Stockholms stad

Vägledning
Provtagning och klassificering av sulfidförande berg

Vägledning – provtagning och klassificering av sulfidförande berg är beställd av Exploateringskontoret, Stockholms stad
Kontaktperson: Ida Sundling
E-post: funktion.mot.expl@stockholm.se
Telefon: 08-508 27 600

Dnr: E2020-04235
Utgivningsdatum: 2021-08-20
Utgivare: Exploateringskontoret, Stockholms stad

Utredningen är levererad av Atrax Energi & Miljö AB
Huvudförfattare: Rasmus Fältmarsch

Innehåll

Förord **1**

Ordlista **2**

Inledning **4**

Syfte och omfattning **4**

Målgrupp och avgränsning **5**

Sulfider och relaterade miljöproblem **6**
Sulfidförande berg 6
Berggrundsgeologi 7
Sulfidförande jordar 8
Miljöproblematik relaterad till sulfider 9

Undersökningsmetodik **10**
Steg 1 – Bakgrundsmaterial 11
Steg 2 – Översiktlig kartering och provtagning 11
Steg 3 – Borrundersökning 15
Steg 4 – Analysmetodik och utvärdering 16
Totalhalt svavel *16*
ABA-test *17*
NAGpH-test *18*
Modifierat inkubationsförsök *19*
Övrig analysmetodik *20*
Utvärdering *21*

Klassificering **22**

Hantering och skyddsåtgärder **25**

Referenser **27**

Förord

Sulfidmineral förekommer naturligt i olika omfattning i berggrunden i Sverige. Sulfider är stabila när de är orörda men kan orsaka miljöpåverkan vid exponering för syre i samband med losshållning och bearbetning. Problematiken och behovet av utredning av sulfidförande berg har aktualiserats under senare tid i Stockholmsområdet.

Denna rapport är framtagen av Atrax Energi & Miljö AB för exploateringskontoret Stockholms stad och syftar till att ge vägledning kring hur provtagning och klassificering av sulfidförande berg ska ske i kontorets exploateringsprojekt i Stockholm. Arbetet med vägledningen påbörjades våren 2020. Under hösten 2020 gavs myndigheter, övriga förvaltningar och byggande bolag inom Stockholms stad, konsulter m.fl. möjlighet att lämna synpunkter på en utkastversion genom ett remissförfarande. Väsentliga remissynpunkter arbetades därefter in.

Vägledningen är huvudsakligen ämnad för exploateringsprojekt i detaljplaneskeden och berör således inte hantering i samband med genomförande.

Ordlista

ABA-test (*Acid Base Accounting*): Statiskt test som används till att bestämma ett materials kapacitet att producera och neutralisera syra. Utförs av kommersiella laboratorier enligt standarden SS-EN 15875:2011.

AP (*Acid Potential*): Materialets potential att producera syra.

Bergstuff: Prov av bergmassan för bergarts-/mineralbestämning och kemisk analys. Uttaget prov ska vara representativt för undersökningsområdet.

Borrkax: Finmalet bergmaterial som erhålls i samband med bergborrning genom exempelvis jord-bergsondering.

Inkubationsförsök: Vetenskapligt erkänd metod för att klassificera sur sulfatjord genom att materialet genomgår oxidation i rumstemperatur under 19 veckor.

ISP: icke-syraproducerande material

Mafiska mineral: Mörka svart-, grön- och brunfärgade mineral innehållande järn och magnesium, t.ex. pyroxen, olivin och amfibol. Dessa mineral utgör huvudkomponenter i mafiska bergarter.

Modifierat inkubationsförsök: Metod under utveckling som syftar till att klassificera sulfidförande bergmaterial som syra- eller icke syraproducerande genom påskyndad oxidation med hjälp av väteperoxid.

NAGpH-test (*Net Acid Generation*): Statiskt test som utförs av kommersiella laboratorier och används för att bedöma potentialen för ett provmaterial att producera syra.

NP (*Neutralization Potential*): Materialets potential att neutralisera syra.

NPR *(Neutralization Potential Ratio*): Kvoten NP/AP

PSP: Potentiellt syraproducerande material

SP: Syraproducerande material

Spaltneddelning: Homogenisering av provmaterial genom uppdelning i representativa samlingsprover. Utförs i huvudsak för att erhålla ett representativt provmaterial inför kemisk analys.

Sulfid: Svavelförening som innehåller sulfidjonen S^{2-} och kan förekomma i berg, sediment och jord. De vanligaste förekommande sulfidmineralen är järnsulfiderna pyrit (FeS_2) och magnetkis (FeS).

Totalhalt: Den totala halten av ingående grundämnen i ett material.

Totalhaltsanalys: Kemisk analys för bestämning av det totala innehållet av grundämnen genom smältning och/eller uppslutning med HNO_3, HCl och HF.

UCLM95 (*Upper Confidence Limit of the Mean*): Ett statistiskt säkerställt sätt (95 % konfidensgräns) för beräkning av ett skattat medelvärde. Det används generellt som representativ halt för att bedöma föroreningsgraden i ett område.

Väteperoxid: H_2O_2, ett starkt oxidationsmedel som bl.a. kan användas för att påvisa sulfidförekomst samt påskynda oxidationsprocessen.

Inledning

Föreliggande vägledning har tagits fram för exploateringskontoret Stockholms stad och utgör en första version baserad på tillgänglig information, erfarenhet och kunskap som finns att tillgå i dagsläget.

Berggrunden inom Stockholms stad innehåller varierande inslag av sulfidförande bergarter. Vid losshållning av sulfidförande berg kan syre och vatten komma i kontakt med sulfidmineralen. Detta kan i värsta fall leda till oönskade miljökonsekvenser i form av urlakning av surt- och metallrikt lakvatten som kan påverka omgivande miljö negativt.

Losshållet berg inom exploaterings- och anläggningsprojekt bör dock ses som en resurs och inte som ett avfall. Bergmassorna behöver återanvändas i så stor utsträckning som möjligt för att undvika ytterligare miljöpåverkan genom onödiga transporter. Påvisas sulfidförande berg behöver undersökning, klassificering och riskvärdering utföras på representativa prover av de undersökta bergmassorna.

Det bör i detta sammanhang påtalas att exploaterings- och anläggningsprojekt har bedrivits i Stockholmsregionen under lång tid. I dylika projekt har man även tidigare, i vissa fall omedvetet, kommit i kontakt med sulfidförande berg och/eller jord. Vad man i dagsläget känner till så har det sulfidförande materialet inte gett upphov till miljökonsekvenser i någon större omfattning.

Syfte och omfattning

Syftet med föreliggande vägledning är följande:

- Stegvis beskriva undersöknings-, provtagnings- och utvärderingsmetodik rörande sulfidförande bergmassor inom exploaterings- och anläggningsprojekt i Stockholms stad.
- Redogöra för en konkret och tydlig klassificering av sulfidförande bergmassor.
- Översiktligt beskriva hanteringsalternativ och förslag till skyddsåtgärder för sulfidförande bergmassor.

Målgrupp och avgränsning

Vägledningen är huvudsakligen ämnad för Stockholms stads exploateringsprojekt inom detaljplaneskedet och berör således inte genomförandeskedet.

I dagsläget finns inga nationellt fastställda riktvärden att tillgå för att utvärdera svavel/sulfidinnehåll i berg. Under sommaren har Region Stockholm, Förvaltning för utbyggd tunnelbana (2021), utgivit en publikation med ett utlåtande avseende sulfidhaltiga bergmassor inom utbyggnaden av depån i Högdalen. Resultaten i publikationen, som bl.a. är baserade på statiska och kinetiska laboratorietester, visar på att bergmassor med en totalsvavelhalt upp till 5 000 mg/kg inte kräver någon vidare undersökning eller särskild hantering. Initiala resultat från Förbifart Stockholm tyder även de på att bergmassor med liknande svavelinnehåll inte ger upphov till negativa miljökonsekvenser i form av sura och metallrika lakvatten (personlig kommunikation Tomas Holmström[1]). Inom ramen för denna vägledning förespråkas dock ett konservativt förhållningssätt till svavelinnehåll i berg och för bergmaterial med totalhalter av svavel överskridande 1 000 mg/kg behöver ytterligare kemiska analyser utföras för att kunna klassificera materialet som syra- eller icke-syraproducerande (SFS 2013:319). Skälet till att denna försiktighetsprincip tillämpas baseras dels på det i dagsläget relativt begränsade kunskapsunderlaget avseende sulfidbergsproblematik inom storstadsregionen, men även på att angivna råd och instruktioner i vägledningen skall kunna appliceras och efterföljas inom alla typer av exploateringsprojekt inom hela Stockholm stad oberoende av geologiska särdrag. I takt med att ny information och fördjupad förståelse erhålls kan vägledningen komma att uppdateras.

Denna vägledning utgår från en allmän generalisering att allt svavel förekommer som sulfid. Vägledningen tar inte ställning till att bedöma risk för miljöpåverkan av sulfidförande berg med avseende på mängd och/eller bergmaterialets fraktionsstorlek vid eventuell återanvändning under genomförandeskedet. Anledningen till detta är att fokus i föreliggande vägledning är klassificering av sulfidförande berg i tidiga skeden av exploateringsprojekt. Dessutom behöver mera kunskap och erfarenheter, från bl.a. pågående forskningsprojekt, erhållas för att på ett vetenskapligt och säkerställt sätt kunna fastställa hur

[1] Tomas Holmström, Trafikverket, personlig kommunikation 2021-09-01

sulfidförande bergmassor i olika fraktionsstorlekar kan återanvändas under genomförandeskedet utan betydande miljöpåverkan.

Sulfider och relaterade miljöproblem

Oavsett om sulfider förekommer i jord eller berg kan de ge upphov till olika typer av miljö- och byggnadstekniska problem vid vissa platsspecifika förutsättningar. Sulfidförande berg kan förorsaka problem när berget losshålles, bearbetas och exponeras för syre. Generellt sett ökar risken för miljöpåverkan ju mindre det sulfidförande bergmaterialets kornstorleksfraktion är. Teoretiskt sett kan således en mindre volym finkrossat sulfidförande bergmaterial under syrerika förhållanden ge upphov till mera omfattande negativa konsekvenser än en större volym sulfidförande block/skut. I praktiken behöver dock bedömning av risker och miljöpåverkan alltid utvärderas platsspecifikt.

Problematiken kopplad till sulfidförande bergmassor har historiskt sett varit relaterad till gruvindustrin och mera sällan till exploaterings- och anläggningsprojekt i stadsmiljö. Inom bygg- och infrastruktursektorn är erfarenheten i dagsläget inte lika stor för sulfid i berg jämfört med sulfid i jord. Problematiken förknippad med sulfider är dock väl undersökt och beskriven i den vetenskapliga litteraturen för både berg och jord. Tillämpad analys- och klassificeringsmetodik har framtagits under det senaste årtiondet för framförallt sulfidjordar (Pousette 2010, Creeper et al. 2012, Sullivan et al. 2018).

I nedanstående kapitel ges en kortfattad och översiktlig beskrivning av sulfider i berg och jord samt de miljö- och byggnadstekniska problem som kan relateras till sulfidoxidation.

Sulfidförande berg

Svavel kan ingå i olika typer av kemiska föreningar i berggrunden, såsom sulfat (SO_4^{2-}) eller sulfid (S^{2-}). Gips ($CaSO_4*2H_2O$) är ett typexempel på mineral där svavel förekommer som sulfat. Pyrit, även kallat svavelkis, (FeS_2) är ett vanligt exempel på sulfidmineral. I svensk berggrund påträffas svavel generellt som sulfidmineral, som är en förening mellan svavel och en eller flera metaller. De vanligaste förekommande sulfidmineralen är järnsulfiderna pyrit och magnetkis (FeS), som

bl.a. kan förekomma i omvandlade sedimentära bergarter och i sprickzoner i kristallint berg. Övriga exempel på några mindre vanliga sulfidmineral är blyglans (PbS), kopparkis ($CuFeS_2$), molybdenglans (MoS_2), zinkblände (ZnS) och arsenikkis (FeAsS). Sulfidmineral förekommer generellt i små kvantiteter i flertalet olika bergarter. Då det sulfidförande bergmaterialet kommer i kontakt med luftens syre påbörjas sulfidoxidationen. Detta kan ske exempelvis vid losshållning av berg inför bostadsexploatering, väg- och tunnelbyggen eller övriga anläggningsändamål då den intakta bergmassan friläggs, vilket möjliggör kontakt med syre. Oxidation av sulfidmineral sker förenklat enligt följande reaktioner (Lottermoser 2010).

Magnetkis:

$$4FeS_{(s)} + 9O_{2\,(g)} + 10H_20_{(l)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3\,(s)} + 8H^+_{(aq)} + 4SO_4^{2-}{}_{(aq)} \qquad \text{(ekv. 1)}$$

Pyrit

$$FeS_{2\,(s)} + 15/4O_{2\,(g)} + 7/2H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{3\,(s)} + 4H^+_{(aq)} + 2SO_4^{2-}{}_{(aq)} \qquad \text{(ekv. 2)}$$

Som framgår av reaktionerna ger oxidationen av järnsulfiderna, magnetkis och pyrit, upphov till både utfälld järnhydroxid ($Fe((OH)_3$ = rost), syra (H^+) och sulfat (SO_4^{2-}). Vid oxidation av magnetkis uppkommer syran då det oxiderade järnet, i kontakt med vatten, bildar järnhydroxid. Vid fullständig oxidation av pyrit härstammar syran från både svavel- och järnoxidationen. I båda fallen kan dock den teoretiska syraproduktionen beskrivas i form av att varje mol svavel bildar 2 mol syra (Lottermoser 2010). Syran sänker pH och ger upphov till vittring av intilliggande mineral. Vittringen ger i sin tur upphov till upplösning och frigörelse av metaller som tidigare varit bundna i mineralen.

Berggrundsgeologi

Berggrunden inom Stockholms stad, nedan nämnt som ”området”, domineras av metasedimentära[2] bergarter, vilka även kan benämnas som sedimentgnejser eller ådergnejser. Dessa har ursprungligen avsatts som leriga och sandiga sediment och sedan omvandlats till kristallina bergarter genom förhöjda tryck- och temperaturförhållanden. Gnejserna utgörs huvudsakligen av omväxlande glimmerrika (metaargillit) och kvarts-fältspatrika led (metagråvackor). Gnejsernas omvandling kan även vara ställvis så hög att partiell uppsmältning har skett. Det kan därför ibland vara

[2] Meta-, prefix som används i geologin för att beskriva olika typer av metamorfos eller metamorfa processer, det vill säga bergarters omvandlingsprocess genom förhöjda tryck- och temperaturförhållanden.

svårt att urskilja dessa från vanligen förekommande äldre djupbergarter[3], vilka har intruderat ovan nämnda ytbergarter. På geologiska kartor över området benämns dessa som metagranitoider eller gnejsgraniter. Metagranitoiderna har en granitisk till granodioritisk mineralsammansättning där kvarts är det dominerande mineralet, även mineralen fältspat och glimmer ingår i olika proportioner. Mafiska bergarter (kvartshalt <55 %), förekommer underordnat som relativt små bergartskroppar eller som linser, band och gångar. I områdets norra delar uppträder även en yngre intrusivbergart av granitisk sammansättning. Denna förekommer generellt som två typer av granit; jämnkornig, fin till medelkornig s k Stockholmsgranit samt medelkornig, småporfyrisk granit. Med dessa graniter associeras även gångbergarterna pegmatit och aplit. Områdets yngsta bergarter utgörs av diabas. Diabaserna skär igenom ovan nämnda bergarter som vertikala gångar vilka vanligen är upp till ett par meter breda, men kan bli upp till 50 meter breda. (Persson et al. 2001, SGU 2015, 2018A).

Sulfidmineral förekommer i de flesta bergarter inom området och halterna varierar beroende på de processer som varit verksamma. Framförallt uppträder sulfider i sedimentgnejser (SGU 2015). Även magmatiska djupbergarter kan innehålla sulfider, där de vanligen är mer associerade till de mafiska bergartsleden. Förekomsten av de sulfidmineraliseringar som återfinns i gnejser av sedimentärt ursprung har troligen bildats genom anrikning av olika svavelföreningar i de ursprungliga sedimenten som senare blev kvar under den bergartsbildande processen. I sedimentgnejser påträffas sulfider vanligtvis fint fördelade i grundmassan. Sulfidmineral kan även förekomma i sprickor, alternativt som ingående mineral i pegmatiter och apliter, där de bildats genom utfällning ur varma lösningar. Halterna av sulfider i berggrunden är generellt högre i södra delarna av området, än i de centrala och norra delarna (Persson et al. 2001, SGU 2015).

Sulfidförande jordar

Sulfidjordar är ursprungligen naturligt avsatta sediment innehållande järnsulfider i form av monosulfid (FeS) och/eller pyrit (FeS_2). Jordarna är finkorniga och utgörs ofta av lera och/eller silt vanligtvis med ett svavelinnehåll på 0,1–2 %. Sulfidjordarnas utbredning i Norden är koncentrerad längs Sveriges och Finlands kustområden. Även Danmark har

[3] Djupbergarter kan även tillsammans med gångbergarter kallas intrusiva bergarter och bildas genom att magma tränger upp och in i (intruderar) jordskorpan där den sedan stelnar.

betydande förekomst av sulfidjordar (Beucher et al. 2017); där benämns de vanligen som ”ockerjordar”. I Sverige förekommer dessa jordar framförallt kring Norrlandskusten och i flertalet områden runt Mälaren (SGU 2019). Likt sulfidförande berg uppstår problem då sulfiderna i jorden kommer i kontakt med luftens syre. Detta sker i samband med torrläggning av sulfidjord genom dikning då marken används för odlingsändamål eller i byggprojekt där sulfidförande jordmassor grävs upp och syresätts. Syresättningen eller oxidationen av järnsulfiderna följer samma förenklade principer som framgår i ekvationerna 1–2. Efter att sulfidjorden har syresatts och pH sjunkit med mer än 0,5 enheter till pH under 4 så klassas jorden som en sur sulfatjord. Denna oxidationsprocess leder således till att markens pH sänks och metaller mobiliseras (SGU 2006, 2019). I samband med kraftiga högvattenflöden under bl.a. höst och vår spolas det sura och metallrika lakvattnet ut i närliggande vattensamlingar.

Miljöproblematik relaterad till sulfider

Som ovan beskrivits ger oxidation av järnsulfider upphov till frigörelse av syra och mobilisering av metaller. I samband med kraftiga högvattenflöden kan därav ansenliga mängder surt och metallrikt vatten transporteras ut och påverka vattenkvaliteten i närliggande vattendrag. Påslaget av surt- och metallrikt lakvatten från sulfidförande material kan ge upphov till negativa effekter på vattenlevande växter och organismer; i värsta fall utarmning av känsliga arter. I Finland har exempelvis återkommande fiskdöd dokumenterats i vattendrag som är påverkade av sulfatjordar.

Oberoende om sulfider förekommer i berg eller jord kan de ge upphov till signifikanta miljökonsekvenser då de utsätts för luftens syre. Den största skillnaden mellan oxidation av sulfidförande lerjordar och bergmaterial är den tillgängliga specifika ytan av sulfidmineralen som ofta är betydligt större i lerjordar än i berg. Lerpartiklarna är mindre än 0,002 mm jämfört med sprängt berg i form av bl.a. skut (>800 mm) och bergblock (>200 mm). Sulfidoxidationen kan få betydligt större konsekvenser i sulfidjordar i förhållande till sulfidförande skut och/eller block eftersom den exponerade specifika ytan är betydligt större. Generellt brukar skut och/eller block genomgå bearbetning, genom exempelvis krossning, för att sedan kunna återanvändas vidare inom entreprenaden för anläggningsändamål. Då sulfidförande bergmassor genomgår krossning till mindre fraktioner/kornstorlekar ökar således den specifika ytan som kan utsättas för oxidation. Återanvänds sådant krossmaterial inom områden där förutsättningarna för oxidation är gynnsamma kan

detta ge upphov till negativa konsekvenser utifrån ett miljö- och byggnadstekniskt perspektiv.

Sulfidförande krossmaterial som används för anläggningsändamål kan ge upphov till korrosionsangrepp på byggnadsmaterial av metall och stockning av dräneringsrör. I Irland har även sulfid-förande (pyrit) krossmaterial, som har använts för grundläggningsändamål, gett upphov till sprickbildning i uppskattningsvis tiotusentals byggnader (Pyrite Panel 2012). Det har i efterhand kunnat påvisas att den frigjorda sulfaten från pyritoxidationen (i enlighet med ekv. 2) reagerade med betongplattan och bildade sekundära mineral i form av gips vilket ledde till markskjutning och sprickbildning.

Bergschakt och -krossning är inget nytt fenomen och det har pågått sedan långt tillbaka i tiden i Sverige. Baserat på tillgänglig litteratur och kännedom förekommer ett fåtal dokumenterade och kända fall där allvarliga miljöproblem har uppstått till följd av oxidation av sulfidförande krossmaterial. Problematiken i Stockholmsområdet aktualiserades i samband med att miljökonsekvenser relaterade till sulfidförande berg uppmärksammades vid verksamhetsområdet i Albyberg, Haninge kommun. Inför anläggandet av verksamhetsområdet plansprängdes signifikanta volymer sulfidförande berg som vidare bearbetades genom krossning. De krossade massorna användes som fyllnadsmaterial inom området. I samband med anläggningsarbetet förflyttades och torrlades även stora mängder sulfidförande jord inom området. Den kombinerade oxidations-effekten av sulfidförande bergkross och jord gav upphov till urlakning av surt och metallrikt vatten med negativa konsekvenser på nedströms ytvattenrecipient. Det är således av vikt att dagens sulfidproblematik kopplad till anläggningsarbeten noggrant utreds.

Undersökningsmetodik

Nedan redogörs för en stegvis undersöknings- och provtagningsmetodik för sulfidförande berg. I Figur 3 och Figur 4 (se *Klassificering*) sammanfattas metodiken i flödesscheman som på ett enkelt sätt visar hur undersöknings- och provtagningsförfarandet är strukturerat och utformat samt hur resultaten bör utvärderas. Det huvudsakliga syftet med ett stegvist undersöknings- och provtagningsförfarande är att på ett metodiskt sätt klarlägga förekomsten av eventuellt sulfidförande berg.

Strategin syftar även till att översiktligt åskådliggöra hur sulfidförande bergmassor bör hanteras på ett logistiskt och miljömässigt hållbart sätt. Metodiken är anpassningsbar till alla typer av exploaterings- och anläggningsprojekt oberoende av storlek, dock bör det poängteras att riskvärderingen som belyser potentiella miljökonsekvenser alltid är plats- och projektspecifik.

Steg 1 – Bakgrundsmaterial

Initialt inhämtas relevant information för aktuellt område. Informationen kan utgöras av kartmaterial från SGU:s (Sveriges Geologiska Undersökning) databas, tidigare utförda miljötekniska, geotekniska, geologiska och/eller geohydrologiska undersökningar (Geoarkivet, Stockholms stad) och geologiskt/geokemiskt material i form av bergstuffer, borrkärnor, data i form av analysresultat eller tunnslip. Den insamlade informationen bearbetas och används primärt som ett verktyg för att erhålla indikationer om eventuell sulfidförekomst. Berggrundsgeologiska kartor från SGU:s databas kan, förutom bergart- och mineralsammansättning, även ge information om potentiella sulfidförekomster genom att tidigare gruvor, mineraliseringar och stenbrott kan vara angivna på kartorna. I vissa fall kan även enskilda sulfidmineral vara angivna. Övrig viktig information som kan erhållas från de berggrundsgeologiska kartorna är t.ex. förekomst av neutraliserande mineral (karbonater) och mafiska mineral samt om terminologi såsom ”rostig”, ”starkt vittrad”, ”gnejsig”, ”ådergnejs”, ”metagråvacka” ingår i beskrivningen. Vetskap om bergartens mineralogiska sammansättning och nyckelord som *rostiga bergarter med högt innehåll av mafiska mineral* kan vara en indikation på sulfidförekomst. Från SGU:s databas kan även erhållas kartmaterial avseende biogeokemiska mönster samt flygmagnetiska kartor (FeS delvis magnetiskt) som vid tillämpning med ovannämnda data kan ge ytterligare värdefull information avseende eventuell sulfidförekomst. Denna typ av lättillgänglig data som utgör viktigt underlag bör tas med till planeringsskedet av Steg 2. Baserat på resultaten i Steg 1 erhålls en initial översiktlig bedömning av risken för att bergmaterialet innehåller sulfider. Oavsett utfallet av Steg 1 bör Steg 2 utföras i syfte att erhålla platsspecifik information om objektet.

Steg 2 – Översiktlig kartering och provtagning

Innan karteringen tar vid bör platsbesök utföras i syfte att erhålla en uppfattning om undersökningsområdet samt säkerställa att insamlad bakgrundsinformation överensstämmer med rådande

förhållanden. I samband med platsbesöket delas, om nödvändigt, undersökningsområdet in i lämpliga delområden för att dels underlätta arbetet kopplat till kartering, provtagning och eventuell borrundersökning, men även för att vid behov kunna hantera potentiellt sulfidförande berg i samband med bergschakt vid genomförandeskedet. Indelningen i delområden görs utifrån platsspecifika förutsättningar och storleken på delområdena kan komma att variera beroende av topografiska skillnader, utbredningen av blottlagda berghällar, geologiska avvikelser, volymen berg som skall losshållas m.m. Delområdesindelningen kan baseras på bergschaktplan alternativt på utformningen av planerade bostadsområden inom ramen av detaljplanen. Förekommer distinkta gränser mellan två olika bergartstyper inom undersökningsområdet bör dessa även separeras som två olika delområden. Förekomsten av blottlagda berghällar inom undersökningsområdet kan i vissa fall vara begränsad eller till och med obefintlig. I sådana fall kan representativa delområden friläggas genom markavtäckning, dock med anpassning efter projektets förutsättningar. Markavtäckning utförs i de delar av undersökningsområdet där berg förekommer närmast markytan. Är markavtäckning inte ekonomiskt rimligt att utföra till följd av projektets förutsättningar kan representativt provmaterial i form av borrkax uttas i samband med jord-bergsondering (se vidare Steg 3 och Steg 4) inom projekteringsskedet. Information om bergdjup erhålls från geotekniska undersökningar (jord-bergsondering) som generellt utförs under projekteringsskedet inom detaljplanefasen.

Översiktlig kartering av bergöverytan utförs lämpligen av geolog eller någon med motsvarande kompetens. Karteringen utförs i syfte att erhålla grundläggande information om ytligt förekommande bergarter och dess mineralsammansättning. Det bör dock påpekas att geologin kan variera inom ett område och att bergarter som förekommer i underordnad omfattning inte alltid är redovisade på det geologiska kartbladet. Geologin kan även variera med djupet. I samband med karteringen görs lämpligen även en inventering av förekommande bergsskärningar inom undersökningsområdet. Kartering av bergsskärningar kan ge viktig information om förekommande bergarter i djupare delar av berggrunden, som är betydelsefull om bergschakt skall utföras till större djup. I samband med karteringen uttas prover (bergstuffer) av bergöverytan i olika delar av respektive delområde i syfte att erhålla representativt provmaterial. I detta sammanhang är det viktigt att påpeka att uttagna prover ska representera samma bergart. I föreliggande vägledning görs en generell bedömning att

bergartsfördelningen, och därmed även mineralsammansättningen i de översta 2 meterna av berg inte på ett avgörande sätt avviker från den som återfinns i bergöverytan.

Provtagning av potentiellt sulfidförande berg bör utföras på ett representativt sätt och anpassas efter storleken på undersökningsområdet/delområdena samt efter platsspecifika förutsättningar. Nedan beskrivs en vedertagen provtagningsmetodik som används inom gruvindustrin och som även anses lämplig att använda vid provtagning av potentiellt sulfidförande berg inom exploateringsområden. Metodiken är utformad av Svenska Institutet för Standarder, SIS (2013).

De bergstuffer som provtas, testas och genomgår kemisk analys bör vara representativa för eventuellt sulfidförande berg som kan förekomma inom undersökningsområdet. SIS rekommenderar att antalet prover som bör uttas för att genomföra en karakterisering av materialet räknas fram utifrån följande ekvation:

$$N = 0{,}026 * M^{0,5}$$

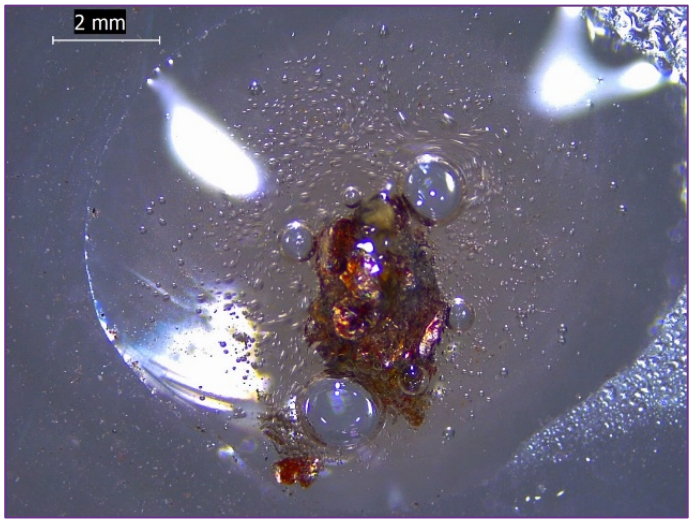
N utgör det minsta antalet prover som bör provtas vid en viss materialmängd, M (ton), berg som planeras losshållas. Denna rekommendation gäller för potentiellt sulfidförande berggrund där man sedan tidigare har begränsad kunskap om berggrundsgeokemin. N utgör ett samlingsprov av bergstuffer á ca 5 kg som i sig bör bestå av 15–30 delprover per samlingsprov. Om den projekterade mängden losshållet berg inom projektet kommer att utgöra 100 000 ton så bör sammanlagt 8 stycken samlingsprover bestående av 15–30 delprover uttas (SIS 2013). Finns ingen bergschaktplan framtagen inom projektet så rekommenderas att en grov uppskattning av den planerade mängden losshållet berg utförs.

De uttagna samlingsproverna klyvs med geologhammare eller motsvarande verktyg och mineralidentifiering utförs okulärt med lupp på den kluvna, ovittrade ytan. Vid misstanke om sulfidförekomst kan oxidationsmedel (väteperoxid) användas för att ge ytterligare indikation på sulfidförekomst. Väteperoxid appliceras på det misstänkta sulfidmineralet och vid kraftig reaktion kan detta utgöra indikation på sulfidförekomst. Det bör påpekas att oxidationsmedlet endast bör ses som ett hjälpmedel och ska inte ensamt användas som verktyg för identifiering av sulfidförekomst. För att påvisa om bergmaterialet innehåller pH-höjande karbonatmineral kan saltsyra (HCl) användas. Saltsyran

droppas på provmaterialet och om det fräser och bubblar så är detta en bekräftelse på att materialet innehåller karbonatmineral.

Vid eventuella oklarheter avseende sulfidförekomst kan mikroskopering med hjälp av stereomikroskop/stereolupp utföras på utvalda bergstuffer. Syftet med stereomikroskopering är att verifiera resultaten från karteringen och således säkerställa förekomst av eventuella sulfidmineral samt enklare bestämma sulfidmineralet. Stereomikroskopering kan utföras på bergstuffer, krossade och/eller malda prover (Figur 1, Figur 2).

Figur 1. *Rostbeläggning på kvarts-glimmer-fragment.*



Figur 2. *Kraftig reaktion mellan väteperoxid och pyrit-inneslutningar.*

Genom stereomikroskopering kan mineralens karakteristiska egenskaper (ex. form och färg) tydligare urskiljas i förhållande till konventionell okulär bedömning med lupp. Fördelen att arbeta med stereomikroskop är framförallt att provberedningen är betydligt enklare än vid konventionell mikroskopering där tunnslipsprepareringen både är tidskrävande och kostsam. Det kan dessutom vara problematiskt att erhålla tunnslipsprover som är representativa. Genom stereomikroskopering kan provberedda bergstuffer, som genomgått krossning, enkelt undersökas. Vid behov kan hela eller olika delar av den uttagna bergstuffen undersökas i stereomikroskop.

Om Steg 1 eller Steg 2 visar på risk för sulfidförekomst och bergschakt ska utföras ned till maximalt 2 meter under bergöverytan går man vidare till Steg 4. Om varken Steg 1 eller Steg 2 i detta fall visar på risk för sulfidförekomst krävs inga vidare undersökningar. Planeras djupare bergschakt (>2 m under bergöveryta) inom undersökningsområdet går man direkt vidare till Steg 3 oavsett utfallet från Steg 1 och Steg 2.

Steg 3 – Borrundersökning

Vid borrundersökningen går man vidare med områden där det planeras för bergschakt djupare än 2 meter under bergytan.

För att erhålla representativa prover av bergmaterialet bör borrning utföras till det tänkta sprängdjupet och samlingsprover uttas förslagsvis för varje meter. Metervis uttagning av borrkaxprover utförs främst i syfte att kunna särskilja och vid genomförandeskedet separat hantera bergmaterial med potentiellt högt svavelinnehåll. Med borrning avses i föreliggande fall jord-bergsondering (Jb-sondering) alternativt kärnborrning. Jb-sondering förespråkas som borrmetod eftersom den är ett bättre alternativ med avseende på tids- och kostnadseffektivitet. Vid Jb-sondering drivs en borrkrona ned i berget med hjälp av slagenergi, rotation och tryckbelastning. Vid neddrivning av borrkronan bildas s.k. borrkax, som representerar ett finmalet bergmaterial från hela borrdjupet. Generellt används vatten eller luft för att spola/trycka upp borrkaxet från borrhålet upp till ytan. Borrkaxet som erhålls från respektive borrhål utgör således ett representativt samlingsprov av det undersökta bergmaterialet.

Med kärnborrning, som är ett mera kostsamt alternativ, borras provkärnor ut ur berget. Dessa kärnor kan enkelt karteras och specifika delar av kärnorna, som representerar olika djup i borrhålet, kan uttas för kemisk analys. Genom kärnborrning

erhålls detaljerad information genom okulär bedömning av bl.a. den mineralogiska sammansättningen och eventuellt sulfidinnehåll av provmaterialet.

Beroende av projektets förutsättningar utförs kemiska analyser på borrkax och/eller borrkärnor.

Steg 4 – Analysmetodik och utvärdering

Steg 4 innefattar provberedning och kemisk analys. Representativa prover av bergmaterialet från det undersökta objektet skickas till laboratorium för provberedning och kemisk analys med avseende på totalhalter av svavel och vid behov ABA- (acid base accounting – syra-basräkning) och NAGpH-test (net acid generation). Med totalhalter avses i detta sammanhang att provmaterialet uppsluts med HNO_3, HCl och HF. Bergstufferna provbereds genom krossning, malning och spaltneddelning. Spaltneddelning utförs i huvudsak för att erhålla ett representativt provmaterial för kemisk analys. Ledtider avseende provberedning och kemisk analys kan variera mellan olika laboratorier. Provberedning av bergstuffer brukar generellt kunna utföras inom loppet av 2–4 arbetsdagar. Tiden är beroende av provantal samt provmaterialets egenskaper. Krossning, malning och spaltneddelning av bergstuffer är mera tidskrävande jämfört med spaltneddelning av borrkax. Resultat från analys av totalhalt svavel kan erhållas inom 1–10 arbetsdagar. Ledtiden för ABA- och NAGpH-test brukar uppgå till 10–20 arbetsdagar. Initiala analysresultat från modifierat inkubationsförsök, som kan användas som ett alternativ till NAGpH-test, kan erhållas efter 3–4 veckor.

Totalhalt svavel

Syftet med analys av totalhalt svavel är framförallt att verifiera resultaten från Steg 2 samt att erhålla ny information avseende svavelinnehållet i materialet från borrundersökningen. I detta sammanhang bör det uppmärksammas att utvärderingen av svavelhalten baseras på antagandet att allt svavel förekommer som sulfid i bergmaterialet. Beroende av projektets förutsättningar och platsspecifika förhållanden kan antingen medel-, median- eller maxvärde användas som representativ halt för att utvärdera bergmaterialets svavelinnehåll. Ett skattat medelvärde i form av UCLM95 kan även användas för att på ett statistiskt säkerställt sätt (95 % konfidensgräns) beräkna medelhalten svavel i materialet. Valet av representativ halt är beroende av bl.a. losshållen mängd berg, analysantal, bergets homogenitet, närhet till skyddsvärda eller känsliga områden m.m. och således kan

utvärderingen med avseende på svavelhalt komma att förändras från projekt till projekt. Nedan ges några exempel på hur utvärdering av bergmaterialets svavelinnehåll kan göras.

Ett mera konservativt angreppssätt med maxhalt och/eller UCLM95 är att föredra då man har för avsikt att återanvända bergmaterialet på plats och där projektområdet angränsar till skyddsvärda områden (bl.a. Natura 2000, naturreservat och vattenskyddsområden). I ett sådant typfall används maxhalt alternativt UCLM95 för att inte underskatta eventuella risker. UCLM95 kan användas om dataunderlaget i form av analysantal är större än 10 per delområde och representerar samma djupintervall, i övriga fall används maxhalt.

I större projektområden, som inte är belägna i direkt närhet till skyddsvärda eller känsliga områden, och där mindre bergvolymer skall losshållas (mindre än ca 10 000 m^3) och återanvändas på plats kan median- eller medelhalt användas för att redogöra för bergmaterialets svavelinnehåll per delområde. Förslagsvis kan både median- och medelhalt beräknas för dataunderlaget. Det högre erhållna värdet kan användas som representativ halt vid resultatutvärderingen; detta för att inte underskatta eventuella risker. Median- eller medelhalt förespråkas även att användas som representativ halt då bergmaterialets svavelhalt uppvisar begränsad variation (<1 tiopotens) inom delområdena. Valet av representativ halt bör vara ett gemensamt beslut som tas i samråd mellan beställare och konsult.

ABA-test

I Sverige utförs ABA-test sedan år 2011 enligt Europastandarden (EN 15875:2011) som gäller som svensk standard (SS-EN 15875:2011). ABA-test är ett statiskt test som används till att bestämma ett materials kapacitet att producera och neutralisera syra. ABA-resultaten, som uttrycks i $CaCO_3$/ton, redogör inte för när eventuell syraproduktion kan komma att påbörjas och hur länge den fortgår. Vissa sulfidhaltiga mineral (t.ex. pyrit och magnetkis) räknas som syraproducerande och framförallt karbonater räknas till de föreningar som neutraliserar syra. Teoretiskt sett kommer ett prov vid någon tidpunkt att generera syra endast om den syraproducerande kapaciteten överstiger den syraneutraliserande. Materialets neutraliserande potential (NP) kan bestämmas genom titrering och dess syrabildande potential (AP) fastställs genom en totalsvavelanalys med antagandet att allt svavel förekommer som sulfid och att surhetsgraden härrör från fullständig oxidation av sulfiden i materialet.

ABA-test utförs på ett representativt provmaterial för delområdet. Resultaten från föreliggande test avspeglar potentialen för ett malt bergmaterial (<75 µm) att producera och neutralisera syra i enlighet med de förenklade reaktionerna nedan:

Pyrit (AP): $FeS_2 + 3{,}75O_2 + 3{,}5H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$ (ekv. 3)

Kalcit (NP): $CaCO_3 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + H_2CO_3$ pH <6,3 (ekv. 4)

Kalcit (NP): $CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$ pH >6,3 (ekv. 5)

Ovanstående ekvationer (3–5) visar på att 1 mol svavel ger upphov till 2 mol syra (H^+) och för att buffra vätejonerna krävs i teorin 1 mol kalcit vid pH <6,3 (ekv. 4) och dubbelt så mycket kalcit krävs för att buffra samma mängd H^+ vid pH >6,3 (ekv. 5). Kalciten löser sig generellt sämre när pH stiger och vid pH 8,3 avstannar upplösningen. En av de mest kritiska parametrarna vad gäller kalcitens effektivitet är dess kornstorlek. Är kornstorleken större än 1 mm avtar buffertförmågan avsevärt på grund av sämre upplösning. I denna kontext är det viktigt att påpeka att även andra buffringsprocesser kan förhindra syraproduktion. När väl all kalcit har förbrukats kan syra fortsättningsvis buffras genom exempelvis upplösning av aluminium- och magnesium-silikatmineral. I det statiska ABA-testet återspeglas dock materialets buffertkapacitet utifrån kalcitinnehållet, inte silikaternas långsiktiga buffertförmåga. Upplösningen av silikater är en mycket långsam process i förhållande till kalcitupplösning. Dessa reaktioner buffrar dock pH i ett lägre pH-intervall.
För mera information kring ABA-test hänvisas läsaren till Lindgren (2020) och Lottermoser (2010).

NAGpH-test

NAGpH-test (single addition), är likt ABA-test, ett statiskt test som utförs av kommersiella laboratorier och används framförallt inom gruvbranschen för att bedöma och klassificera potentialen för provmaterial att producera syra (Amira 2002, Stewart et al. 2003, 2006; Olds et al. 2015, GARDguide 2020). Metoden går i sin helhet ut på att vid ett tillfälle tillsätta 250 ml av oxidationsmedlet väteperoxid (15 % H_2O_2) till 2,5 g provmaterial (<75 µm) för att påskynda oxidationen av eventuella ingående sulfidmineral. I detta sammanhang bör det påpekas att NAGpH-test ska utföras på samma representativa provmaterial som använts för ABA-test. Både syraproducerande och syraneutraliserande reaktioner sker samtidigt och pH-värdet i lösningen återspeglar ett direkt mått på mängden producerad syra.

Det snabba oxidationsförloppet till följd av väteperoxidtillsatts återspeglar dock inte naturliga förhållanden. Detta kan medföra viss underskattning av lakvattnets pH i och med den påskyndade oxidationsprocessen samt att sekundära buffringsreaktioner med hjälp av silikatmineral inte hinner ta vid. Dylika begränsningar ligger dock i linje med ett konservativt förhållningssätt avseende miljöriskbedömning där man är noga med att hellre överskatta än underskatta eventuella risker. Ett uppmätt NAGpH-värde under 4,5 indikerar att provet är syraproducerande.

I de fall provmaterial med låg buffringskapacitet innehar sulfidkoncentrationer över 1–1,5 % och NAGpH-testet uppvisar pH >4,5 rekommenderas att upprepade NAGpH-test (s.k. sekventiella NAGpH-test) alternativt modifierade inkubationsförsök utförs i syfte att säkerställa att fullständig sulfidoxidation av materialet sker (Stewart et al. 2003, 2006; GARDguide 2020). NAGpH-test är heller inte lämpade för material med både hög TOC-halt (>5 %) och svavel-koncentrationer under 5 000 mg/kg (Stewart et al. 2003, 2006). Detta då reaktionen mellan oxidationsmedlet och TOC i materialet kan ge upphov till lågt pH till följd av produktion av organiska syror. För mera information kring NAGpH-test hänvisas läsaren till Amira (2002), GARDguide (2020) och Lindgren (2020).

Modifierat inkubationsförsök

Det ursprungliga inkubationsförsöket är en vetenskapligt erkänd screeningmetod för att klassificera sura sulfatjordar (Creeper et al. 2012). Det modifierade inkubationsförsöket är en metod framtagen för bergmaterial och bedöms kunna användas som ett alternativ till NAGpH-test. Det modifierade inkubationsförsöket är en kombination av ett förenklat fuktkammarförsök (se *Övrig analysmetodik*) och ett tillämpat NAGpH-test och redovisar materialets benägenhet att producera och neutralisera syra över tid. I dagsläget utförs inkubationsförsök inte av laboratorier, dock pågår samarbetsdiskussioner mellan bl.a. universitet och ackrediterat laboratorium i syfte att utveckla en kommersiell variant av det modifierade inkubationsförsöket.

I det modifierade inkubationsförsöket bör en storlekfraktion mindre än 4 mm användas. Cirka 50 gram av provmaterialet ska under försökets förlopp fuktas med destillerat vatten 2–3 gånger per vecka och tillsatts av 4 ml 30 % H_2O_2 utförs 1 gång per vecka. Mätning av pH utförs 2 dagar efter väteperoxiden har tillsatts. Provmaterialet skall oxideras under en tidsperiod på 4–16 veckor.

Tillsatts av oxidationsmedlet kan skynda på oxidationsprocessen så pass mycket att resultatutvärdering kan utföras redan efter 3–4 veckor. Försöket kan behöva pågå under en längre tidsperiod (>4 veckor) i de fall fullständig sulfidoxidation inte uppnås. Detta kan t.ex. inträffa om mobiliserade metaller från sulfidoxidationen bryter ned väteperoxiden och/eller om ingående sulfidmineral är inneslutna i andra mineral och den tillgängliga ytan av exponerade sulfidmineral i materialet är begränsad. De slutliga resultaten från det modifierade inkubationsförsöket (pH_{ink}) kan utvärderas efter att lakvattnets pH-värden har stabiliserats alternativt då pH-värdet <4,5. Ett uppmätt pH_{ink}-värde under 4,5 påvisar att provet är syraproducerande (Stewart et al. 2006, GARDguide 2020).

Inom ramen av denna vägledning förespråkas användningen av det kommersiella NAGpH-testet i och med att det modifierade inkubationsförsöket är under utveckling. Utvärderingsprincipen för respektive test är dock densamma, ett uppmätt NAGpH/pH_{ink}-värde mindre än 4,5 påvisar att provet är syraproducerande. I nedanstående kapitel behandlas endast utvärdering av NAGpH-testet för att undvika eventuell misstolkning samt underlätta utvärderingsförloppet för läsaren.

Övrig analysmetodik

Fuktkammarförsök är ett accelererat kinetiskt laboratorietest vars syfte är att återspegla naturliga geokemiska vittringsprocesser som uppkommer i samband med att sulfidförande material oxideras. Resultaten från dylika försök visar dels hur vittring och urlakning av metaller från materialet förändras med tiden, men även hur både upplösning av silikat- och karbonatmineral påverkar materialets totala buffertkapacitet. Nackdelen med sådana försök är främst tidsaspekten och kostnaden. Provmaterialet skall genomgå oxidation tills dess att stabila halter erhållits; detta pågår generellt under flertalet månader.

Analyser av totalhalter med uppslutning är av intresse för att erhålla en uppfattning om bl.a. mängden metaller som kan urlaka i samband med vittringsprocesserna av sulfidoxidation. Även analys av kalcium och järn är av intresse för att erhålla information om bergmaterialets mineralsammansättning. Då provmaterial skickas till laboratorium för totalhaltsanalys av svavel är det därför angeläget att välja ett analyspaket som inbegriper övriga grundämnen.

Skakförsök (EN 12457–3) kan vara av intresse att utföra inför eventuell transport av sulfidförande bergmassor till deponi för omhändertagande. I dagsläget finns ingen lagstiftning avseende deponering av sulfidförande bergmassor att tillgå. Mottagningskriterier kan därför variera och analysomfattning ska anpassas efter mottagningsanläggningens krav.

Utvärdering

Utvärdering av svavelhalten i det provtagna materialet, som baseras på antagandet att allt svavel förekommer som sulfid, görs enligt följande princip (SFS 2013:319):

Svavelhalt <1 000 mg/kg	bedöms som *icke-syraproducerande* (ISP), ingen vidare undersökning
Svavelhalt >1 000 mg/kg	bedöms som *potentiellt syraproducerande* (PSP), gå vidare med ABA-test

Utvärdering av resultat från ABA-test utförs i enlighet med NGI (2015) och SFS 2013:319. Syftet med ABA-testet är att bestämma materialets kapacitet att producera (AP) och neutralisera syra (NP). Utifrån fastställandet av dessa parametrar erhålls NP/AP som hädanefter i texten anges som NPR (Neutralization Potential Ratio). Utvärderingen av NPR görs enligt följande princip:

NPR större än 3	bergmaterialet bedöms som *icke-syraproducerande* (ISP), ingen vidare undersökning
NPR mellan 1 och 3	bergmaterialet bedöms som *potentiellt syraproducerande* (PSP), gå vidare med NAGpH-test
NPR mindre än 1	bergmaterialet bedöms med stor sannolikhet som *potentiellt syraproducerande* (PSP), gå vidare med NAGpH-test

För ovanstående utvärderingsprincip har säkerhetsmarginal med avseende på eventuell försurningsproblematik beaktats. Detta har gjorts genom användningen av en tre gånger högre neutralisationspotential i förhållande till syraproduktionspotentialen för klassificering av bergmassor för fri användning. Bergmaterial som således uppvisar NPR över 3 kan användas fritt inom projektområdet. För bergmaterial med NPR mellan 1 och 3 respektive NPR mindre än 1 bör resultaten från NAGpH-test utvärderas för att erhålla information om materialets syraproducerande potential. För material med NPR under 1 är

sannolikheten högre att det är syraproducerande jämfört med material med NPR mellan 1 och 3.

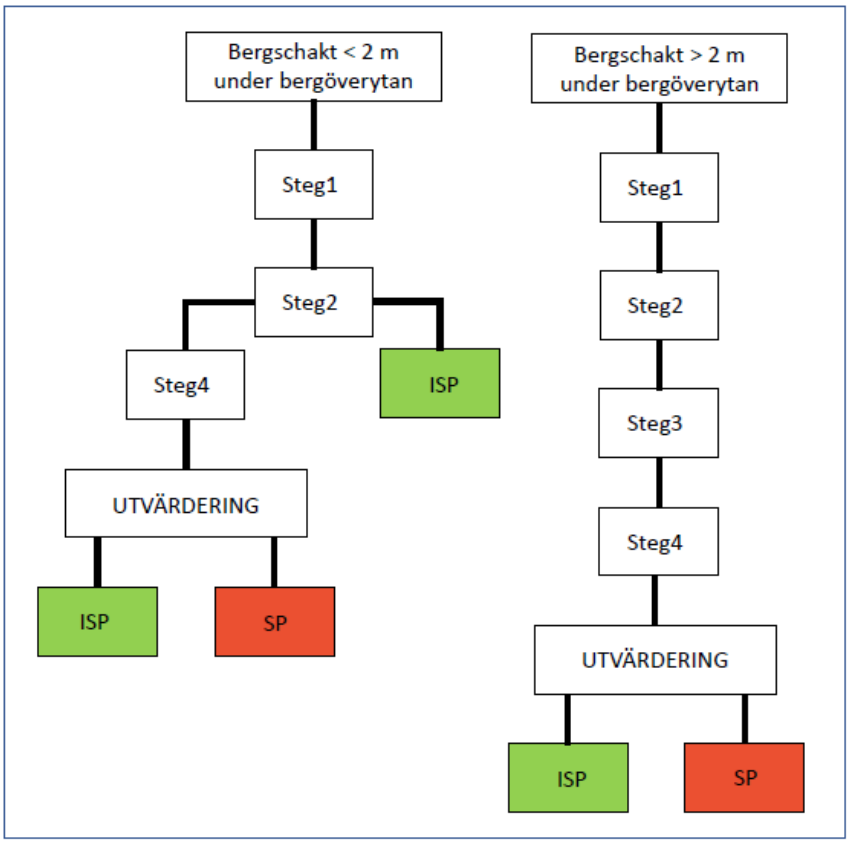
Utvärdering av pH-mätvärdet, som är baserat på Amira (2002), Stewart et al. (2003, 2006), och GARDguide (2020), utförs enligt följande princip inom ramen för NAGpH-testet:

NAGpH större än 4,5	bergmaterialet bedöms som *icke-syraproducerande* (ISP)
NAGpH mindre än 4,5	bergmaterialet bedöms som *syraproducerande* (SP)

Klassificering

Nedan sammanfattas det stegvisa undersöknings- och provtagningsförfarande avseende sulfidförande berg i ett översiktligt flödesschema (Figur 3). I Figur 4 beskrivs resultatutvärderingen av Steg 4 som redogör för klassificeringsmetodiken avseende sulfidförande berg.

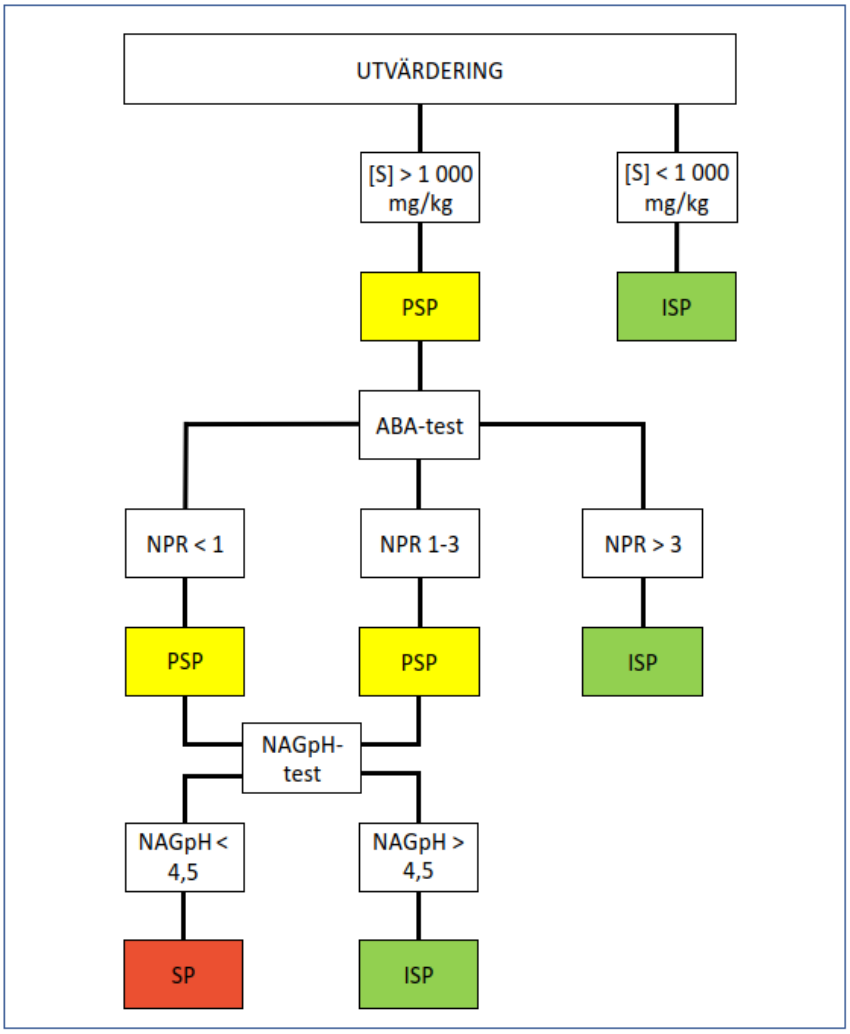
I de fall bergschakt planeras ned till maximalt 2 meter under bergöverytan och när Steg 1 visar på risk för eventuella sulfidförande bergarter och/eller Steg 2 påvisar förekomst av sulfidmineral utförs Steg 4 på uttaget provmaterial. Huruvida Steg 1 och Steg 2 i föreliggande fall inte visar på risk avseende sulfidförande bergarter krävs inga ytterligare utredningar eller åtgärder. Påvisas det i Steg 2 att berget har en heterogen sammansättning med signifikanta geologiska avvikelser kan det i vissa fall krävas kompletterande provtagning av djupare beläget bergmaterial innan friklassning.



***Figur 3**. Stegvis undersöknings- och provtagningsförfarande avseende potentiellt sulfidförande berg. Steg 1 avser genomgång av bakgrundsmaterial, Steg 2 avser översiktlig kartering och provtagning, Steg 3 avser borrundersökning och Steg 4 avser kemisk analys. ISP åsyftar icke-syraproducerande material och SP avser syraproducerande material. Utvärderingssteget beskrivs i Figur 4.*

Ska bergschakt utföras djupare än 2 meter under bergöverytan behöver provtagning utföras av material som representerar hela det planerade sprängda djupet och då utförs Steg 3 för dessa specifika delområden oavsett utfallet av Steg 1 respektive Steg 2.

Utvärderingen av resultaten erhållna från de kemiska analyserna (Steg 4) beskrivs nedan i Figur 4.



Figur 4*. Resultatutvärdering av Steg 4 som redogör för klassificeringen av sulfidförande berg. ISP avser icke-syraproducerande-, PSP avser potentiellt syraproducerande- och SP avser syraproducerande sulfidförande material. NPR avser NP/AP-kvot.*

Exakta gränsdragningar med avseende på resultatutvärderingen från Steg 4 kan i enstaka fall vara komplicerade. I dylika fall bör inte endast resultatutvärderingen från Steg 4 tillämpas utan en genomgående sammanvägning av resultaten från samtliga steg (Steg 1-Steg 4) förespråkas. Detta förfarande rekommenderas för att undvika felklassificering då resultatutvärderingen från Steg 4 visar på att haltgränserna knappt innehålls för ett ISP-material och resultaten från Steg 1 och Steg 2 tydligt indikerar förekomst av sulfidförande bergmaterial. I sådana specialfall kan det vara betydelsefullt att klassificera massor som syraproducerande framförallt om det är fråga om signifikanta volymer, massorna avses krossas innan återanvändning eller projektområdet är beläget i närheten av känsliga natur- och vattenmiljöer.

Resultatutvärderingen och materialklassificeringen förespråkas att utföras av geolog, miljögeokemist eller person med motsvarande kompetens.

Hantering och skyddsåtgärder

I detaljplaneskedet utförs klassificering av bergmassor som avses losshållas inom projektområdet. Om SP-material identifierats ska det i nästa skede, som avser genomförandeskedet och inbegriper förarbeten bl.a. i form av bergschakt, upprättas en hanteringsplan och ett kontrollprogram innan arbetena kan påbörjas. I planen skall det tydligt framgå hur hanteringen ska bedrivas inom olika delområden inom projektområdet. Aspekter som bör belysas i hanteringsplanen är bl.a. definierade volymer av SP- och ISP-material, särskiljning av SP- och ISP-material, sprängdjup, fraktioner som avses återanvändas, hantering och uppläggning av massorna inom området, eventuell mellanlagring och återanvändningsändamål. I kontrollprogrammet ska det redogöras för hur kontrollprovtagningar ska genomföras. Några av de mest centrala delarna av kontrollprogrammet är att redogöra för provtagning av grund- och ytvattensystem både före och efter att berget har utvunnits samt beskriva provtagning av losshållna bergmassor för att verifiera tidigare erhållna resultat och klassificering. Det huvudsakliga syftet med kontrollprogrammet och hanteringsplanen är att säkerställa att uppkomna bergmassor hanteras på ett logistiskt och miljömässigt hållbart sätt som inte medför negativ påverkan på människors hälsa eller miljö. Hanteringsplan och kontrollprogram ska godkännas av berörd tillsynsmyndighet innan arbetena kan påbörjas.

Nedan redogörs för generella riktlinjer som kan tillämpas vid hanteringen av konstaterat SP-bergmaterial.

Extern deponering av SP-material är inte ett rimligt alternativ utifrån ett miljö-, kostnads- och hållbarhetsperspektiv. För att inom projektområdet återanvända ett sådant material behöver skyddsåtgärder ha vidtagits. För att begränsa eller förhindra urlakning av metallrikt och surt vatten från SP-bergmaterial finns det olika lösningar att tillgå och olika sätt att hantera dessa (Fröberg och Höglund 2004, SGU 2018B). Den mest effektiva skyddsåtgärden är anpassning av sprängdjupet inom projektområdet så att de sulfidförande bergmassorna hålls intakta och således inte blottläggs. Detta medför att luftens syre inte kommer åt materialet och förhindrar därav

sulfidoxidationsprocessen och eventuell miljöpåverkan. Kan sprängdjupet inte anpassas och bergschakt behöver utföras i områden där materialet har klassificerats som SP bör en kombination av nedan angivna skyddsåtgärder vidtas.

- Losshållet bergmaterial bör hanteras snarast möjligast för att undvika eventuella negativa konsekvenser till följd av igångsättning av sulfidoxidationen.
- Undvik krossning och återanvändning av mindre kornstorleksfraktioner för att begränsa den specifika ytan som kan genomgå sulfidoxidation. Återanvänd större fraktioner, block eller större.
- Är bearbetning av losshållet berg nödvändigt bör detta utföras på masslogistikcentrum, krossar eller motsvarande. Sortering och selektiv hantering av SP-materialet utförs för att särskilja mellan storleksfraktioner med olika sulfidinnehåll och vid behov kan buffrande material tillsättas. Bergmassorna kan då återanvändas som exempelvis ballastmaterial.
- Jordtäckning med tätskikt för att begränsa bergmassornas kontakt med syre och regnvatten och således reducera eventuella negativa effekter med avseende på lakningsproblematik.
- Lägg inte upp massorna i närheten av ytvattenflöden, exempelvis diken, som kan transportera surt- och metallrikt lakvatten vidare till känsliga vattendrag och recipienter.
- Återanvänd massorna där kontakten med inläckande vatten är begränsad, t.ex. som utfyllnadsmassor under hårdgjorda ytor och/eller som ballastmaterial i vägkroppar.
- Tillsättande av buffrande material för att motverka uppkomsten av surt- och metallrikt lakvatten. Materialet kan utgöras av annat buffrande bergmaterial med olika upplösningshastighet, exempelvis aluminium- och magnesiumsilikatmineral (klorit och olivin) och finkornig (<1 mm) kalcitlösning.
- Täckning med tät lera, t.ex. bentonit, eller material med liknande egenskaper för att begränsa syretillgång och vatteninträngning.

För att minimera eventuell miljöpåverkan av SP-material bör det alltid eftersträvas att återanvändning sker i syrefattig, reducerande miljö. Återanvändning av massorna genom en kombination av ovannämnda förslag förespråkas. Valet av återanvändningsmetod eller kombinationen av metoder är avhängigt av de platsspecifika förutsättningarna för respektive projekt. Oberoende av hur SP-materialet återanvänds skall upplagsområdet eller platsen där massorna återanvänds vara strategiskt väl placerat så att eventuellt

surt- och metallrikt lakvatten inte sprids vidare ut i miljön. Upplagsytan kan även behöva inneha tät bottenstruktur vilket förhindrar potentiell framtida lakvattenspridning till grundvattnet. Eventuellt lakvatten kan även komma att behöva omhändertas och vid behov renas. Kontrollprovtagningar av grund-, yt- och lakvatten bör utföras för att säkerställa åtgärdens funktion och beständighet. Observera att eventuell återanvändning av SP-material i kombination med skyddsåtgärder måste godkännas av tillsynsmyndigheten.

Sammanfattningsvis kan det poängteras att omhändertagande av SP-material vid extern mottagningsanläggning inte är ett hållbart framtida alternativ. Fokus bör läggas på miljömässigt hållbar återanvändning av massorna, alternativt anpassning av byggandet, för att möjliggöra fortsatt framdrivning och utveckling av exploateringsprojekt inom Stockholms stad.

Referenser

Amira 2002. ARD Test Handbook, Project P387A – Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage. Ian Wark Research Institute and Environmental Geochemistry International, Melbourne, Australia.

Beucher, A., et al. 2017. Mapping potential acid sulfate soils in Denmark using legacy data and LiDAR-based derivatives. Geoderma 308: 363–372.

Creeper, N., Fitzpatrick, R. & Shand, P. 2012. A simplified incubation method using chip-trays as incubation vessels to identify sulphidic materials in acid sulphate soils. Soil Use and Management, 28: 401–408.

Fröberg, G. & Höglund, L.O. 2004. MiMi Light – en populärvetenskaplig sammanfattning av MiMi-programmets forskning kring efterbehandling av gruvavfall. MiMi Rapport 2004:8, 76 s.

GARDguide 2020. International network for acid prevention, INAP. Hämtad 2020-05-18. http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page

Lindgren, L. 2020. Utvärdering av predikteringsmetoder för sulfidförande berg – Med fokus på berg som används i konstruktioner. Luleå Tekniska Universitet, 84 s.

Lottermoser, B. 2010. Mine Wastes – Characterization, Treatment and Environmental Impacts, 3nd ed, Springer-Verlag, 400 pp.

NGI 2015. Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter. Veileder for miljodirektoratet M310-2015.

Olds, W.E., et al. 2015. Geochemical classification of waste rock using process flow diagrams. AUSIMM New Zeeland Branch Annual Conference 2015, pp 307–318.

Persson, L., Sträng, M. & Antal, I. 2001. Berggrundskartan 10I Stockholm, skala 1:100 000. Sveriges geologiska undersökning Ba 60.

Pousette, K. 2010. Miljöteknisk bedömning och hantering av sulfidjordsmassor. Forskningsrapport, Luleå Tekniska Universitet, 136 s.

Pyrite Panel 2012. Report of the Pyrite Panel June 2012. Department of Housing, Planning and Local Government, Ireland, 200 pp.

Region Stockholm 2021. Utlåtande gällande förekomst av sulfidhaltiga bergmassor inom FUT5 utbyggd depå i Högdalen. Dnr: FUT 2020–0620. Region Stockholm, Förvaltning för utbyggd tunnelbana.

SFS (Svensk Författningssamling) 2013:319. Förordning om utvinningsavfall. https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2013319-om-utvinningsavfall_sfs-2013-319

SGU 2006. Sura sulfatjordar och metallbelastning, SGU-rapport 2006:5.

SGU 2015. Förbifart Stockholm – Bergartsgeokemi. En bergartsgeokemisk undersökning av de dominerande bergarterna utefter Förbifart Stockholms sträckning. Dnr: 35-1875/2014.

SGU 2018A. Stockholmsområdets berggrund, jordarter, geologiska utveckling och erfarenheter från infrastrukturprojekt. SGU-rapport 2018:08.

SGU 2018B. Kritiska egenskaper hos bergmaterial och alternativa material. MinBas Innovation: Hållbar bergmaterial- och mineralförsörjning. Rapport nr: 2014-04347.

SGU 2019. Sur sulfatjord – egenskaper och utbredning, SGU-rapport 2019:13.

SIS 2013. Karakterisering av avfall – Provtagning av avfall från utvinningsindustrin. Teknisk rapport SIS-CEN TR 16365:2013.

Stewart, W. A., Miller, S., Thomas, J. & Smart, R. 2003. Evaluation of the effects of organic matter on the net acid generation (NAG) test. In: 6th International Conference on Acid Rock Drainage (Cairns, QLD., July 14-17, 2003). Eds. Farrell, T. and Taylor, G., Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

Stewart, W. A., Miller, S. & Smart, R. 2006. Advances in acid rock drainage (ARD) characterisation of mine wastes. In: 7th International Conference on Acid Rock Drainage (St Louis, MO., March 26-30, 2006). Ed. Barnhisel R. I., American Society of Mining and Reclamation (ASMR), Lexington.

Sullivan, L., Ward, N., Toppler, N. & Lancaster, G. 2018. National Acid Sulfate Soils Guidance: National acid sulfate soils identification and laboratory methods manual.