av oxidationen. Olika kalkprodukter tillförs i syfte att höja buffringskapaciteten, höja pH, fastlägga metalljoner. Oxidationen fortgår men effekterna mildras. Bärigheten i dessa massor är fortfarande låg.
- Geoteknisk stabilisering för att möjliggöra avsättningar för massorna som fyllnadsmaterial (*utan* geotekniska krav) och konstruktionsmaterial (*med* geotekniska krav). Massornas hållfasthet höjs genom inblandning av bindemedel såsom cement, i storleksordning 5-15 vikt-%. Massorna egenskaper höjs till den nivå som krävs för den tilltänkta applikationen.

Syftet med denna rapport är således att sammanställa information från tidigare utförda studier och redogöra för metoder för kemiska och geotekniska behandlingsmetoder av schaktade sulfidjordar.

## 2 Kemisk stabilisering av schaktad sulfidjord

### 2.1 Bakgrund

Målet med kemisk stabilisering av schaktade sulfidjordar är att förhindra eller mildra den kemiska oxidationen som sker vid syresättning av sulfidmineralen.

Den vanligaste strategin för att hantera försurningen som oxiderande sulfidjord orsakar är neutralisering (buffring) av lakvattnet till pH kring 7. Behandlingen kan utföras i utgående lakvatten innan det når recipienten eller i porvattnet i jordmassorna innan lakvatten bildas.

Vid behandling av lakvatten tillsätts ett buffrande medel till vattnet som dräneras från jordmassorna. Det buffrande medlet kan vara ett fast material (ex. kalk) eller ett flytande material (ex. lut).

Andra material används vid vattenrening för fastläggning av metaller. Bland dessa är biokol ett material som används vid vattenrening (Lehmann & Joseph, 2015).

Jordar som naturligt innehåller buffrande mineral (ex. kalcit i form av snäckskal) bildar inget surt lakvatten. Inom jordbruket används inblandning av jordbrukskalk (mald kalksten) för att åstadkomma samma effekt. Principen bakom kalkning är att tillföra en buffringskapacitet som motsvarar försurningskapaciteten i sulfidmineralen. Antagandet utgår ifrån att allt svavel finns som pyrit som oxideras. Försurningskapaciteten är proportionerlig till svavelhalten. För att enklare kunna avgöra hur mycket buffrande material som behöver tillsättas en jord, har de australiensiska och finländska miljömyndigheterna tagit fram doseringstabeller för behandling av jord och jordbruksmark som utgår från halten svavel i jorden (Queensland Government, 2022), (Miljöministeriet, 2015). Att behandla jordmassor med kalk eller annat tillsatsmedel i syfte att höja buffringskapacitet innebär att det behandlade materialet klassas som avfall ur ett juridiskt perspektiv.

För att behandla jordmassornas porvatten kan inblandning av det buffrande materialet göras. Inblandningen innebär att det buffande materialet fördelas i jordmassan, vilket kortar ner avståndet mellan de syraproducerande och de buffrande mineralen. Att blanda tillsatsmedel i sulfidjord är svårt ur en teknisk synpunkt på grund av sulfidjordens blöta konsistens, vilket också gör metoden kostsam.

Ett annat sätt att behandla porvattnet kan vara att tillföra tillsatsmedlet i lager, vilket är enklare ur ett tekniskt perspektiv men innebär en längre transportsträcka mellan vattnet och tillsatsmedlet och därmed en potentiellt sämre verkan. Behandlingen följer i stora drag samma princip som behandling av utgående vatten i en reaktiv barriär, innan det når recipienten. Porvattnet passerar genom lagret och metalljonerna fastläggs. I praktiken är det osäkert hur mycket av tillsatsmedlet som kommer i kontakt med porvattnet och om behandlingskapaciteten är lika stor som när materialen blandas.

I efterföljande avsnitt redovisas metoder och resultat från tidigare utförda försök till kemisk stabilisering schaktad sulfidjord, enligt de principer som behandlats i styckena ovan.

## 2.2 Syfte

Syftet med laboratorieförsöken var att

- undersöka om kalk och biokol har förmågan att fastlägga metalljonerna som frigörs från oxiderande sulfidjord,
- undersöka hur tillsatsmedlets kornstorlek och dosering påverkar behandlingsens effektivitet, samt
- jämföra hur inblandning respektive applikation som ett lager påverkar behandlingsens effektivitet.

## 2.3 Behandling av lakvatten

### 2.3.1 Metod

I en studie (Kronsell & Flodin, 2021) gjordes laboratorieförsök där möjligheterna att använda biokol för behandling av lakvatten från sulfidjord undersöktes. I tidigare studier hade resultat från försök att behandla lakvatten från olika sulfidbärande material visat lovande resultat (Sørmo, Kämäräinen, Edvardsson, & Maurice, 2020).

Adsorptionsförmågan och buffertkapaciteten hos två typer av biokol med olika kornstorlek undersöktes genom att applicera kol på ett surt lakvatten. Två försök utfördes enligt samma rutin. I det andra försöket användes ultrafinmalen kalciumkarbonat som referens, se Tabell 3. Biokolet Jacobi AquaSorb™ CP1 är ett aktiverat kol speciellt framtaget för rening av vatten. Carbofex biochar är ett biokol framställt av trärester.

**Tabell 3. Material som användes i försöket att behandla lakvatten. Tabell från Kronsell & Flodin (2021).**

	PSD	Dosage Biochar/lime	Water
Experiment 1			
Jacobi AquaSorb™ CP1	< 0.1 mm	1 g	60 ml
Carbofex biochar	<8mm	1 and 5 g	60 ml
Experiment 2			
Jacobi AquaSorb™ CP1		0,5 and 1 g	60 ml
Carbofex biochar	< 0.5 mm and < 4 mm	1 and 5 g	60 ml
C2	< 0.1 mm	1 g	Jacobi

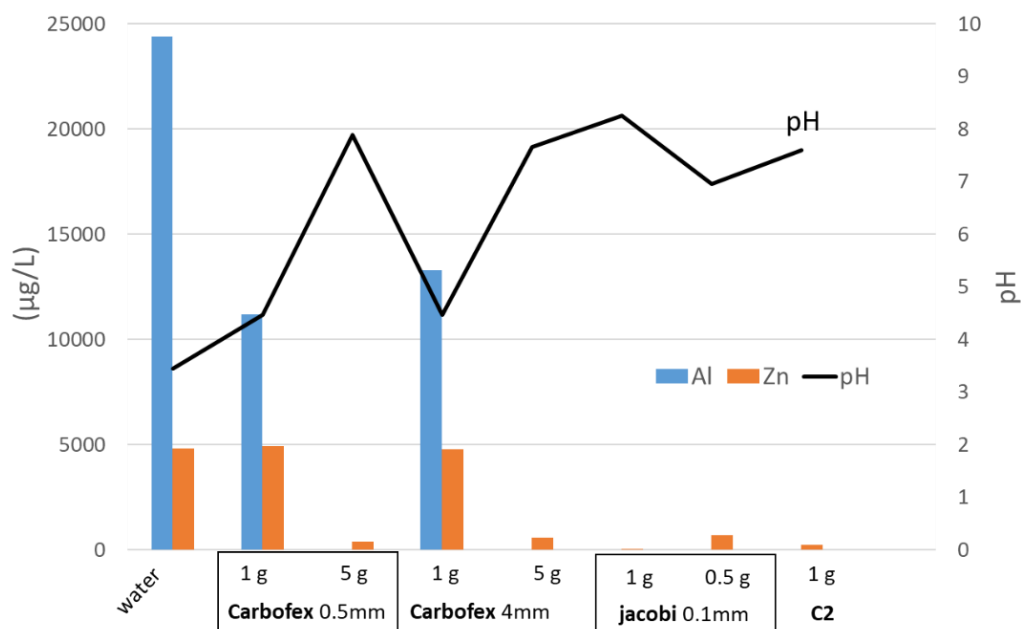
Lakvatten togs från lådor fyllda med obehandlad sulfidjord som vattnats och dränerats regelbundet enligt samma princip som i kapitel 2.4. Lakvattnet analyserades med avseende på metaller och pH mättes inför testet. Biokol och

kalciumpkarbonat tillsattes sedan vattnet i doser om 0,5 g, 1 g och 5 g i 60 ml lakvatten, se Tabell 3. Flaskorna stängdes, skakades för hand och lämnades i rumstemperatur under en veckas tid. Vattnet analyserades sedan med avseende på metaller och pH.

### 2.3.2 Resultat

Resultaten från de laboratorieförsök som utförts (Kronsell & Flodin, 2021) bekräftade resultat från litteraturen, nämligen att biokol har förmågan att adsorbera spårämnen i form av metalljoner (Sørmo, Kämäräinen, Edvardsson, & Maurice, 2020). Bedömningen görs därför att biokol kan användas för behandling av exempelvis surt lakvatten från sulfidhaltiga jordar. Försöken visade att typ samt dos av biokol var de faktorer som kontrollerade biokolets adsorptionskapacitet. Den mest "avancerade" typen av biokol, som producerats vid högst temperatur och malts till minst partikelstorlek (aktiverat biokol Jacobi 0,1 mm), var den som hade störst effekt på immobiliseringen av metalljonerna. I Figur 25 redovisas förändringarna i pH och metallkoncentration i de olika proverna i försöket. Zink och aluminium är metallerna som oftast lakas ut av oxiderande sulfidjordar och som kan orsaka skador för vattenlevande organismer i recipienten.

**Figur 25. Koncentration av aluminium och zink samt pH i lakvatten, före och efter tillsats av biokol av olika typ och i olika dos. Figur från Kronsell & Flodin (2021).**



Tillsats av 1 g Carbofex biokol minskade halten aluminium i vattnet men lämnade halten zink oförändrad, samtidigt som pH höjdes från 3,5 till 4,5. En ökning av tillsatt mängd kol till 5 g ledde till en signifikant sänkning av zinkhalten och en sänkning av aluminiumhalten till under rapporteringsgränsen. Samtidigt höjdes pH till 8.

Malning av Carbofex biokol från 4 mm till 0,5 mm hade en marginell effekt på aluminiumhalten i vattnet och ingen effekt på zinkhalten och pH.

Tillsats av 1 g Jacobi biokol ledde till att aluminium- och zinkhalterna sjönk under rapporteringsgränsen och pH höjdes till 8.

Tillsats av 0,5 g Jacobi biokol ledde till en signifikant sänkning av zinkhalten och en sänkning av aluminiumhalten till under rapporteringsgränsen. Samtidigt höjdes pH till 7. Effekten av 5 g Jacobi biokol motsvarade effekten av 5 g Carbofex biokol.

Tillsatts av 1 g kalk (C2) ledde också till en höjning av pH till 7,5 och var lika effektiv som 0,5 g Jacobi biokol och 5 g Carbofex biokol.

## **2.4 Behandling av porvatten – inblandning av tillsatsmedel i jord**

### **2.4.1 Metod**

I två undersökningar (Kronsell & Flodin, 2021; Stasis Project, 2022) utfördes försök att stabilisera sulfidjord med olika typer av kalciumkarbonat och biokol.

**Försöken i de två studierna utfördes med samma metod, där plastlådor med dränering i botten fylldes med sulfidjord (svavelhalt 1700 mg/kg TS) och tillsatsmedel,**

Figur 26. Proverna vattnades en gång i veckan och lakvattnet provtogs varje månad och analyserades med avseende på metaller, pH, konduktivitet och redoxpotential. Försöket utfördes i triplikat och 18 lådor följdes upp. Efter 6 månader utökades vattningsintervallet till varannan vecka för att möjliggöra torkning av materialet.

Fem tillsatsmedel och en obehandlad referensjord användes;

1. Obehandlad jord för referens (Ref)
2. Kalk för behandling av trädgårdar, <1,5 mm (Trä)
3. Ultrafinmalen kalk, 1,5 µm (C2)
4. Mesa-kalk - Kalkslam från massaindustrin Metsä Board, Husum, Sverige
5. Carbofex biokol, <8 mm (Bio)
6. Träkol från dagligvaruhandeln, <8 mm (Grill)

**Figur 26. Lådorna där sulfidjord och kol eller kalciumkarbonat blandades i försöket att stabilisera jorden kemiskt (n=3). Foto från Kronsell och Flodin (2021).**



### **2.4.2 Resultat**

I Figur 4–8 visas mängden av aluminium, zink, koppar och svavel som lakades ut vid varje cykel, för de olika behandlingarna. I lådorna med kalktillsatser var metallhalterna (aluminium, koppar och zink) generellt under rapporteringsgränsen och dessa redovisas inte i figurerna. Svavelutlakningen visade först en minskande trend som är resultat av en första ursköljning, en så kallad "flush". Mängderna är som lägst efter tre månader innan de ökar i samtliga material, som ett resultat av sulfidoxidationen.

Under de fyra första månaderna var urlakningen av aluminium, zink och koppar högst från jorden behandlad med biokol (Bio). Efter att oxidationen kommit i gång, uppvisar referensen (Ref) de högsta halterna i lakvattnet medan urlakningen från de kolbehandlade (Bio och Grill) materialen fortfarande är hög. Mängden svavel som lakas ut ökar inte i samma nivå som de övriga materialen och är lägre än vid startfasen. Detta förklaras av att biokolen innehåller en viss mängd svavel som lakas

ut tillsammans med den mobila fraktionen av svavel som finns i jorden från början. Oxidationstakten bedöms därmed vara lägre i de kolbehandlade jordarna även om utlakningen av zink och koppar var högst.

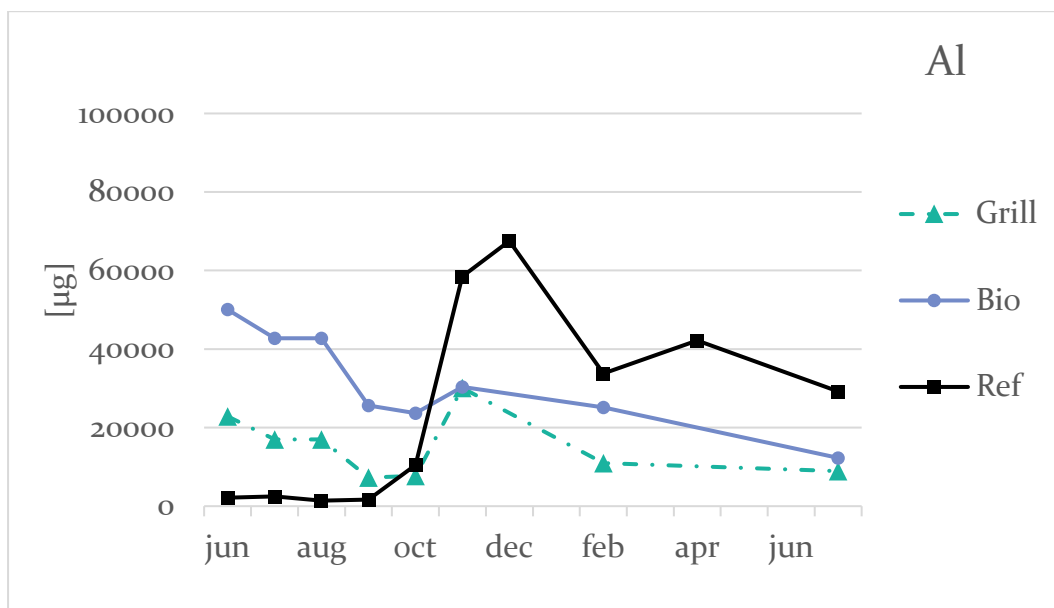
I de kalkbehandlade materialen (Trä, C2 och Mesa) sker en oxidation som leder till mobilisering av svavel medan zink- och kopparhalterna förfarande var låga.

Försöken att fastlägga spårämnen genom att blanda biokol med jord misslyckades. Att blanda biokol med sulfidhaltig jord dämpade inte de negativa effekterna av sulfidoxidationen. I den jord där biokol tillförts sjönk pH snabbt under 4 och förblev lågt under hela försökets gång. Det sura pH-värdet ledde till hög mobilitet av spårämnen och utlakningen var högre jämfört med den obehandlade jorden under försökets initiala fas. Biokolets alkalinitet förbrukades snabbt och kunde inte motverka försurningen.

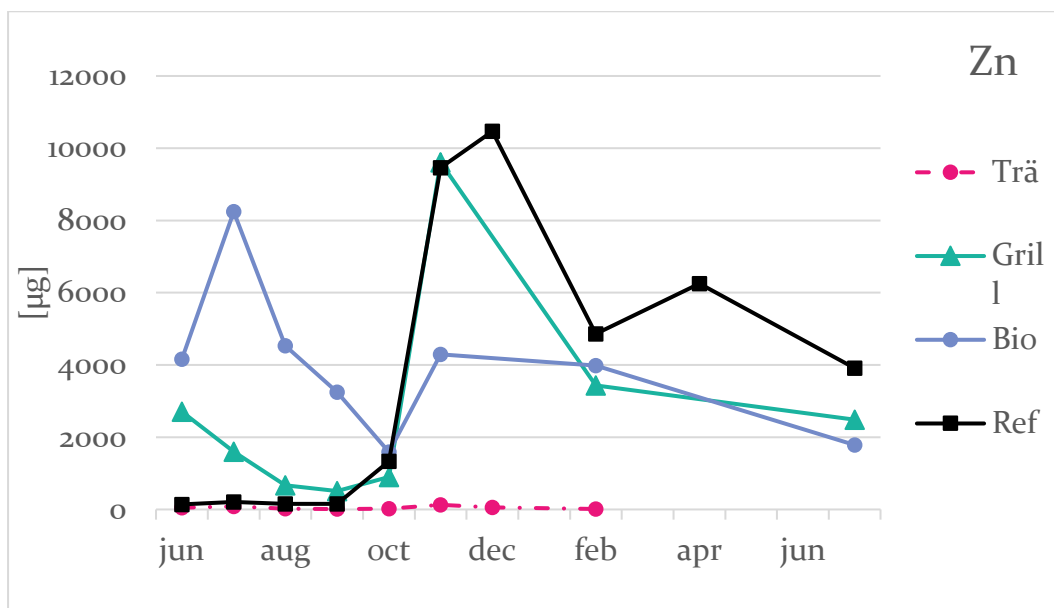
Biokol är ett poröst material, vilket främjar uppkomst av sulfidoxiderande bakterier, luftar jorden samt gynnar dränering av överskottsvatten. Samtidigt bidrar kolet också till att förbättra jordens vattenhållningskapacitet. I det aktuella fallet bedöms inblandning av kol ha främjat transport av vatten genom hela jordvolymen och därmed lakning av jorden, jämfört med den obehandlade jorden där transporten sker genom sprickor. Liknande studier har visat att sulfidoxidation, efter försökens avveckling, skett längs sprickor medan delar av jordvolymen fortfarande inte var oxiderad. Försurningen var för hög för biokolet, som inte hade buffertkapacitet nog att neutralisera vattnet.

Samtliga kalkmaterial kunde effektivt buffra sulfidjorden och minska utlakningen av metallerna, till halter under rapporteringsgränsen. Doseringen var tillräcklig hög för att motverka försurningen, oavsett kornstorlek. I en liknande försöksupställning har Novia (Uleåborg universitet) visat att finkorniga material såsom den finkorniga kalken C2 var lika effektivt som den fyrfaldiga mängden grovkornig jordbrukskalk med en partikelstorlek <3,15 mm (Stasis 2022).

**Figur 27. Mängden utlakad aluminium vid varje provtagning över tid i de olika behandlingarna.**

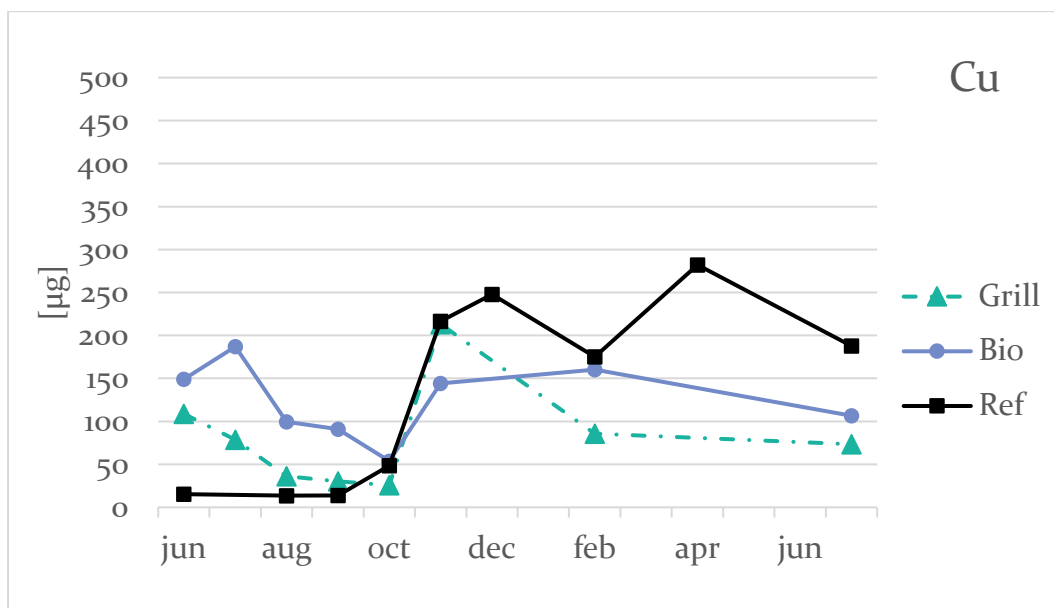


**Figur 28. Mängden utlakad zink vid varje provtagning över tid i de olika behandlingarna.**

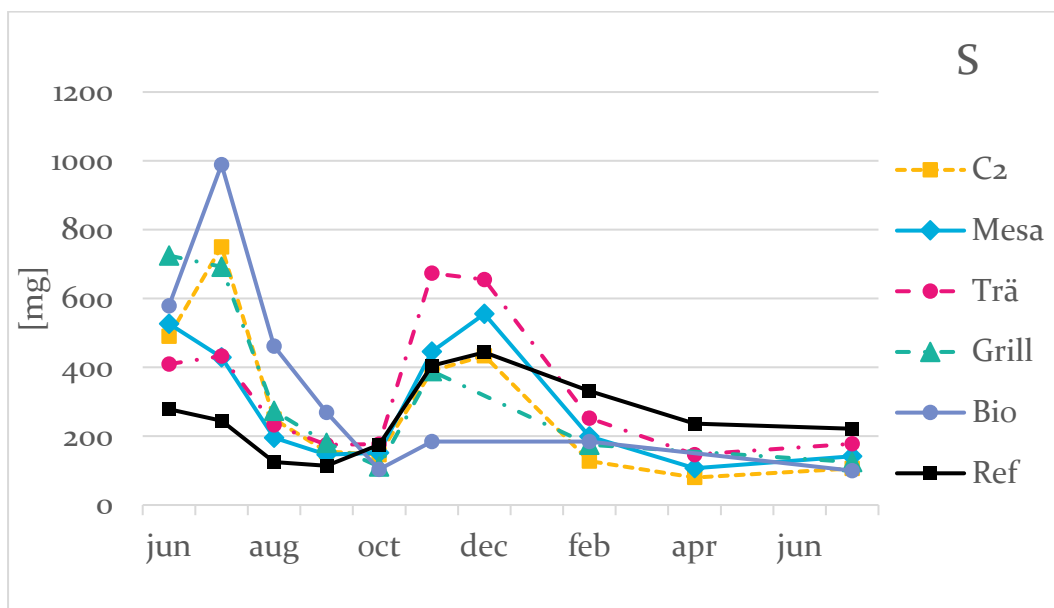




**Figur 29. Mängden utlakad koppar vid varje provtagning över tid i de olika behandlingarna.**



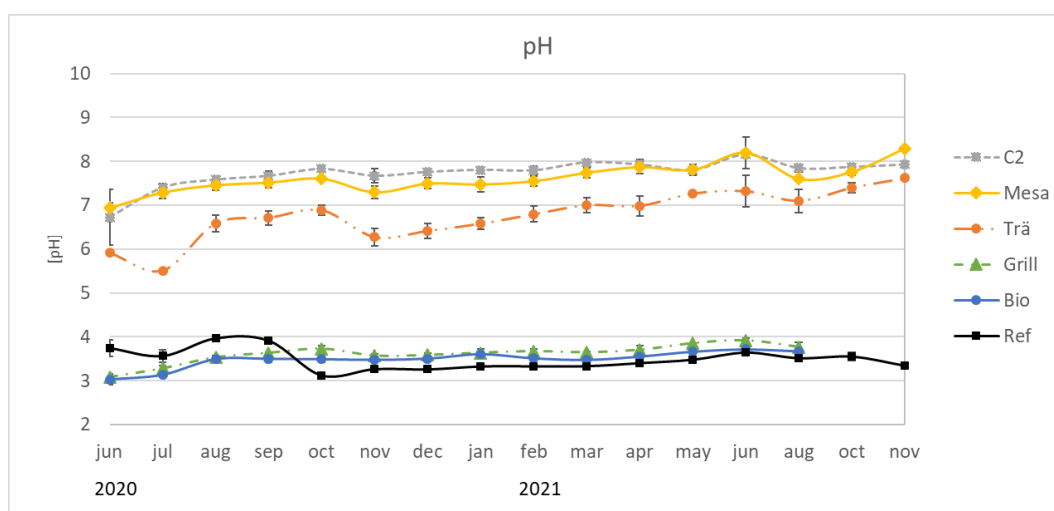
**Figur 30. Mängden utlakad svavel vid varje provtagning över tid i de olika behandlingarna.**



I Figur 31 redovisas förändringarna i pH under försökets gång. Kalken som i normala fall används i trädgårdar (Trä), visade sig ha en sämre buffringskapacitet än både C2 och Mesa-kalk (Mesa), förmodligen på grund av dess lägre innehåll av kalciumkarbonat. C2 och Mesa visade sig kunna hålla ett pH mellan 7 och 8 under större delen av försöket.

**Figur 31. Förändring i pH över tid i de olika behandlingarna. Det är en tydlig skillnad i buffringskapacitet mellan kalk (C2, Mesa, Trä) och kol (Grill, Bio).**

**Figur från Stasis Project (2022).**



## 2.5 Behandling av porvatten – jämförelse av lager och inblandning av tillsatsmedel i jord

### 2.5.1 Metod

Försök har gjorts i syfte att undersöka vilken behandlingseffekt som tillsatsmedlet har när det appliceras i lager jämfört med när de blandas. I försöket applicerades biokol och kalciumkarbonat antingen i lager under sulfidjorden eller inblandat i jorden. Sulfidjorden hade ett ungefärligt svavelinnehåll på 1100 mg/kg TS. Fyra tillsatsmedel användes samt en obehandlad referensjord;

1. Obehandlad jord för referens
2. Kalk för behandling av trädgårdar (GL)
3. Ultrafinmalen kalk (C2)
4. Carbofex biokol (Bio)
5. Jacobi biokol (JB)

I Figur 32 visas hur kalciumkarbonat placerades under sulfidjorden i plastkärll designade att dränera och samla upp lakvatten. Jord med inblandad kol eller kalciumkarbonat placerades i samma typ av plastkärll med dränering och uppsamling av lakvatten i botten. Samtliga kärll vattnades med avjoniserat vatten en gång i

månaden, i februari till och med maj. Lakvattnet samlades sedan upp varje månad och analyserades med avseende på metallhalt, pH, konduktivitet och redoxpotential.

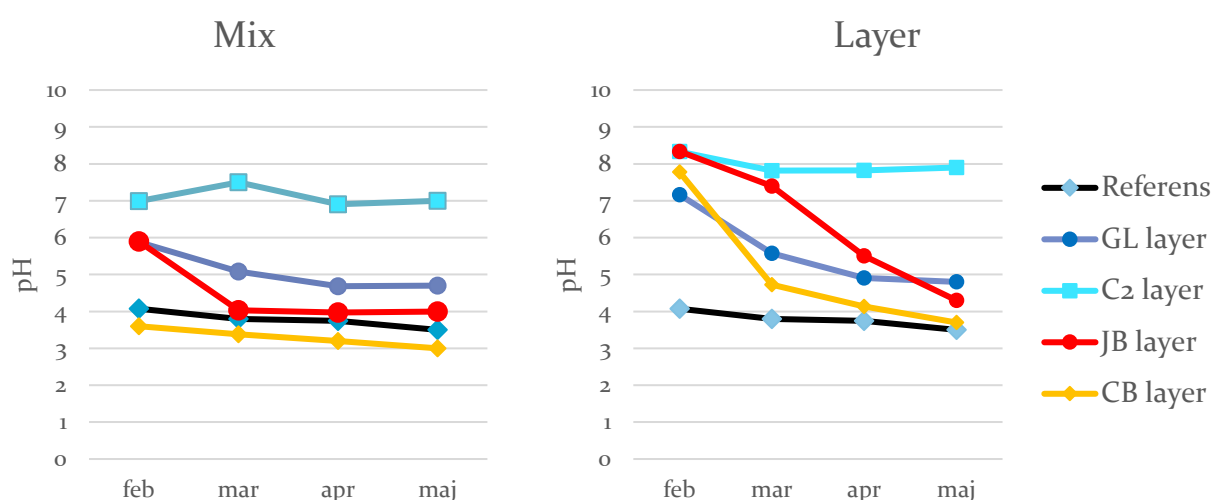
**Figur 32. Foto från försöket där kalciumkarbonat (C2) applicerades i lager under sulfidjorden. Foto Ida Kronsell.**



### 2.5.2 Resultat

Lakvattnet från referensprovet, som inte hade något tillsatsmedel, hade pH strax över 4 efter försökets genomförande, som ett resultat av sulfidoxidationen. Samtliga prover förutom de med kalciumkarbonat producerade ett surt lakvatten, Figur 33.

**Figur 33. pH i lakvattnet från de olika metoderna med inblandning och lager av biokol (JB och CB) och kalciumkarbonat (C2 och GL).**

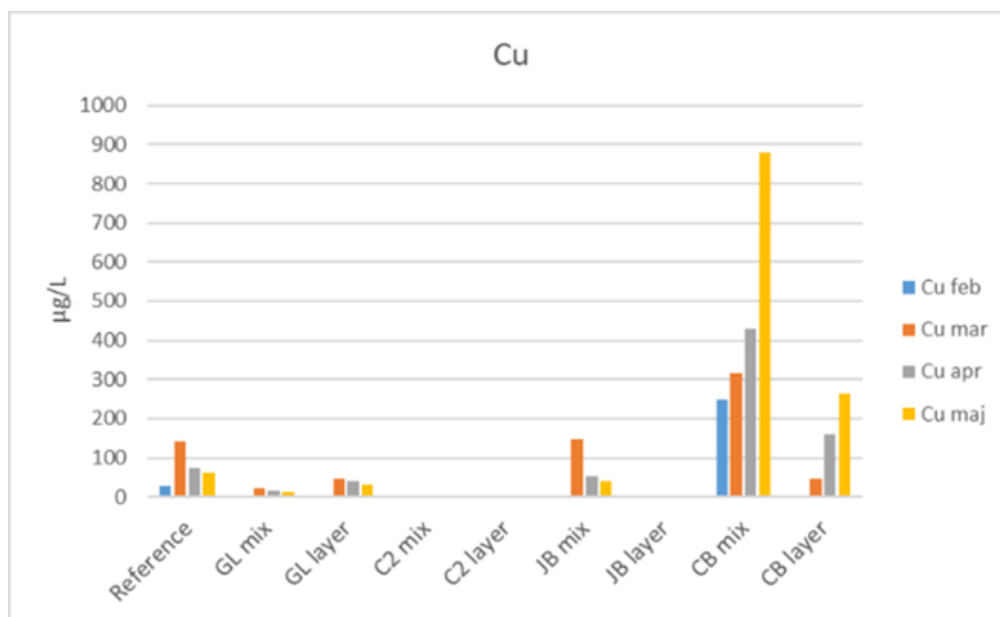


Metallanalysen av lakvattnet från de olika metoderna (lager och inblandning av tillsatsmedel) visar att biokol var mest effektivt med avseende på immobiliseringen

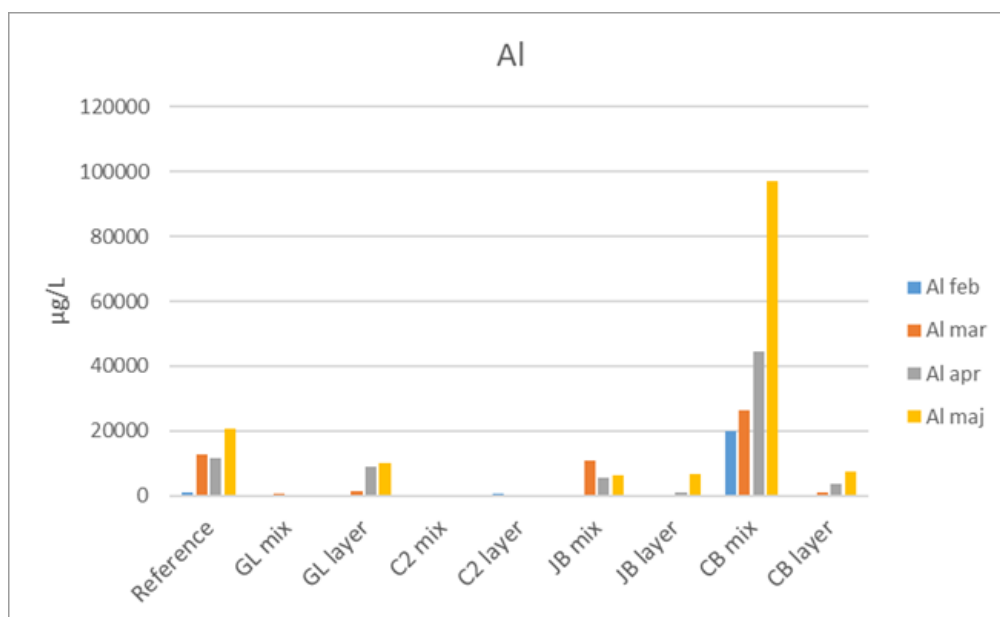
av metalljoner, när kolet (JB och CB) applicerades i ett lager under sulfidjorden jämfört med metoden där kolet blandades med jorden, Figur 34 och Figur 35.

För kalciumkarbonat visade sig det motsatta vara sant. Kalciumkarbonaten (GL och c2) hade störst effekt på immobiliseringen av metalljoner när den blandades med sulfidjorden, i jämförelse med när det applicerades i ett lager under jorden, Figur 34 och Figur 35.

**Figur 34. Mängden utlakad koppar då tillsatsmedel applicerats i lager eller blandats med jorden.**



**Figur 35. Mängden utlakad aluminium då tillsatsmedel applicerats i lager eller blandats med jorden.**



## 2.6 Direkta effekter av lagrade överskottsmassor

### 2.6.1 Metod

För att undersöka om lagrade sulfidjordhögar (ex. överskottsmassor från infrastrukturprojekt) kan ha en negativ effekt på omgivande miljö på kort tid (några veckor) genomfördes ett småskaligt laboratorieexperiment (Stasis Project, 2022), Figur 36. För att likna högar med överskottsmassor placerades 0,5 kg sulfidjord i plastlådor utformade för att dränera och samla upp lakvatten. Ovanpå högarna applicerades 5 g ultrafinmalen kalciumkarbonat (C2) (Umeå C2). Jordhögarna vattnades med avjoniserat vatten och provtogs två gånger i veckan, med avseende på pH och elementrörlighet. Resultat från kalkstensbehandlad jord jämfördes med obehandlade jordmassor (Umeå).

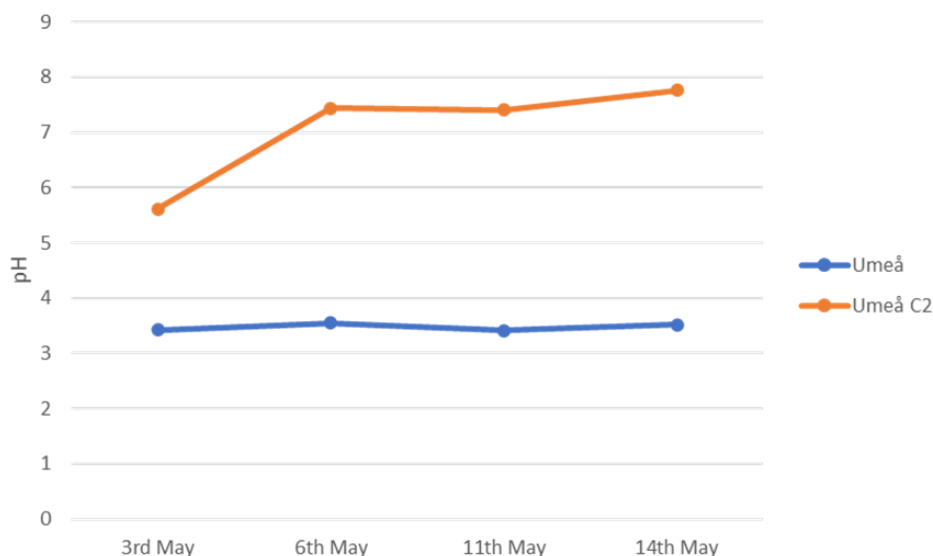
**Figur 36. Foto från försöket där urlakningen från lagrade överskottsmassor av sulfidjord undersöktes.**



### 2.6.2 Resultat

Resultaten från lakvattenanalyserna visade en pH-höjning där jorden hade behandlats med kalksten (Umeå C2). pH ökar från cirka 5,6 vid första provtagningen till 7,8 vid sista provtagningen och ett ganska stabilt pH på cirka 3,5 i den obehandlade referensjorden (Umeå), Figur 37.

**Figur 37. Medelvärden för pH i lakvattnet från försöket där urlakningen från lagrade överskottsmassor av sulfidjord undersöktes.**



Att applicera kalciumkarbonat på ytan av upplagda högar av sulfidjord, där oxidationen sker, var ett sätt att begränsa förändringen i pH i lakvattnet. Resultaten från laborieförsöket visade att behandlingen var effektiv och att pH i lakvattnet var mellan 7 och 8.

Vid vattning sker en yterosion och partikeltransport. Kalkpartiklar har därför sköljts av och funnits i lakvattnet som samlats från försöket. Därför är det svårt att särskilja effekten av kalken på jordytan och effekten av kalken i lakvattnet som ansamlats.

Därför är det svårt att extrapolera och skala upp resultaten till fältförhållanden. Kontroll av ytavrinning från tillfälligt lagrade högar av schaktad jord är viktigt. Minskad spridning av suspenderat material tillsammans med kalkning av ytan bedöms kunna förbättra vattenkvaliteten avsevärt, även om effekten är svår att kvantifiera utifrån laborieförsöken.

### 3 Geoteknisk stabilisering av schaktad sulfidjord

Då sulfidjord bildades på havsbotten och har hållits under vattenmättade förhållanden, utan ytterligare konsolidering, innehåller dessa ofta stora mängder vatten. Vanligtvis är sulfidjordens vattenhalt över flytgränsen för materialet vilket betyder att jorden innehåller tillräckligt med vatten för att bli flytande vid omrörning. Därför kan vissa sulfidjordar snabbt avge vatten och omvandlas till en tjock smet vid schaktning och transport vilket försvårar dess hantering. Sulfidjord klassificeras i kategorin silt och siltig lerjord, med förmågan att förlora vatten under stress vilket gör dem problematiska för användning i konstruktioner då sättningar kommer att ske och orsaka risk för skador. Vidare är siltiga jordar frostkänsliga, vilket kan orsaka sprickor och sättningar. Därför schaktas ofta sulfidjordar ut och ersätts med material med bättre geotekniska egenskaper. Även schaktade sulfidjordmassor har samma begränsande geotekniska egenskaper med vattenhalter över materialets flytgräns och låg hållfasthet, vilket kan leda till problem med släntstabilitet samt sättningsbenägenhet som gör det svårt att använda dessa som konstruktionsmaterial.

Stabilisering med hjälp av inblandning av bindemedel är ett sätt att öka jordmassornas hållfasthet och möjliggöra användning av dessa i olika typer av konstruktioner. Till exempel skulle den stabiliserade jorden kunna användas som konstruktionsmaterial i vallar och tryckbankar, i slänter och för grundläggning av utfyllnader och vägar med lägre bärighets krav. Inblandning av cement är en vanlig metod för att mekanisk stabilisera jord och öka hållfastheten till en nivå som är lämplig för viss geoteknisk tillämpning. Att stabilisera jord med bindemedel är en metod att förbättra en konstruktionsmaterial och innebär inte till att den stabiliserade jorden klassas som avfall.

För att avgöra hur mycket bindemedel som behövs för att stabilisera en given jordmassa, tas ett recept fram i laboratorium där mängden bindemedel bestäms baserat på den hållfasthet som skall erhållas. Dosering och blandning sker på olika sätt i laboratorium och i fält. Därför finns det ofta en skillnad mellan resultaten som kan nås i laboratorium och vad som de facto uppnås i ”verkligheten”. Därför har, utöver vilken förbättring som kan åstadkommas i laboratorieprov med hjälp av inblandning av bindemedel, även skillnaden mellan laboratorie- och fältresultat undersökts.

Metoder finns för att utföra blandning in-situ och i schaktade massor. Att blanda en siltig lerjord med hög vattenhalt med ett torrt material som cement och uppnå en homogen blandning i stor skala, är dock en utmaning. Fokus i detta projekt har varit schaktade massor och möjligheten att stabilisera dessa.

Undersökningarna och resultaten som tagits fram inom ramen för detta arbetspaket har redovisats i en licentiatavhandling som presenterades i början på februari 2023. I denna rapport sammanfattas dessa resultat. För mer information och detaljer kring arbetet som utförts hänvisas till Ziagharib (2023).

### 3.1 Syfte

Det övergripande syftet med arbetet var att undersöka förutsättningarna att kunna använda schaktad sulfidjord som konstruktionsmaterial i olika typer av geotekniska applikationer, efter att jordegenskaperna förbättrats med hjälp av bindemedel.

Arbetet har haft som utgångspunkt att den stabiliserade jorden ska bibehålla jordegenskaper och inte solidifieras till en monolit. Med andra ord är tillsatserna av bindemedel relativt låga (mellan 4 och 8 vikt-%).

De specifika frågor som har varit i fokus var:

- Utvärdera blandning i fältskala med entreprenadmaskiner.
- Utvärdera hur hållfastheten i jorden påverkas av att tillsätta olika mängder bindemedel.
- Utvärdera en testyta som stabiliserats för två år sen.

### 3.2 Material och metod

Sulfidjord: Försöken har utförts i samarbete med DÅVA DAC i Umeå som har tillhandhållit sulfidjord för både laboratorie- och fältförsöken. Jordmassorna som DÅVA DAC hade tagit emot kom från anläggningen av en järnvägsterminal, vid DÅVAs industriområde. Andelen lera i jorden var ca 10 % med en glödningsförlust (andelen material som brinner vid 750°C) mellan 3 till 5 % och ett svavelinnehåll om 4 000 mg/kg TS. Vattenkvoten i materialet var ca 50 % och flytgräsen ca 33 %.

Bindemedel: Multicem har använts som bindemedel för alla experiment. Multicem är en produkt som saluförs av Cementa och som består av en blandning av cement och CKD (Cement Kiln Dust).

Utvärdering av hållfasthet: Enaxliga tryckförsök (UCS) har använts som mått för jordens hållfasthet. För varje försök packas provet i en tub (5 cm i diameter och 10 cm lång). Efter att provet lämnas för härdning en bestämd tid (14, 28 eller 90 dygn) tas provet ur tuben för att utsättas för tryckförsök.

Enaxliga tryckförsök har använts för framtagandet av receptet, med olika mängder bindemedel, i laboratorieförsöken. Även fältförsöken har utvärderats med hjälp av enaxliga tryckförsök. Efter att behandlingen utförts har prov tagits från det blandade materialet och provtuber förberetts och lämnats för härdning i 28 dygn. För tillverkning av provtuberna valdes "tapping"-metoden, som innebär att tuben fylls i fem omgångar (fem lager) och slås 30 gånger mot en arbetsyta mellan varje lager. Metoden är standardiserad och repeterbar samt väl anpassad för blöta material där packning med fallande vikt, motsvarande standard proceduren för Proctor-packning inte fungerar.

Receptframtagning: Principen för receptframtagning har varit att blanda sulfidjord med mindre mängder cement (i storleksordningen kilogram) och förbereda ett antal tuber som testas efter en bestämd härdningstid. Den färska jorden hade en vattenkvot på 50 %. Lufttorkning har använts för att sänka vattenkvoten och undersöka effekten av stabilisering på torrare jordar. Cementmängderna som testats



har varit mellan 4 och 8 vikt-%. Härdningstid var 28 dygn enligt standard för UCS. Vid några tillfällen har andra härdningstider använts: 7, 14 eller 90 dygn. Utöver cementhalten har även sulfidjordens ursprungliga vattenkvot undersökts.

*Blandning i industriell skala:* En skopblandare (ALLU) användes för blandningsförsöken i fullskala. DÅVA DAC använder den här skopan när Mesa-kalk blandas i sulfidjord vid deras anläggning. Fördelen med skopan är att den kan hantera blöta och mjuka material. I samband med försöket undersöktes effekten av flera blandningssteg på blandningens homogenitet. Behandlingens effektivitet utvärderas genom enaxliga tryckförsök utförda på prov tagna från det blandade materialet, efter varje blandning. Ett antal stickprov togs från jordhögen efter att denna delats upp i flera sektioner, Figur 38.

**Figur 38. Procedur för utförande av fältblandning. Bilder hämtade från Ziagharib (2023). Foto: Alaleh Ziagharib.**



*Utvärdering av fältförsök från 2019:* Under sommaren 2019 byggdes, som en del av projektet MoSS 1, ett testområde för att testa olika bindemedelsrecept för stabilisering av sulfidjord. Totalt testades fyra bindemedel, tillsammans med en

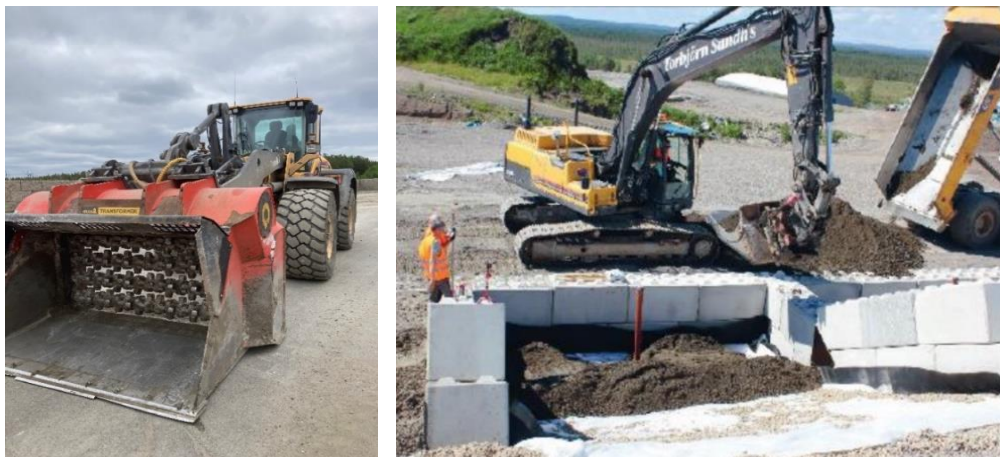
femte cell med obehandlad jord (Tabell 4). Tillsatsmedlen som användes var cement (MultiCem från Cementa) och Mesa-kalk (kalkslam från massaindustrin Metsä Board, Husum, Sverige). Sulfidjorden klassificerades som en sandig lerig silt med en silthalt på 50-60 % och lerhalt 7-9 %, glödningsförlust på 3 % och en svavelhalt mellan 2 000-3 000 mg/kg TS.

Tester på det stabiliserade materialet utfördes vid start och har presenterats av Al-Jabban (2019).

Den stabiliserade jorden blandades med hjälp av en skopblandare innan den placerades i celler avgränsade av betongblock, Figur 39. Varje cell hade ett geomembran placerat i botten för att samla upp lakvatten som bildats genom infiltration av massorna (Al-Jabban, 2019). Lakvattnet provtogs och analyserades vid fyra tillfällen.

**Figur 39. Blandningsskopa (vänster) och konstruktion av cellerna (höger).**

Bilder hämtade från Ziagharib (2023). Foto: Alaleh Ziagharib.



### 3.3 Resultat

I

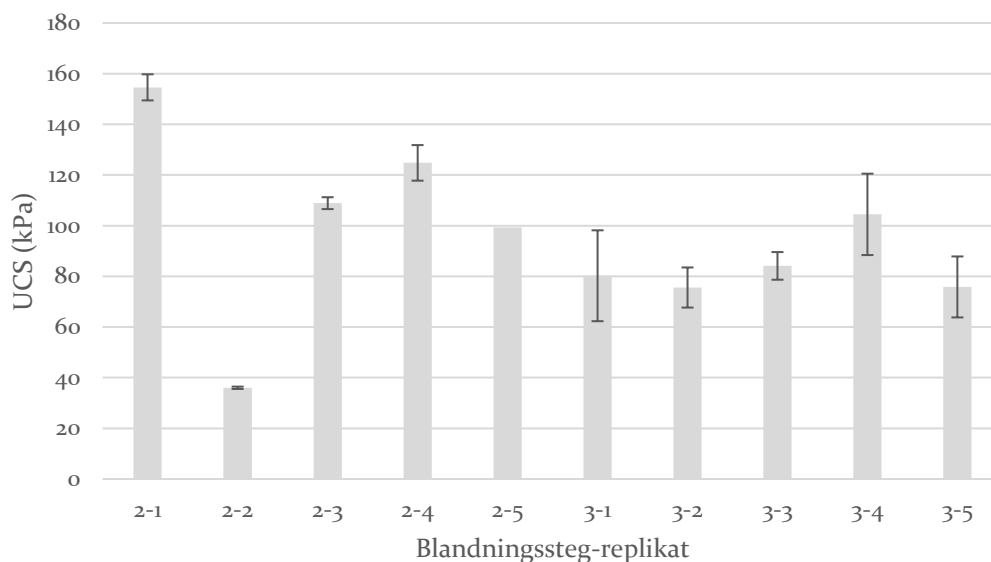
Figur 40 redovisas de erhållna UCS efter 28 dygn härdning i jordmassorna efter två och tre blandningar. Efter varje blandning delades jordhögen i fem delar som sedan provtogs. I första omgången togs duplikatprov medan fem replikat togs i omgång två. Efter två blandningar fanns en delvolym med låg hållfasthet (UCS < 40 kPa) medan de fyra resterande visade UCS > 100 kPa. Efter ett tredje blandning var UCS mellan 75 och 100 kPa.

Figur 41 visar hållfastheten i materialproven stabiliserade med 4; 6 respektive 8 % Multicem, vid olika vattenkvot, efter 28 dygns härdning. Jordmaterialet hade en optimal vattenkvot vid vilken hållfastheten var högst. Hållfastheten är proportionerlig till andelen medel som tillsätts (mellan 600 kPa vid 4 % upp till 950 kPa vid 8%). Vattenkvoten hade en större inverkan på den slutliga hållfastheten än

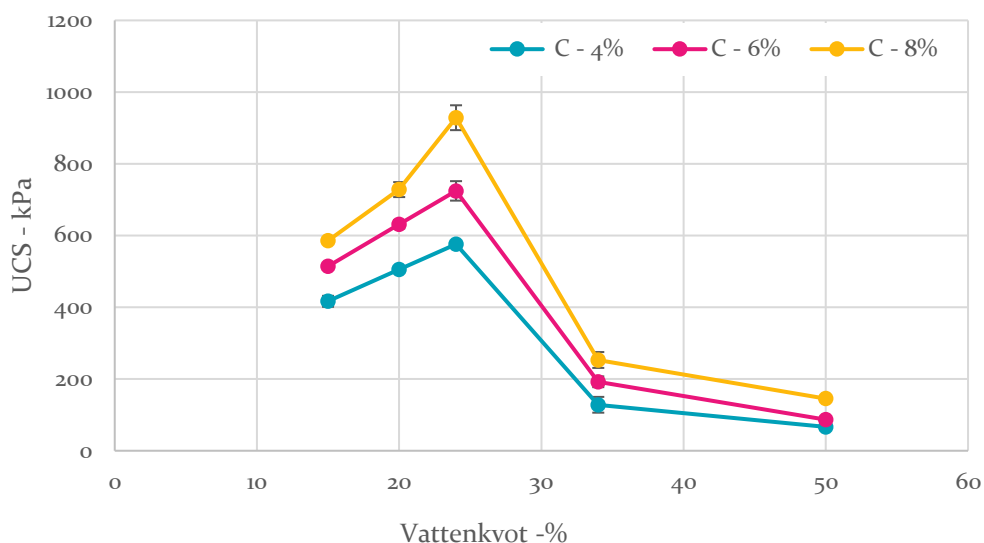
cementhalten. Vid en vattenkvot på 50% (jordens naturliga vattenkvot) var UCS <200 kPa oavsett cementhalt, 3 till 5 gånger lägre än vid den optimala vattenkvoten.

Skillnaden antas bero på att porositeten är lägst vid den optimala vattenkvoten och att cementering av partiklarna blir mer effektivt (avståndet mellan partiklarna är minst och cement kan effektivt fylla porositeten).

**Figur 40. Enaxliga tryckförsök (UCS) i jord som stabiliserats med cement efter två respektive tre blandningssteg. Vid varje blandningssteg delades jordvolymen i fem delar som provtogs separat. Efter två blandningssteg (medelvärde två replikat, n=2) och tre blandningssteg (medelvärde av fem replikat, n=5). Standardavvikelser redovisas. Omarbetat från Ziagharib (2023).**



**Figur 41. Enaxliga tryckförsök (UCS) i jord som stabiliserats med cement som en funktion av den ursprungliga vattenkvoten i jorden. Jämförelse av dosering med 4, 6 respektive 8 vikt-%. Omarbetat från Ziagharib (2023).**



Utvärdering av fältförsök från 2019: Inledande laboratorieresultat från tester utförda med samma material som använts i fält visade att hållfastheten varierade beroende på typ av bindemedel och doseringen av dessa, Tabell 4. I dessa försök testades hållfastheten efter 7 respektive 35 dygn. Härdningsperioden förlängdes till 35 dygn av praktiska skäl.

**Tabell 4. Blandningsförhållanden i fältcellerna som byggdes 2019. Hållfasthet i materialet efter härdning i sju dygn (UCS (7 d)) respektive 35 dygn (UCS (35 d)) från material som provtagits i samband med fältförsöket. Tabell från Al-Jabban (2019).**

Cell	Cement, %	Mesa, %	UCS (7 d) kPa	UCS (35 d) kPa
0	15	0	540	540
1	4	0	55	75
2	2	6	75	90
3	0	0	55	55
4	0	8	75	100

Hållfastheten i Cell 0, där högst andel cement användes (15 % Multicem), var överlägset högst jämfört med alla andra tillsatser och den obehandlade jorden.

Cell 1 (4 % Multicem) och Cell 3 (obehandlad jord) hade närliggande hållfasthet. Effekten av härdningstiden på UCS i den behandlade cellen (Cell 1) ledde till en ökning av hållfastheten från 55 till 75 kPa, Tabell 4.

**Som en konsekvens av tillsatsen av cement tillsammans med Mesa-kalk (Cell 2) höjdes pH i jorden. Cementbaserade bindemedel har förmågan att höja pH långt över neutrala förhållanden jämfört med Mesa-kalk som ökade pH upp till 8. Behandlingen**

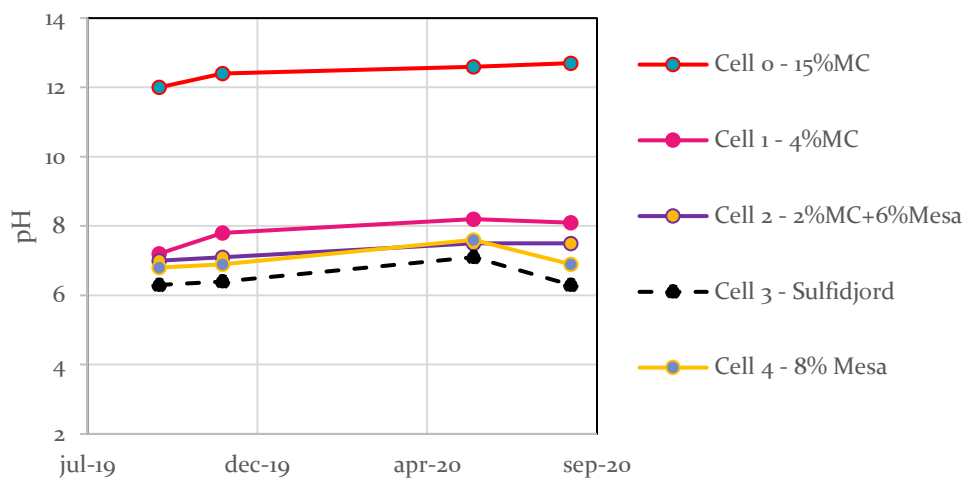
med 15 % MultiCem (Cell 0) höjde pH över 12 vilket ledde till mobilisering av bland annat aluminium och koppar,

Figur 43 och

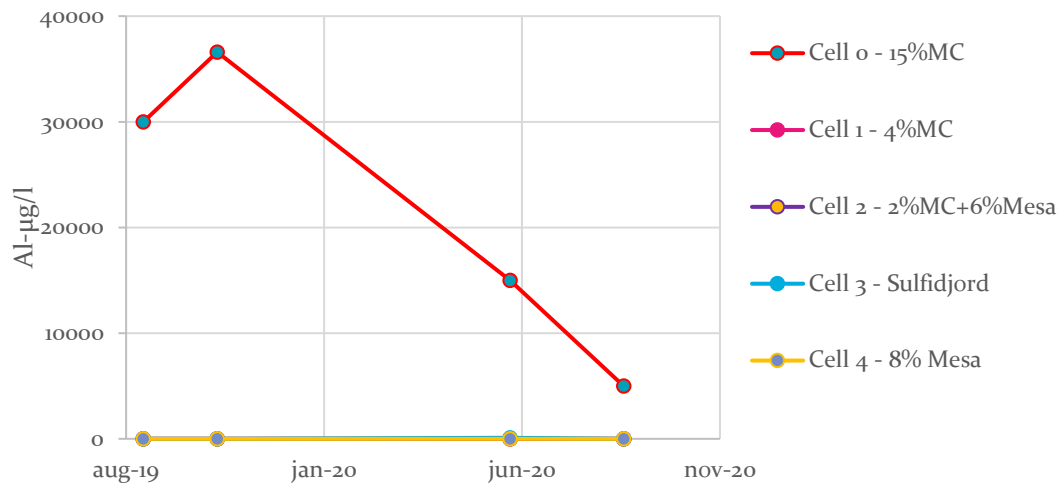
Figur 44. Dessa grundämnen kan ha sitt ursprung i sekundärt mineral som kan finnas i sulfidjorden eller i CKD som finns i det cementbaserade bindemedlet. Stabilisering med lägre halter bindemedel (4% Multicem, Mesa-kalk och en blandning av de två) ledde till pH mellan 7 och 8 tillsammans med begränsad mobilisering av ämnena.

Genom att öka mängden cementbaserat bindemedel ökade styrkan av den stabiliserade jorden avsevärt. Höga halter av bindemedel påverkade också jordens pH som kan stiga över 12 och förbättra rörligheten för vissa metaller.

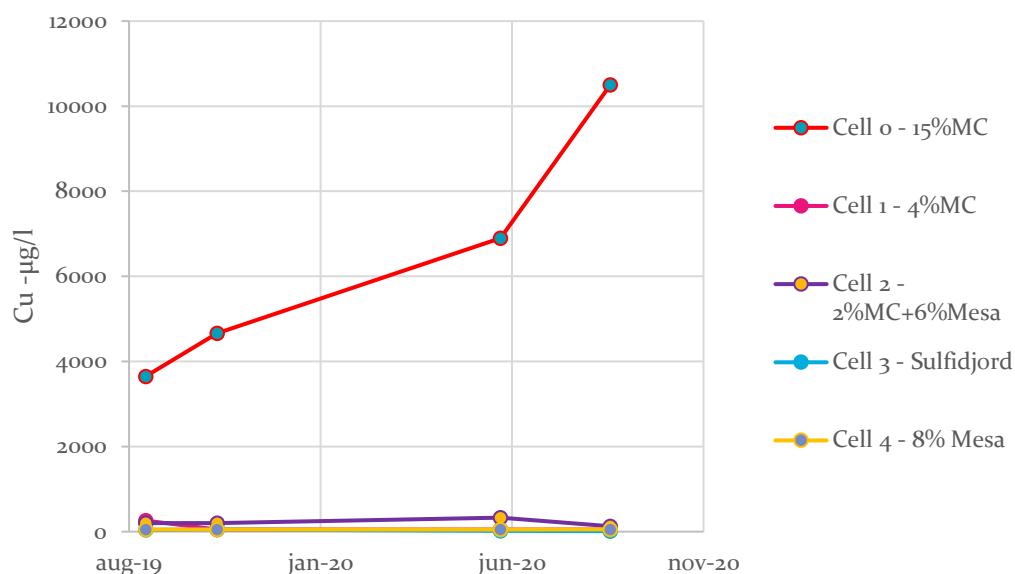
**Figur 42. pH i lakvatten från respektive cell under första året efter konstruktion.**



**Figur 43. Aluminiumhalten i lakvatten från respektive cell under första året efter konstruktion. Samtliga resultat förutom Cell 0 – 15 % är nära noll. Halt i µg/l.**



**Figur 44. Kopparhalten i lakvatten från respektive cell under första året efter konstruktion. Halt i  $\mu\text{g/l}$ .**



## 4 Slutsatser

I denna rapport har försök för stabilisering av sulfidhaltiga schaktmassor utförts i syfte att hindra bildning av surt lakvatten vid oxidation och massornas hållfasthet. Behandling med biokol och kalk har utvärderats, och den generella slutsatsen är att kalk fungerar bättre än biokol för att uppnå önskad effekt. Inblandning av cementbaserat bindemedel ökade jordens hållfasthet samtidigt som en buffringseffekt uppstod.

Genom inblandning av kalkhaltigt material möjliggörs minimering av de negativa effekterna som sulfidoxidation har på vattenkvalitén. Materialen som testades inom ramen för denna studie dvs, trädgårdskalk med partikelstorlek  $<1,5$  mm, Nordkalks finkorniga C2 med partikelstorlek  $2,5$   $\mu\text{m}$  samt Mesa-kalk från pappersmassa-industrin, visade alla tre på effektiv behandling av de oxiderande massorna.

Mängden doserad kalk, i form av kalksten, som behövs för att behandla massorna är inte bara en funktion av jordens sulfidhalt, utan beror även på tillsatsmedlets kornstorlek. Finkorniga material har större specifik yta och blir därmed mer effektiva. Finkorniga material såsom den finkorniga kalken C2 var lika effektivt som den fyrfaldiga mängden grovkornig jordbrukskalk (partikelstorlek  $<3,15$  mm).

En överdosering i förhållanden till svavelhalten behövs för att säkerställa behandlingen. Inblandning av de kalkbaserade tillsatsmedlen var mer effektivt jämfört med tillsats av samma mängd i skikt. När materialet tillsätts i lager ökar risken att källmaterialet blir tätare med tiden och att porvattnet därmed transporteras längs kanaler, samt att endast ytan av kalklagret reagerar med porvattnet. Sammantaget används bara en bråkdel av buffringkapacitet till behandlingen. Blandningen underlättar kontakt mellan porvattnet och kalkpartiklarna, samtidigt är blandning av sulfidjord både svårt och kostsamt. Att



tillföra tillsatsmedlen i lager behöver därför ta hänsyn till att tillsatsen inte får samma effektivitet.

Spridning av finkornig kalk på ytan av en jordhög är möjligt för att begränsa bildning av surt lakvatten. I laboratorieförsök har behandlingen visat sig effektiv för rening av dräneringsvattnet. Då en viss ytavrinning och -erosion av partiklar uppstår är det svårt att extrapolera dessa resultat till fältskola.

Biokolen, trots hög adsorptionsförmåga, visade sig ha en negativ inverkan på utlakning av metaller när det blandats i jordmassorna. När sulfidjord blandades med 5 % biokol visade det sig att mängden syra och metaller i dräneringsvattnet ökade. Biokol är ett jordförbättringsmedel som ökar porositeten och vattentransport i jorden. Biokoltillsatsen antas ha ökat vattengenomsläppligheten och transporten av metaller som ursprungligen fanns i jorden. Ursköljningen blev så intensiv att biokolen inte räckte till för att binda upp mobiliserade metaller. Vid tillsats i lager hade biokol däremot en positiv effekt på porvattnets kvalitet utan att jordegenskaperna förändrades.

De mekaniska egenskaperna hos sulfidjord är vanligtvis dåliga på grund av en hög vattenhalt. Hög vattenhalt är även ett problem för schaktad sulfidjord och vid stabilisering av dessa med cementbaserade bindemedel. Resultaten visade att den högsta hållfastheten nås vid en optimal vattenhalt som var långt under jordens naturliga vattenhalt. Att minska vattenhalten hos massorna inför stabilisering är därför fördelaktigt.

Fördelning av bindemedel i jordvolymen är avgörande för att uppnå en jämn hållfasthet. Resultaten från fältförsöken indikerar att tre blandningar med skopa var nödvändiga för att minska variabiliteten mellan olika delar av jordvolymen.

Sulfidjordar är siltjordar som lätt övergår i flytande form vid omrörning, och vatten kan frigöras. En förlängning av blandningstiden eller antal omgångar ökar därför risken för att blandningen blir alltmer flytande och att den slutliga genomsnittliga hållfastheten minskar, samtidigt som en jämnare kvalitet uppnås.

Genom att öka mängden cementbaserat bindemedel ökar hållfastheten samtidigt som porvattnet neutraliseras varvid metallers mobilitet minskar. Men om andelen bindemedel överstiger 10 % kan pH värdet i jorden stiga över 12 vilket medför en ökad mobilitet hos vissa metaller som till exempel aluminium och koppar.

## 5 Referenser

- Al-Jabban, W. (2019). *Soil modification by adding small amounts of binders: A laboratory study. Doctoral thesis*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
- Andriessse, W., & van Mensvoort, M. E. (2022). Acid sulfate soils, distribution and extent. In R. Lal (Ed.). *Encyclopedia of Soil Science*, 6.
- Boman, A., Åström, M., & Fröjdö, S. (2008). Sulfur dynamics in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide - The role of artificial drainage. *Chemical Geology* 255, 68-77.
- Kronsell, I., & Flodin, E. (2021). *Use of biochar for the mitigation of acid leachate generation from oxidising sulphide soil - Laboratory tests*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management*. London and New York: Routledge.
- Queensland Government. (2022, 12 22). *Acid sulfate soils explained*. Retrieved from <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/acid-sulfate/explained>
- Sohleniusa, G., & Öborn, I. (2004). Geochemistry and partitioning of trace metals in acid sulphate soils in Sweden and Finland before and after sulphide oxidation. *geoderma* 122, 167-175.
- Stasis Project. (2022). *En hållbar behandling av kustnära deponerad sulfidjord*.
- Sørmo, E., Kämäräinen, E., Edvardsson, M., & Maurice, C. (2020). Biochar for the Improvement of Soil and Rock with Acid Potential. *4th European Conference on Unsaturated Soils (E-UNSAT 2020)*. doi:10.1051/e3sconf/202019506005
- Ziagharib, A. (2023). *Mechanical properties of excavated sulfur rich soil stabilized with cement - A laboratory and field experiment. Licentiate thesis*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.

