

Slutrapport

Utveckling av effektiva och relevanta metoder för bedömning av bergmaterial innehållande metallförande sulfidmineral



Författare: Karel Miškovský (Envix Nord AB), Jan Bida (Minfo), Håkan Arvidsson (VTI), Mattias Göransson och Jenny Andersson (SGU), Lars Lövgren, Eva Johansson (Envix Nord AB)

SAMMANFATTNING

Miljöanpassad hantering av sulfidförande bergmaterial kräver relevanta undersöknings-, provtagnings- och analysmetoder för bedömning av krossprodukternas eventuella negativa miljöeffekter. Det föreliggande projektets mål var att på vetenskapliga grunder framställa, utvärdera och rekommendera praktiskt tillämpbara metoder för klassificering av bergmaterialens reaktivitet relaterad till innehåll av sulfidmineral. Projektet ska också föreslå metoder för behandling av bergmaterial där negativa miljöeffekter på närmiljön kan förutses.

Projektet var indelat i sex delprojekt: 1) Översiktlig klassificering av sulfidförande berggrund, 2) Anrikning av sulfidmineral i samband med produktion av olika bergmaterialprodukter, 3) Utveckling och testning av effektiva och representativa provtagnings- och provhanteringsmetoder för fast berg och krossmaterial, 4) Val av relevanta och effektiva analysmetoder, 5) Framtagning av metod för klassificering av sulfidförande bergkross samt 6) Val, testning och verifiering av hållbara metoder för neutralisering av syrabildning från sulfidoxidation. Slutrapporten innehåller en sammanställning av delprojektens resultat med en systematisk presentation av metodik för effektiv bedömning, klassificering och behandling av sulfidförande bergmaterial och krossprodukter.

Baserat på svavelanalyser av ca 4 300 bergartsprov har en översiktlig sulfidsannolikhetskarta tagits fram. Kartan omfattar Sveriges megastrukturella enheter (Baltiska skölden, Skandinaviska fjällkedjan och delar av Ryska/Europeiska plattformen). Utifrån sannolikheten att påträffa sulfidmineraliserade bergarter indelas Sveriges berggrund i tre klasser. Klass 1, låg sannolikhet (90 % av berggrunden har svavelhalter <0,1 %). Klassen omfattar ca två tredjedelar av Sveriges berggrund och innefattar bl. a. primorogena, synorogena och serorogena djupmagmatiska felsiska bergarter såsom granitoida ortognejser och graniter. I klass 2 ingår berggrund med måttlig sannolikhet (90 % av berggrunden har svavelhalter i intervallet 0,1-0,25 %). Berggrund av klass 2 täcker ca en tredjedel av Sveriges yta och innefattar bl.a. kvarts-fältspatrika felsiska vulkaniska bergarter och till glimmerskiffrar och sedimentgnejser omvandlade bergarter av sedimentärt ursprung. I klass 3, med förhöjd sannolikhet, då svavelhalterna i 90 % av berggrunden förväntas överstiga 0,25 % ingår bl.a. kalksilikatbergarter och ytbergarter av ospecificerat ursprung. Berggrunden av denna typ utgör ca 5 % av kartans area. Översiktskartan är avsedd att användas t.ex. vid planering av stora infrastrukturprojekt, täktprospektering och vid bedömning av bergmaterial vid exploatering av nya områden.

Litteraturstudier, laboratorieförsök och erfarenheter från mineralteknik indikerar starkt att mikroskopiska sulfidmineral frigörs, aktiveras och anrikas i finfraktion 0/1 mm i samband med krossning av olika ballastprodukter. Laboratorieförsök bekräftade att finfraktionens reaktivitet är huvudkällan till krossmaterialens syrabildande förmåga. Beräkningar av krossprodukternas specifika yta visar på en minskning av produktens reaktivitet med ökande partikelstorlek. I grövre partiklar är en stor del av mikroskopiska sulfidpartiklar inneslutna i bergmassa och därmed inte tillgängliga för oxidation. Av denna anledning föreslås att bedömning och klassificering av sulfidmineraliserat bergmaterial ska vara baserad på analys av finfraktionen 0/1 mm. Vid användning av enbart krossprodukternas grovfraktion (makadamballast för järnväg, sprängt berg etc.) ska produktens förväntade reaktivitet reduceras enligt exponerad specifik yta.

Undersöknings- och provtagningsmetodik har avgörande betydelse för bedömning av sulfidmineraliserat bergmaterials reaktivitet och eventuell negativ miljöpåverkan. Bristande genomförd undersökning och provtagning ger upphov till missvisande analysresultat åtföljda av felaktig klassificering av bergmaterialens sulfidreaktivitet. I rapporten ges rekommendationer gällande undersökning, provtagning och provberedning. I frågan om behandling utfördes laboratorieförsök och varaktighetstester av behandlat krossmaterial.

Undersökningsfasen föreslås bestå av dels regionalgeologiska studier baserade på den framtagna sannolikhetsskarta och annat relevant underlagsmaterial, dels av lokalspecifik besiktning och primär provtagning. Med anledning av sulfidmineraliseringarnas heterogenitet gällande både areell och vertikal utbredning bör en detaljerad undersökningsplan upprättas för provtagning. Vetenskapliga rapporter och praktisk erfarenhet visar god överensstämmelse avseende innehåll av sulfidmineral i borrhax och i krossfraktion 0/1 mm. Av den anledningen rekommenderas provtagning med borrhaxborrning (beroende på tillgänglighet) vid undersökningar av fast berg, sprängt berg och utlagda grova krossmassor. Rapporten rekommenderar att för samma ändamål även nyttja borrhax från jord-bergsondering som ofta utförs i tidiga projektskeden.

Val av rekommenderade analysmetoder baseras på metodernas informationsrelevans, repeterbarhet, enkelhet i genomförandet och kostnad. Efter litteraturläsning och laborativa tester av tillgängliga analysmetoder föreslås handhållen XRF (röntgenfluorescens) för bestämning av svavelhalt och halter av chalkofila metaller i finfraktion (0/1 mm). Metoden ger inte statistiskt tillförlitliga resultat hos grova fraktioner, hos borrhaxkärnor och vid mätningar på fast berg. För bestämning av bergmaterialets syrabildande reaktivitet testas på fraktionen 0/1 mm samt för information om behov av neutralisering föreslås projektet NAG-metoden (Net Acid Generation). Metodens fördel är att den på ett tämligen enkelt sätt mäter provets nettosyrabildande kapacitet genom forcerad oxidation av sulfidmineral och samtidig syraneutralisation genom upplösning av karbonatmineral och potentiella övriga syraneutraliserande processer. Åtföljande titrering med natriumhydroxid ger information om eventuellt behov av neutralisationsmedel. Rekommenderad metodanvändning utesluter dock inte tillämpning av andra analysmetoder t.ex. ABA (Acid Base Accounting) och ICP-MS (Induktivt kopplat plasma-masspektrometri).

Den föreslagna klassificeringen av sulfidförande bergmaterials finfraktion 0/1 mm baseras på resultat av NAG-tester (syrabildande reaktivitet) och svavelhaltbestämning med XRF, alternativt med ICP-MS. Enligt förslaget klassificeras bergmaterial <500 ppm svavel som icke försurande och kan användas utan åtgärder. Material med svavelhalt ≥ 500 ppm betraktas som potentiellt försurande och dess nettosyrabildande förmåga ska testas med NAG-metoden. I fall att NAG pH är <4,5 kan behandling erfordras. Prover med höga svavelhalter, >7 000-10 000 ppm, kräver sekventiell (upprepad) NAG-analys för att säkerställa att allt svavel har oxiderats. Vid slutlig bedömning av bergmaterials reaktivitet bör tas hänsyn till krossprodukternas partikelstorlek (reaktivitet minskar med ökande partikelstorlek), använd volym, hydrologiska och övriga platsspecifika förhållanden m.m. Utöver partikelstorleken ligger dessa bedömningar utanför projektets ram.

Efter ingående litteraturstudier, laboratorieförsök, varaktighetstester och praktiska erfarenheter valdes för genomförandet applikation av alkalisk slurry bestående av en kalkprodukt suspenderad i vatten som behandlingsmetod av reaktiva sulfidförande krossmaterial. Behandlingsmaterialets kemiska sammansättning gynnar både bildning av ett oxidationshinder hos sulfider och långvarigt upprätthållande av alkalisk miljö hos det behandlade krossmaterialet. Kalkproduktens kemiska sammansättning ska kontrolleras innan det används. Med hänsyn till att direkt neutralisering av krossmaterial fram till idag är sporadiskt använda metoder kommer sannolikt nya behandlingsmetoder utvecklas i framtiden.

SUMMARY

Environmentally friendly handling of sulphide-bearing rock material requires relevant examination, sampling, and analysis methods for assessing the possible negative environmental effects of the crushed product. The aim of the present project was to produce, evaluate and recommend practically applicable methods for classifying the reactivity of rock materials related to the content of sulphide minerals on a scientific basis. The project will also propose a method for pre- or post-treatment of rock material where negative environmental effects on the local environment can be expected.

The project was divided into six sub-projects: 1) General classification of sulphide-bearing bedrock, 2) Enrichment of sulphide minerals in connection with the production of various rock material products, 3) Development and testing of efficient and representative sampling and handling methods for solid rock and crushed material, 4) Selection of relevant and effective analytical methods, 5) Development of method for classification of sulphide-bearing rock crusher, and 6) Selection, testing and verification of sustainable methods for neutralization of acid formation from sulphide oxidation. This final report contains a compilation of the results of the subprojects with a systematic presentation of methodology for effective assessment, classification and treatment of sulphide-bearing rock materials and crushed products.

Based on sulphur analyzes of approximately 4,300 rock samples, a general sulphide probability map has been produced. The map includes Sweden's megastructural units (Baltic Shield, Scandinavian Mountain range and parts of the Russian/European platform). Based on the probability of encountering sulphide mineralized rocks, Sweden's bedrock is divided into three classes. Class 1, low probability (90 % of the bedrock has sulphur levels <0.1 %). This class comprises about two thirds of Sweden's bedrock and includes i.e., a. primorogenic, synorogenic and serorogenic deep-igneous rocky rocks such as granitoid orthogneisses and granites. Class 2 includes bedrock with moderate probability (90 % of the bedrock has sulphur levels in the range 0.1-0.25 %). The bedrock of class 2 covers about one third of the surface of the map and includes i.a. quartz-feldsparic felsic volcanic rocks and rocks transformed into mica shales and sedimentary gneisses of sedimentary origin. Class 3 with an increased probability when the sulfur levels in 90 % of the bedrock are expected to exceed 0.25 % includes, among other things, calcite silicate rocks and surface rocks of unspecified origin. The bedrock of this type constitutes about 5 % of the map area. The overview map is intended to be used e.g., when planning large infrastructure projects, quarrying and when assessing rock material when exploitation new areas.

Literature studies, laboratory experiments and experiences from mineral processing strongly indicate that microscopic sulphide minerals are released, activated and enriched in a fine fraction of 0/1 mm in connection with crushing of various ballast products. Laboratory tests confirmed that the reactivity of the fine fraction is the main source of the acid-forming ability of the crushed material. Calculations of the specific surface area of the crushed product show a decrease in the reactivity of the product with increasing particle size. In coarser particles, a large part of microscopic sulphide particles is enclosed in rock mass and thus not available for oxidation. For this reason, it is proposed that the assessment and classification of sulphide mineralized rock material should be based on analysis of the fine fraction 0/1 mm. When using only the coarse fraction of the crushed product (railway macadam, blasted rock, etc.), the expected reactivity of the product must be reduced according to the exposed specific surface area.

Examination and sampling methodology are of crucial importance for assessing the reactivity of sulphide mineralized rock material and any negative environmental impact. Improperly performed examination and sampling gives rise to misleading analysis results accompanied by incorrect classification of the sulphide reactivity of the rock material. This report provides detailed recommendations regarding examination, sampling, and sample preparation. The investigation phase is proposed to consist of regional geological studies based on the report's probability map and relevant reports, as well as site-specific inspection and primary sampling. Due to the heterogeneity of sulphide mineralisations regarding both areal and vertical distribution, a detailed survey plan should be drawn up for sampling. Scientific reports and practical experience show good agreement regarding the content of sulphide mineral in drill cuttings and in crushed fine fraction 0/1 mm. For this reason, sampling with cuttings is recommended for investigations of solid rock, blasted rock and laid coarse crushed masses. The report recommends that for the same purpose also use drill cuttings from soil-rock sounding, which is often carried out in the planning stage of a new project.

The choice of recommended analysis methods was based on the methods information relevance, repeatability, simplicity of implementation and cost. After literature review and laboratory tests of available analytical methods, hand-held XRF (X-ray fluorescence) is proposed for the determination of S-content and contents of chalcophilic metals in fine fraction (0/1 mm). The method does not give statistically reliable results in coarse fractions, in drill cores and in measurements on solid rock. For determination of the rock-forming reactivity of the rock material tested on the fraction 0/1 mm and for information on the need for neutralization, the project proposes the NAG method (Net Acid Generation). The advantage of the method is that it measures the sample's net acid-forming capacity in a fairly simple way by forced oxidation of sulphide mineral and simultaneous acid neutralization by dissolving carbonate mineral and possible other acid neutralizing processes. Subsequent titration with NaOH provides information on any need for neutralizing agents. Recommended method use, however, does not exclude the application of other analysis methods, e.g., ABA (Acid Base Accounting) and ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry).

The proposed classification of sulphide-bearing the rock materials fine fraction 0/1 mm is based on results of NAG tests (acid-forming reactivity) and sulphur content determination with XRF, alternatively with ICP-MS. According to the proposal, rock material <500 ppm sulphur is classified as non-acidifying and can be used without treatment. Materials with a sulphur content ≥ 500 ppm are considered potentially acidifying, and their net acidity capacity should be tested by the NAG method. In case the NAG pH is <4.5 further treatment may be required. Samples with high sulphur contents (>7 000-10 000 ppm) require sequential (repeated) NAG analysis to ensure that all sulphur has been oxidized. In the final assessment of the reactivity of rock material, the particle size of the crushed product should be considered (reactivity decreases with increasing particle size), volume used, hydrological conditions etc. In addition to the particle size, these assessments are outside the scope of this project.

After extensive literature studies, laboratory tests, duration tests and practical experience, for the implementation of this project, the application of alkaline slurry consisting of a lime product suspended in water was chosen as a treatment method of reactive sulphide-bearing crushing materials. The chemical composition of the treatment material favours both the formation of an oxidation-preventing envelope of sulphides and long-term maintains an alkaline environment of the treated crushed material. The chemical composition of the lime product must be checked before use. Given that direct neutralization of crushed materials to this day are sporadically used methods, new treatment methods are likely to be developed in the future.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING

SUMMARY

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	1
2	BEMANNING, ORGANISATION OCH UPPLÄGGNING	2
2.1	Bemannings och organisation.....	2
2.2	Uppläggning och översiktligt innehåll.....	3
2.2.1	<i>Delprojekt 1. Avgränsning av Sveriges regioner med potentiellt sulfidförande berggrund</i>	<i>3</i>
2.2.2	<i>Delprojekt 2. Anrikning av sulfidmineral i samband med produktion av olika bergmaterialprodukter</i>	<i>3</i>
2.2.3	<i>Delprojekt 3. Utveckling och testning av effektiva och representativa provtagnings- och provhanteringsmetoder för fast berg och krossmaterial.....</i>	<i>3</i>
2.2.4	<i>Delprojekt 4. Val av snabba och effektiva analysmetoder</i>	<i>3</i>
2.2.5	<i>Delprojekt 5. Framtagning av metod för klassificering av sulfidförande bergkross..</i>	<i>4</i>
2.2.6	<i>Delprojekt 6. Val, testning och verifiering av hållbara metoder för neutralisering av syrabildning från sulfidoxidation</i>	<i>4</i>
3	DELPROJEKTENS RESULTAT OCH UTVÄRDERING	4
3.1	Regioner med potentiell förekomst av sulfidmineraliseringar	4
3.1.1	<i>Inledning.....</i>	<i>4</i>
3.1.2	<i>Svenska bergartsgrupper-geografisk utbredning.....</i>	<i>5</i>
3.1.3	<i>Metodik.....</i>	<i>9</i>
3.1.4	<i>Resultat, fördelning av svavel i den svenska berggrunden</i>	<i>12</i>
3.1.5	<i>Klassificering av sulfidförande berggrund</i>	<i>16</i>
3.1.6	<i>Sammanfattande kommentarer.....</i>	<i>18</i>
3.2	Anrikning av sulfidmineral i samband med bergmaterialproduktion	19
3.2.1	<i>Inledning.....</i>	<i>19</i>
3.2.2	<i>Laboratorieförsök, metodik och genomförande.....</i>	<i>19</i>
3.2.3	<i>Resultat.....</i>	<i>19</i>
3.2.4	<i>Utvärdering och slutsatser.....</i>	<i>22</i>
3.3	Undersöknings-, provtagnings- och provberedningsmetoder	22
3.3.1	<i>Introduktion.....</i>	<i>22</i>
3.3.2	<i>Inledande undersökning.....</i>	<i>22</i>
3.3.3	<i>Fältbesiktning</i>	<i>23</i>
3.3.4	<i>Provtagningsmetoder.....</i>	<i>24</i>
3.3.5	<i>Framställning av provtagningsplaner</i>	<i>27</i>
3.3.6	<i>Provhantering och provberedning</i>	<i>28</i>
3.4	Val av relevanta och effektiva analysmetoder	29
3.4.1	<i>Kemisk och mineralogisk karaktärisering</i>	<i>29</i>
3.4.2	<i>Geokemiska test.....</i>	<i>34</i>
3.4.3	<i>Resultat och slutsatser från litteraturstudien med avseende på metodernas lämplighet för ändamålet.....</i>	<i>37</i>
3.4.4	<i>Laboratorieförsök baserade på slutsatser från litteraturstudien</i>	<i>40</i>
3.5	Framtagning av klassificeringsmetoder	49
3.5.1	<i>Nuvarande reglering av bergmaterialens svavelhalt.....</i>	<i>49</i>
3.5.2	<i>Rekommenderad klassificering.....</i>	<i>50</i>
3.6	Val, testning och verifiering av hållbara sulfidneutraliseringsmetoder	51
3.6.1	<i>Litteraturstudier av sulfidneutraliseringsprocesser.....</i>	<i>51</i>
3.6.2	<i>Litteraturstudie.....</i>	<i>52</i>
3.6.2	<i>Exempel på neutralisering av sulfidförande gråberg.....</i>	<i>58</i>

3.6.3	<i>Laboratorieförsök för neutralisering av sulfidmineraliserat bergkrossmaterial.....</i>	62
4.	SAMMANFATTNING AV REKOMMENDERADE UNDERSÖKNINGS-, ANALYS- OCH KLASSIFICERINGSMETODER SAMT FÖRSLAG TILL BEHANDLINGSÅTGÄRDER.....	79
4.1	Inledning	79
4.1.1	<i>Undersöknings-, provtagnings-, analys- och klassificeringsmetoder.....</i>	80
4.1.2	<i>Generella resultat tillämpade i alla provtagnings-, analys- och åtgärdsmetoder.....</i>	80
4.2	Undersöknings- och provtagningsmetodik	80
4.3	Analysmetoder	81
4.3.1	<i>Bestämning av svavelhalt och metallkaraktärisering</i>	81
4.3.2	<i>Test av oxidationsreaktivitet</i>	81
4.3.3	<i>Analysmetoder tillämpade vid klassificering av bergmaterialens sulfidreaktivitet.....</i>	81
4.4	Klassificering av sulfidförande bergmaterial.....	82
4.4.1	<i>Bakgrund.....</i>	82
4.4.2	<i>Föreslagen klassificering</i>	82
4.5	Neutralisering av sulfidförande bergkrossmaterial	83
4.5.1	<i>Inledning.....</i>	83
4.5.2	<i>Resultat och slutsatser</i>	83
4.6	Rekommendationer i sammanfattning	84
4.6.1	<i>Undersökning och provtagning</i>	84
4.6.2	<i>Fraktioner och partikelstorlek.....</i>	84
4.6.3	<i>Analysmetoder.....</i>	85
4.6.4	<i>Klassificering</i>	85
4.6.5	<i>Behandlingsmetoder.....</i>	85
4.6.6	<i>Varaktighetstester</i>	85
5	REFERENSER.....	87

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Praktiska erfarenheter med hantering av sulfidförande bergmassor som enligt nuvarande bedömningsmetoder klassas som inerta har visat att motsvarande utlagda krossprodukter har gett upphov till betydande skador på biotoper och närmiljö genom försurning och utsläpp av miljöfarliga metaller. Miljöproblem konstaterades speciellt vid användning av bergkross som utfyllnad av exploateringsytor och i upplag samt, i mindre omfattning, i väg- och järnvägskonstruktioner. Frågan om användning av sulfidförande bergmaterial har blivit särskilt aktuell i samband med stora infrastruktursatsningar där stora volymer av överskottsmassor hanteras. Kostnader för efterbehandling av sulfidförorenade objekt medför kännbara samhällsförluster.

Hittills genomförda undersökningar tyder på att frigjorda sulfidmineral anrikas i finfraktionen i samband med krossning, vilket ökar deras reaktivitet. Samtidigt fördelas sulfidhalten jämnt i krossprodukten.

1.2 Syfte och mål

Projektets syfte är att utveckla ett metodsysteem anpassat till hållbar produktion och användning av konstruktionsmaterial.

Branschens krav på undersökning, klassificering och hantering av berg som konstruktionsmaterial sammanfattas i följande:

- ✓ Snabb och effektiv undersökning och representativ provtagning.
- ✓ Relevanta, utslagsgivande analysmetoder.
- ✓ Klassificeringssystem baserat på teoretiska, experimentella och praktiska testresultat.
- ✓ Snabb reaktion mellan krossmaterialets sulfider och använt neutraliseringsmedel.
- ✓ Enkel teknisk applikation i redan utlagd krossprodukt eller i samband med behandling under krossning.
- ✓ Säker och varaktig neutralisering inriktad på behandling av källan d.v.s. krossproduktens finfraktion.

För närvarande finns inga kravbestämmelser baserade på miljöaspekter för klassificering och hantering av sulfidförande bergmaterial med bedömning av deras reaktivitet.

I syfte att i hög grad minska sulfidförande bergmaterialens negativa miljöpåverkan och därmed förbättra hushållning med naturresurser ska forskningen vidare fokusera på utveckling av effektiva och hållbara för- och efterbehandlingsmetoder.

Projektets mål är att introducera ett undersöknings-, provtagnings-, analys- och klassificeringssystem anpassat till bedömning och hantering av sulfidförande bergmaterial. I detta systemkomplex är resultat från ett ingående delmoment beroende av föregående moments representativitet. Utöver detta behandlas också metoder för neutralisering av sulfidförande bergmaterialprodukter.

Den aktuella studien fokuserar på risken för uppkomst av surhet i krossmaterialet och hur en sådan syrabildning och frigörelse av metaller ska kunna motverkas genom behandling av bergkross. Studien omfattar inte recipientpåverkan förorsakad av förurning och metallutsläpp från sulfidförande konstruktionsmaterial. Den speciella problematik som berör arsenik och är kopplad till behandling av sulfidförande berg har inte beaktats i denna studie.

2 BEMANNING, ORGANISATION OCH UPPLÄGGNING

Av praktiska skäl och med hänsyn till projektdeltagarnas kompetens indelades huvudprojektet i sex delprojekt. Huvudprojektet utökades med en arbetsstudie av ett referensobjekt avseende nyproducerad bergkross med ursprung i sulfidmineraliserad berggrund. Syftet var att komplettera delprojektens arbete med nytt referensmaterial. Slutrapportens resultat och slutsatser är en syntes av samtliga resultat från delprojekten. Nedan presenteras projektets organisation och delprojektens innehåll.

2.1 Bemanning och organisation

Projektets ledning består av projektledare och ett problemtäckande forskarteam bestående av erfarna forskare från universitet, konsultföretag, myndigheter och näringsliv.

- ✓ *Projektledare*
Fil. dr, adj. prof. Karel Miskovsky, Envix Nord AB: bergmaterialteknologi, miljögeologi, malmgeologi
- ✓ *Ställföreträdande projektledare*
Tekn. dr, Eva Johansson, Envix Nord AB: bergmaterialteknologi, anläggningsteknik
- ✓ *Delprojektledare 1*
Sen. Geol. Mattias Göransson, Sveriges geologiska undersökning (SGU): berggrundsgeologi, bergmaterialteknologi, assisterad av Fil. dr Jenny Abrahamsson och Fil. dr Anders Hallberg
- ✓ *Delprojektledare 2*
Civ.ing. Jan Bida, SBMI/MinFo: mineralteknik, anläggningsteknik och Bergmaterial ing. Håkan Arvidsson, Statens väg- och trafikforskningsinstitut (VTI): bergmaterialteknologi, vägteknik, provning
- ✓ *Delprojektledare 3*
Tekn. dr, Eva Johansson, Envix Nord AB: bergmaterialteknologi, anläggningsteknik
- ✓ *Delprojektledare 4*
Fil. dr, doc., Lars Lövgren, oorganisk geokemi, miljöanalys
- ✓ *Delprojektledare 5*
Fil. dr, doc., Lars Lövgren, oorganisk geokemi, miljöanalys
- ✓ *Delprojektledare 6*
Fil. dr, adj. prof. Karel Miškovský, Envix Nord AB: bergmaterialteknologi, miljögeologi, malmgeologi, assisterad av Fil. dr, prof. Richard Prikryl, Karls universitet Prag: mineralogi, XRD, OM-och SEM-mikroskopi

2.2 Uppläggning och översiktligt innehåll

2.2.1 Delprojekt 1. Avgränsning av Sveriges regioner med potentiellt sulfidförande berggrund

Delprojektets syfte var att med hjälp av litteraturstudier, tillgängliga data och nyttjande av forskargruppens praktiska erfarenheter identifiera regioner med potentiell förekomst av sulfidförande mineraliseringar.

Delmoment:

- ✓ Sulfidförande berggrund: Kategorisering av bergarter som är potentiella bärare av sulfider.
- ✓ LIKE, geokemianalyser: Identifiering av områden med låga sulfidförande mineraliseringar med hjälp av SGU:s geokemiska data (svavelhalter) och kartvisarens metallogenetiska provinser för basmetaller.
- ✓ Regionalutbredning av sulfidmineraliserad berggrund: Avgränsning av Sveriges geografiska områden med potentiella sulfidmineraliseringar baserad på resultat från geokemiska analyser och praktiska erfarenheter.

2.2.2 Delprojekt 2. Anrikning av sulfidmineral i samband med produktion av olika bergmaterialprodukter

Delprojektets syfte och målsättning är att testa, kvantifiera och verifiera hypotesen om anrikning av sulfidmineral i krossproduktens finfraktion samt användning av borrhaxmetoden som relevant provtagningsmetod.

Delmoment:

- ✓ Genomgång av tidigare utförda analyser av borrhax.
- ✓ Provtagning och mineralteknisk analys av borrhaxborrningar och krossprodukter för framtagning av sambandet mellan sulfidhalt och tungmetallhalt i kaxprov och i krossprodukter.

2.2.3 Delprojekt 3. Utveckling och testning av effektiva och representativa provtagnings- och provhanteringsmetoder för fast berg och krossmaterial

Delprojektets syfte och mål var att identifiera, testa och verifiera effektiva och genomförbara undersöknings-, provtagnings- och provhanteringsmetoder samt att utveckla rationell metodik för framställning av ändamålsenliga och praktiskt användbara provtagningsplaner.

Delmoment:

- ✓ Inledande undersökning av bakgrundsmaterial.
- ✓ Fältbesiktning av aktuella objekt.
- ✓ Framställning av provtagningsplaner.
- ✓ Jämförelse mellan provtagningsmetoder.
- ✓ Utveckling av metodik för provhantering och provberedning.

2.2.4 Delprojekt 4. Val av snabba och effektiva analysmetoder

Delprojektets mål var att identifiera, testa och verifiera snabba, utslagsgivande och effektiva analysmetoder för svavel-, metall- och sulfidmineralbestämning i krossmaterialet, för vidare bedömning av krossmaterialets förmåga att generera surhet (aciditet) och för beräkningar av sulfidneutraliserande åtgärder.

Delmoment:

- ✓ Teoretisk genomgång baserad på litteraturstudier och kritisk granskning av tillämpade analysmetoder.
- ✓ Analys av resultatet från litteraturstudien med avseende på metodernas lämplighet för ändamålet.
- ✓ Laboratorieförsök baserade på slutsatser från litteraturstudien.
- ✓ Utvärdering av resultat samt rekommendation och beskrivning av de mest tillämpbara analysmetoderna
- ✓ Syntes som leder till metodrekommendation för bedömning av bergmaterialens syrabildande förmåga och behov av sulfidneutraliserande åtgärder.

2.2.5 Delprojekt 5. Framtagning av metod för klassificering av sulfidförande bergkross

Delprojektets mål var att med hjälp av jämförelser mellan de i delprojekt 4 utvalda analysmetoderna fastställa kriterier för klassificering av krossmaterial och bergmaterial utifrån materialens syrabildande förmåga. Med syfte att nå de uppsatta målen sker utförandet i flera steg, vilka delvis är baserade på resultat från föregående delprojekt.

Delmoment:

- ✓ Korrelation mellan svavelhalt i grov- och finfraktion hos samma bergmaterial.
- ✓ Laborietest av en provserie med stigande svavelhalt och syrabildande förmåga.
- ✓ Riskbedömning av bergmaterial efter finfraktionens svavelhalt, förurningseffekt och metallutsläpp.

2.2.6 Delprojekt 6. Val, testning och verifiering av hållbara metoder för neutralisering av syrabildning från sulfidoxidation

Delprojektets syfte och mål var att på basis av litteraturstudier, tidigare erfarenheter och laborativa tester identifiera och verifiera effektiva sulfidneutraliseringsmetod/-er för behandling av sulfidförande bergmaterial och deras krossprodukter.

Delmoment:

- ✓ Teoretiska studier (litteraturstudier) av sulfidneutraliseringsprocesser.
- ✓ Sammanställning av erfarenheter från tidigare projekt.
- ✓ Laboratorieförsök och provning av åtgärdens varaktighet.

3 DELPROJEKTENS RESULTAT OCH UTVÄRDERING

3.1 Regioner med potentiell förekomst av sulfidmineraliseringar

3.1.1 Inledning

Sveriges berggrund-sulfidmineraliseringar

Sveriges berggrund består av tre huvudenheter (figur 1): en prekambrisk urbergssköld (Baltiska skölden, 900->2 900 miljoner år gamla bergarter), ett yngre täcke av sedimentära bergarter (Europeiska och Ryska plattformen, <900 miljoner år gamla bergarter) och den Kaledonska

fjällkedjan (510–395 miljoner år gammal). Sulfidförande berggrund uppträder i alla av de tre huvudenheter. En utförlig beskrivning av den svenska berggrunden ges av Lundqvist m.fl. (2011). Nedan följer en kortfattad översiktlig beskrivning av huvuddragen i den svenska berggrunden.

Urberget (Baltiska skölden)

De äldsta delarna av urberget finns i norra och östra Sverige. Det består av låg- till höggradigt omvandlade vulkaniska och sedimentära bergarter som genomsatts av magmatiska bergarter av varierande ålder. Större områden med urberg av sedimentärt ursprung finns mellan Skellefteå och Sundsvall (Bottniska bassängen) och i delar av Mälardalen och söder därom ner till trakten av Norrköping (Mälarhavet). Dessa bergarter uppträder både som svagt omvandlade sand- och lerstenar till kraftigt ådrade gnejser, s.k. sedimentådergnejser. Större sammanhängande områden med berggrund av vulkaniskt ursprung uppträder i de sulfid- och oxidrika malmprovinserna, från Skellefteåfältet och norrut samt i Bergslagsfältet. Underordnade stråk av karbonatiska bergarter är ställvis associerade med de vulkaniska avsättningarna. Andel granitisk berggrund ökar mot söder där bergarter med ursprung i det Transskandinaviska magmatiska bältet dominerar. Undantaget är urberget längst i väster i Göteborgsområdet och norrut mot norska gränsen där sedimentära bergarter i olika grad av omvandling förekommer (Stora Le-Marsstrandformationen).

Sedimentära bergartstäcket (Ryska och Europeiska plattformen)

Delar av urberget täcks av yngre sedimentära bergarter. Rester av ett sandstensdominerat sent prekambrikt sedimenttäckte finns i Vätternsänkan och längs fjällranden. Fanerozoiska ler- och sandstenar, kalkstenar, skiffrar och alunskiffer finns huvudsakligen bevarade i Götaland och i Siljansringen.

Kaledonska fjällkedjan

Fjällkedjan består av enheter från urberget och det sedimentära bergartstäcket som tillsammans med berggrund som legat utanför kontinenten skjutits in mot öster under den Kaledonska bergskedjebildningen. Fjällberggrunden är omvandlad och deformerad i varierande grad och ställvis mineraliserad.

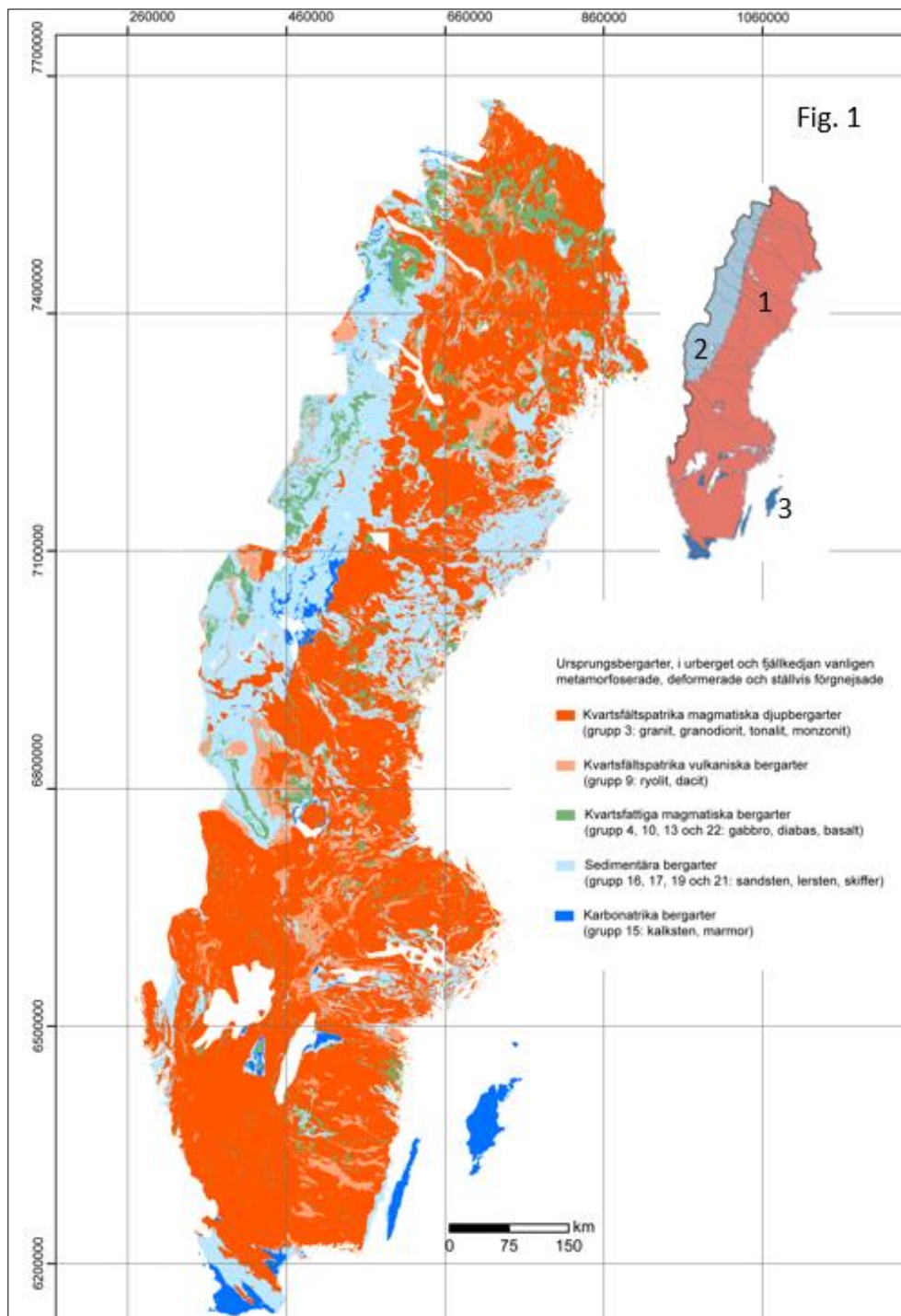
Diabas

Den svenska berggrunden genomsätts av olika generationer av diabas, en kvartsfattig mörk magmatisk djupbergart som uppträder som gångar eller lager. De mest framträdande diabasförekomsterna finns i Västernorrland och Skåne.

3.1.2 Svenska bergartsgrupper-geografisk utbredning

SGU:s berggrundskartdatabas och litogeokemiska databas som använts i denna studie omfattar hundratals bergartsnamn. Detta speglar dels att data insamlats under lång tid (150 år), med olika metodik, undersökningssyften och kunskapslägen, dels berggrundens stora diversitet. Den svenska berggrunden har en över 2 500 miljoner år lång utvecklingshistoria som skiljer sig mycket åt i olika delar av landet. För att hantera berggrundens diversitet tillämpar SGU en förenklad indelning av berggrunden i 25 bergartsgrupper. Bergartsgrupper med få svavelanalyser och mycket begränsad utbredning i kartytan (<1 % av ytarealen) har uteslutits i denna studie. I tabell 1 listas de vanligast förekommande bergartsgrupperna och deras ytmässiga fördelning i berggrundskartan. Figur 1 visar en förenklad kartmodell över

fördelningen av de dominerande bergartsgrupperna. I kartan framträder tydliga stora regionala skillnader i de olika bergartsgruppernas utbredning.



Figur 1. Förenklad berggrundskarta som visar dominerande bergartsgrupper i Sverige. Kartan är baserad på SGU:s berggrundskartdatabas i skala 1:50 000 – 1: 250 000. Insättskartan visar berggrundens indelning i tre huvudenheter: 1) urberget, 2) det sedimentära ytbergartstäcket och 3) den kaledonska fjällkedjan. Insättskartan är baserad på den litotektoniska indelningen av Sveriges berggrund från SGU:s berggrundsgeologiska kartdatabas i skala 1:1 miljon.

Tabell 1. Bergartskoder för förenklad kartmodell i figur 1. I figuren är bergartsgrupperna 11, 12, 20, 24 och 25 exkluderade p.g.a. sporadisk förekomst.

Bergartsgrupp (SGU-kod)	Bergartsgrupper*	Exempel på magmatiska och sedimentära bergarter**	Exempel på metamorfa varianter
Kvartsfältspatrika bergarter av magmatiskt ursprung			
3	Djupbergarter	granit, granodiorit, tonalit, kvartsmonzonit, kvartsmonzodiorit, kvartssyenit	ortognejs, ådergnejs, migmatitisk gnejs, charnockit, granulitisk gnejs
9	Vulkaniska bergarter	ryolit, trakyt, dacit	
Kvartsfattiga bergarter av magmatiskt ursprung			
4	Djupbergarter	gabbro, diabas, ultramafit, diorit, anortosit	grönskiffer, amfibolit, amfibolitisk gnejs, granatamfibolit, mafisk granulit, serpentinit, täljsten
10	Vulkaniska bergarter	basalt, andesit	
13	Ospecificerat ursprung	mafisk bergart, ultramafisk bergart	
22	Kraftigt metamorft överpräglade bergarter		
Silikatrika bergarter av sedimentärt ursprung			
16	Sedimentär bergart med ursprung ur mer sandiga sediment	sandsten, gråvacka, arenit, arkos, konglomerat, tillit, diamiktit	kvartsit, kvartsitisk skiffer,
17	Sedimentär bergart med ursprung ur mer leriga sediment	siltsten, lersten, slamsten, skiffer, alunskiffer, turbidit argillit	metaargillit, fyllit, glimmerskiffer, sedimentgnejs (paragnejs), ådergnejs
19	Ytbergart, ospecificerad sammansättning och ospecificerat ursprung	ytbergart, suprakrustalbergart tuff, tuffit	suprakrustalgnejs, suprakrustal ådergnejs
21	Glimmerrik metamorf ytbergart	se metamorfa varianter	fyllit, glimmerskiffer, skiffer, paragnejs, sedimentådergnejs
Karbonatrika sedimentära bergarter			
15	Karbonatrik sedimentär bergart	kalksten, mörgel, pisolit, dolomit	marmor
Metamorfa bergarter av ospecificerat ursprung eller sammansättning			
11	Vulkanisk bergart, ospecificerad sammansättning		kataklastit, tektonisk breccia, mylonit, gnejs, granofels, migmatit, diatexit, metatexit, anatexit
12	Kvartsrik bergart, ospecificerat ursprung		
20	Kvarts-fältspatrik metamorf bergart		
24	Metamorf bergart, ospecificerad sammansättning		
25	Ospecificerad bergart		

* Bergartsgrupperna är kodade efter fältbedömning av bergarternas ursprung. Samtliga bergartsgrupper omfattar även metamorfoserade varianter.

** För metamorfoserade varianter används ibland prefixet "meta-" framför bergartsnamnet, t.ex. metagranit, metarenit, metapelit etc.

Åtta bergartsgrupper täcker mer än 98 % av ytan i kartmodellen (tabell 1, figur 1). Störst utbredning (>50 %) har kvarts- och fältspatrika magmatiska djupbergarter (bergartsgrupp 3), vilka täcker mer än halva Sveriges yta och som helt dominerar i urberget. Bergartsgruppen omfattar både välbevarade bergarter som granit, granodiorit och syenit samt deformerade och metamorfoserade varianter av dessa, exempelvis metagranit, ortognejser och migmatiter. Gabbro, diabas och amfibolit, grupp 4 och 22, utgör endast drygt 5 % av bergytan. Dessa bergarter är dock relativt vanliga som gångar, band och linser så även om de inte utgör större sammanhängande ytor som visas i kartbilden är de vanligt förekommande.

Kvartsfältspatrika vulkaniska bergarter som ryolit och dacit och deras metamorfa motsvarigheter (grupp 9)-utgör omkring 7 % av ytorna i kartdatabasen. De kvartsfältspatrika vulkaniterna är värdbergarter till de flesta av Sveriges järn- och sulfidmalmer. Kvartsfattiga, mörka (mafiska) vulkaniter som basalt och andesit utgör 3 % (grupp 10). Av de sedimentära bergarterna dominerar kvarts-fältspatrika sedimentära bergarter med ursprung ur mer sandiga sediment (grupp 16).-Denna grupp utgör 18 % av kartytan och omfattas av olika typer av sandstenar och underordnat mer ovanliga bergarter som konglomerat. I gruppen ingår både välbevarade, icke metamorfa, och låg till höggradigt metamorfoserade bergarter. Icke metamorfa kvarts-fältspatrika sedimentära bergarter förekommer i större sammanhängande områden i Dalarna (Dalasandsten), Gästrikland (Gävlesandsten) och Skåne. Låggradigt metamorfoserade varianter förekommer ställvis i urberget och dominerar i de undre och övre överskjutningarna i fjällkedjan (Jämtlands- och Køliskollorna). Medel till höggradigt omvandlade varianter uppträder i urberget, framför allt i de östra norrländska landskapen (Hälsingland, Gästrikland, Ångermanland och Västerbotten) samt i Mälardalen, framförallt i stråk söder om Mälaren. Medel till höggradigt omvandlade sedimentära bergarter är även vanliga i de mellersta delarna av fjällkedjans överskjutningar (Seveskollorna).

Sedimentära bergarter som har bildats från mer leriga sediment (grupp 17) utgör ca 2 % av kartytan. De har störst utbredning i det unga sedimentära plattformstäcket i Götaland, främst i Skåne och i fjällkedjans lågmetamorfa undre skollberggrund. Den sulfidförande alunskiffern ingår som en del av denna grupp. Låg- till högmetamorfa och ställvis ådergnejsiga varianter uppträder i mer begränsad omfattning i delar av urberget i de östra delarna av Svealand och Norrland, oftast i association med större utbredning av kvarts-fältspatrika sedimentära bergarter med ursprung ur sandiga sediment (grupp 16).

Glimmerrika metamorfa bergarter av sedimentärt ursprung (grupp 21) uppträder i både fjällkedjan och urbergsskölden. De utgör tillsammans ca 7 % av berggrunden. I denna grupp ingår bergarter som fyllit, glimmerskiffer, sedimentgnejs (paragnejs) och sedimentådergnejs. Bergarterna förekommer i medel till höggradigt metamorfoserade delar av urberget och i fjällkedjans mellersta skollor.

Bergarter i grupperna 16, 17 och 21 har alla bildats från sediment som har avsatts i vatten och cementerats till berg (litifierats). Det är kornstorleken på ursprungsmaterialet, d.v.s. lera, silt, sand eller grus, och för grupp 21, graden av metamorfos som skiljer grupperna åt. Dessa bergarter förekommer ofta tillsammans och kan vara svåra att skilja åt vid kartering, särskilt gäller detta vid medel- till högmetamorfos. På grund av olika metodik och kunskapslägen vid olika kartläggningstillfällen har likartade medel- till högmetamorfa bergarter av sedimentärt ursprung på en del ställen kodats på olika sätt i olika projekt. Tillsammans utgör de tre grupperna omkring 30 % av ytorna i berggrundskartan.

Kalksten (grupp 15), en karbonatrik sedimentär bergart, utgör omkring 3 % av bergytan och förekommer i större omfattning endast i sedimentbergartstäcket i Götaland och i fjällkedjan.

Övriga bergartsgrupper täcker 1 % eller mindre av Sveriges yta. Några av dessa kan ändå ha stor betydelse för samhället, som t.ex. kalksilikatbergarter av ospecificerat ursprung, skarn (grupp 14) eftersom denna bergart är kopplad till många malmförekomster.

Flera av bergartsgrupperna har liknande sammansättning men skiljer sig åt i bildningssätt eller i hur deras ursprung har specificerats. Det gäller exempelvis bergartsgrupperna "kvarts-fältspatrika magmatiska djupbergarter" (grupp 3), "kvarts-fältspatrik vulkanisk bergart" (grupp 9), och "kvarts-fältspatrik bergart av ospecificerat ursprung" (grupp 12). Detsamma gäller för de kvartsfattiga bergarterna av magmatiskt ursprung i grupperna 4, 10, 13 och 22. Eftersom de skilda bildningssätten kan ha påverkat bergarternas innehåll av sulfider och sulfidrelaterade metaller har det varit av betydelse att hålla isär dessa bergartsgrupper trots att de har ett liknande ursprung.

Övriga bergarter som metamorfa bergarter av ospecificerat ursprung eller ospecificerad sammansättning (grupp 11, 12, 20, 24 och 25) och kalksilikatbergarter av ospecificerat ursprung i gruppen kemiskt bildade eller omvandlade bergarter (skarn, grupp 14) har mycket begränsad utbredning och dessa bergarters geografiska uppträdande behandlas därför inte vidare i denna rapport.

3.1.3 Metodik

SGU:s litogeokemidatabas

SGU:s litogeokemiska databas innehåller information om den svenska berggrundens kemiska sammansättning med avseende på fördelning av olika grundämnen. I maj 2021 fanns över 60 000 poster lagrade i databasen. Data kommer huvudsakligen från SGU:s verksamhet men omfattar även externa data från vetenskaplig litteratur och rapporter. De äldsta analyserna är från tidigt 1800-tal och data kommer från en järnmalmsanalys från 1823 (SGU Ca 35). Databasen uppdateras kontinuerligt, både med nya analyser och med kompletteringar samt korrigeringar av befintliga poster. Eftersom insamling av data har skett över lång tid, har genomförts med olika syften och delvis omfattar externa källor, finns stor variation i vilka element som har analyserats, vilka laboratorier som använts, och vilka provtagnings-, uppslutnings- och analysmetoder som har tillämpats. I databasen finns information om provtagningsplats, bergart, provberednings- och analysmetod, men informationsmängden varierar stort för olika poster. Posterna i databasen kan delas in i två huvudgrupper: 1) prov som har analyserats för allmän karaktärisering av berggrundens sammansättning och 2) prov som har analyserats malmprospekteringssyfte. SGU har bedrivit omfattande riktad inventering och kartläggning av berggrund som underlag för malmprospektering. Kemisk karaktärisering av bergmaterial inom kartläggning av funktionalitet hos bergballast har däremot tidigare varit ytterst begränsad.

Analys av svavelinnehåll i SGU:s databas

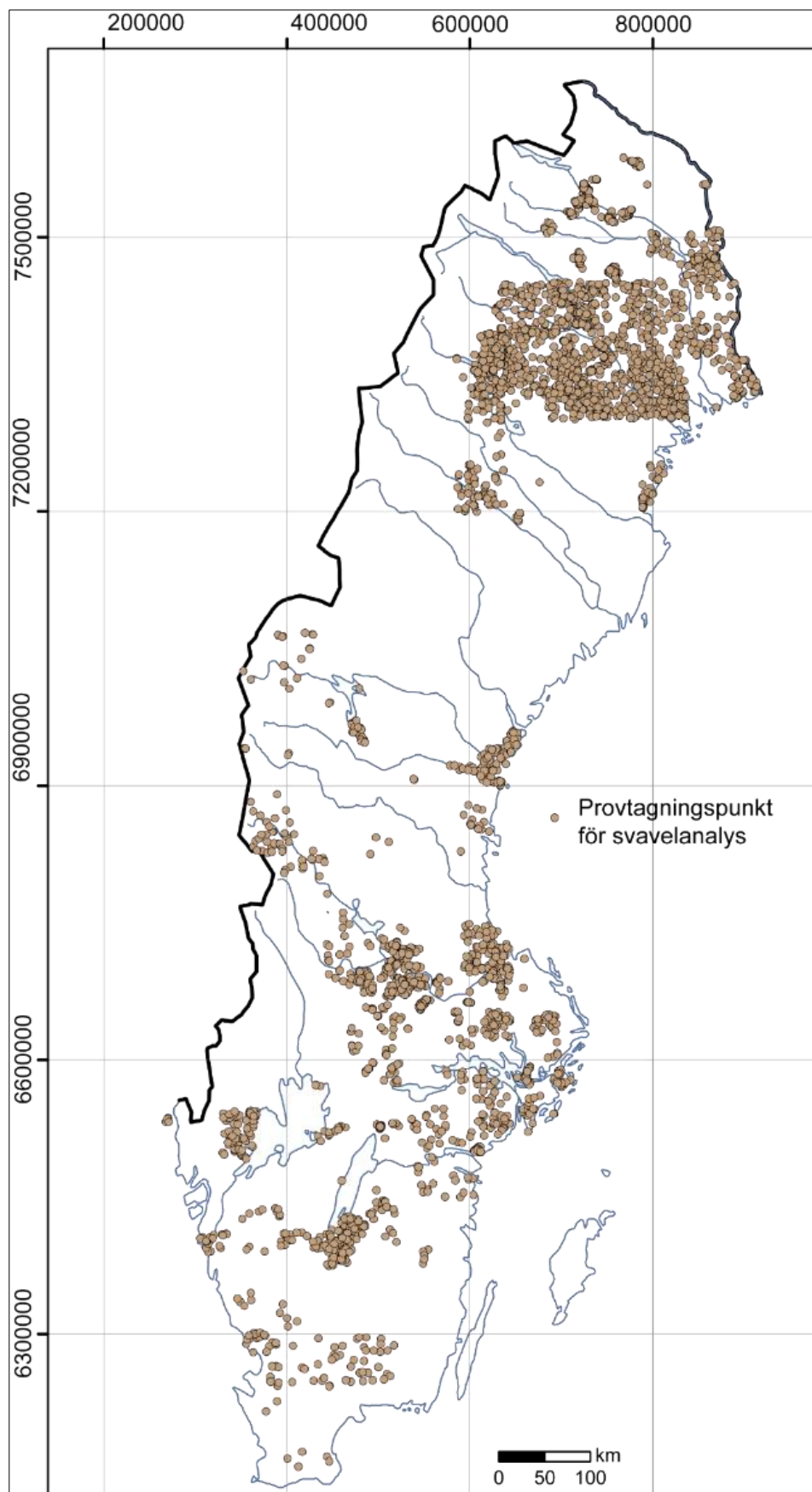
Sulfider innehåller svavel, ett grundämne som oftast förekommer i små koncentrationer i berggrunden och som därför tillhör kategorin spårelement. De flesta posterna i databasen har data för så kallade huvudelement, vilka är de tio mest vanliga grundämnena i jordskorpan. De anges i databasen som oxider, t.ex. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 m.fl. Övriga element kallas spårelement och de har analyserats i betydligt mindre omfattning. Genomslag av den så kallade ICP-MS-tekniken (Induktivt kopplat plasma-masspektrometri) i början av 2000-talet har förbättrat analystekniken så att det med hög precision snabbt och kostnadseffektivt även går att analysera spårelement, däribland svavel. Historiskt har det varit av stort intresse att göra spårelementanalyser i prospekteringssyfte, vilket har motiverat mer omfattande analysprogram.

Efter 2010 har den största delen av SGU:s berggrundskartläggning varit inriktad på prospekteringsintressanta områden och objekt. Det medför att databasen har en stor övervikt av spårelementanalyser som tagits fram i särskilt syfte att vara underlag för malmprospektering. Vid användning av kemiska data för berggrund från SGU:s databas är det viktigt att syftet med analysen beaktas. I vissa fall kan samtliga analyser av berggrunden i ett område omfatta en specifik mineralisering och på intet sätt spegla den dominerande, lokala bergmassans geokemiska sammansättning.

Utvärdering av svavelanalyser i SGU:s litogeokemiska databas

För att kartlägga förekomst av sulfider i den svenska berggrunden gjordes ett uttag av befintliga svavelanalyser på bergmaterial från SGU:s litogeokemidatabas. Uttaget gjordes i april 2020. Vid denna tidpunkt fanns omkring 21 000 poster i databasen. Baserat på information om provberedning, uppslutnings- och analysmetod och vilket laboratorium som har använts gjordes en kvalitetsbedömning av analysdata. Klassificering av data utifrån syfte för provtagningen utfördes med syfte söka ut analyser av bergmaterial som är representativa för större berggrundsområden och utesluta prov som har tagits för att karaktärisera olika typer av malmer och udda bergartsförekomster som exempelvis meteoriter. Bedömning av analyskvalitet gjordes utifrån uppslutningsmetod, analysmetod (instrumentering) och vid vilket laboratorium analyserna utförts. Högsta kvalitetsklassning fick analyser som gjorts med flera olika uppslutningsmetoder (vanligen Li-boratuppslutning för svårlösta element och mildare lakningsmetoder med "fyra syror" eller kungsvatten för sulfider och mer volatila element), svavel analyserat med LECO, analyserna utförda av ackrediterade laboratorier (till exempel ALS, ACME och XRAL) och där standardprov har ingått i analysen. Av analyser i den högsta kvalitetsklassningen utsöktes sedan endast analyser som gjorts för allmän dokumentation av berggrundens sammansättning eller för åldersbestämning. Analyser som genomförts för att karaktärisera olika typer av malm t.ex. inom projekt för malmdokumentation och mineraljakten uteslöts. En separat databas upprättades för de poster som innehöll svavelanalyser av god kvalitet och av prov som har analyserats för att vara representativa för den svenska berggrunden. Denna databas innehöll ett urval av 4 276 poster och det bär detta urval av analyser som i denna studie har använts för statistisk beräkning och klassning av sannolikheten för berggrundens benägenhet att innehålla sulfider. Det lägsta värdet för en svavelanalys i databasen är 0,01 vikt%, vilket också motsvarar den rapporterade detektionsgränsen.

Figur 2 visar den geografiska fördelningen av svavelanalyser av den svenska berggrunden i Sverige. Större delen av dessa analyser har huvudsakligen gjorts inom SGU:s fältkartläggning under de senaste 15 åren. Kartan illustrerar den ojämna fördelningen av svavelanalyser över landytan. Det finns en stor andel analyser i södra Norrbotten efter en specialsatsning på kartläggning av malmpotentiella områden under åren 2008–2014, medan det är stor avsaknad av data från storstadsregionerna Stockholm, Malmö och Göteborg som huvudsakligen kartlades under 60-, 70- och 80-talen.



Figur 2. Geografisk fördelning av det urval av svavelanalyser på 4 276 poster från SGU:s litogeokemiska databas som har bedömts vara av god kvalitet och representativa för den svenska berggrunden.

3.1.4 Resultat, fördelning av svavel i den svenska berggrunden

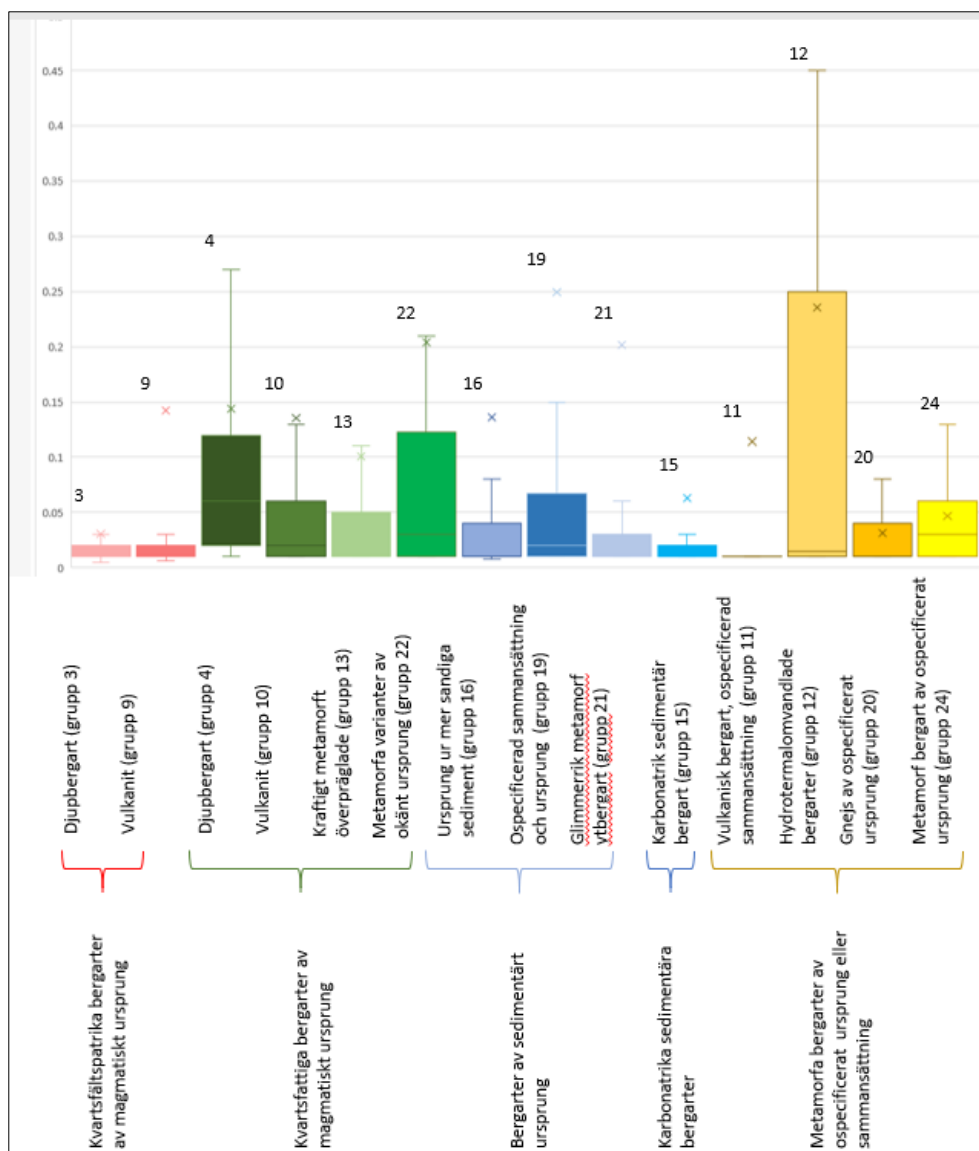
Fördelning och frekvens av svavelinnehåll i olika bergartsgrupper

I tabell 2 finns en sammanställning av analyser av koncentrationen av totalsvavel i bergartsgrupper som är vanligt förekommande i den svenska berggrunden ($\geq 1\%$ av ytan i kartdata) och som finns representerade med analysdata i SGU:s litogeokemiska databas. Analysdata presenteras i form av beräkningar av medelvärde, medianvärde, högsta och lägsta halt inom bergartsgruppen samt halter i 5:e till 95:e percentilen. Fördelningen av svavelanalyser mellan olika bergartsgrupper motsvarar i grova drag deras ytmässiga fördelning. Undantagna är olika metamorfa bergarter av sedimentärt ursprung (metamorfa bergarter i grupperna 16, 17, 19 och 21) som är kraftigt underrepresenterade. Kvartsfältspatrika sedimentära bergarter med ursprung ur mer sandiga sediment och metamorfa varianter av dessa (grupp 16) som t.ex. sandsten, gråvacka, arenit (medelkornig metamorf sandsten) och paragnejs täcker nära 20 % av ytan i kartmodellen men utgör endast 5 % av svavelanalyserna i databasen. Andra bergarter är överrepresenterade, exempelvis analyser av kvarts-fältspatrika vulkaniska bergarter och kvartsfattiga magmatiska bergarter. Det kan bero på att dessa bergartsgrupper har varit av intresse ur malmprospekteringssynpunkt. Av samma anledning finns relativt sett många analyser av kalksilikatbergarter av ospecificerat ursprung eller sammansättning (skarn, grupp 14). Dessa täcker mycket liten yta ($<1\%$) i berggrundskartan, men har varit av stort intresse för malmprospektering. De flesta analyserna kommer från kvartsfältspatrika magmatiska bergarter (grupp 3), det vill säga graniter och granitbesläktade bergarter, vilka också är vanligaste bergart i den svenska berggrunden. Dessa bergarter är något underrepresenterade i analysdata, sannolikt på grund av att de är av mindre intresse ur prospekteringssynpunkt.

Tabell 2. Sammanställning av analyser med koncentrationen av totalsvavel i bergartsgrupper som är vanligt förekommande i den svenska berggrunden.

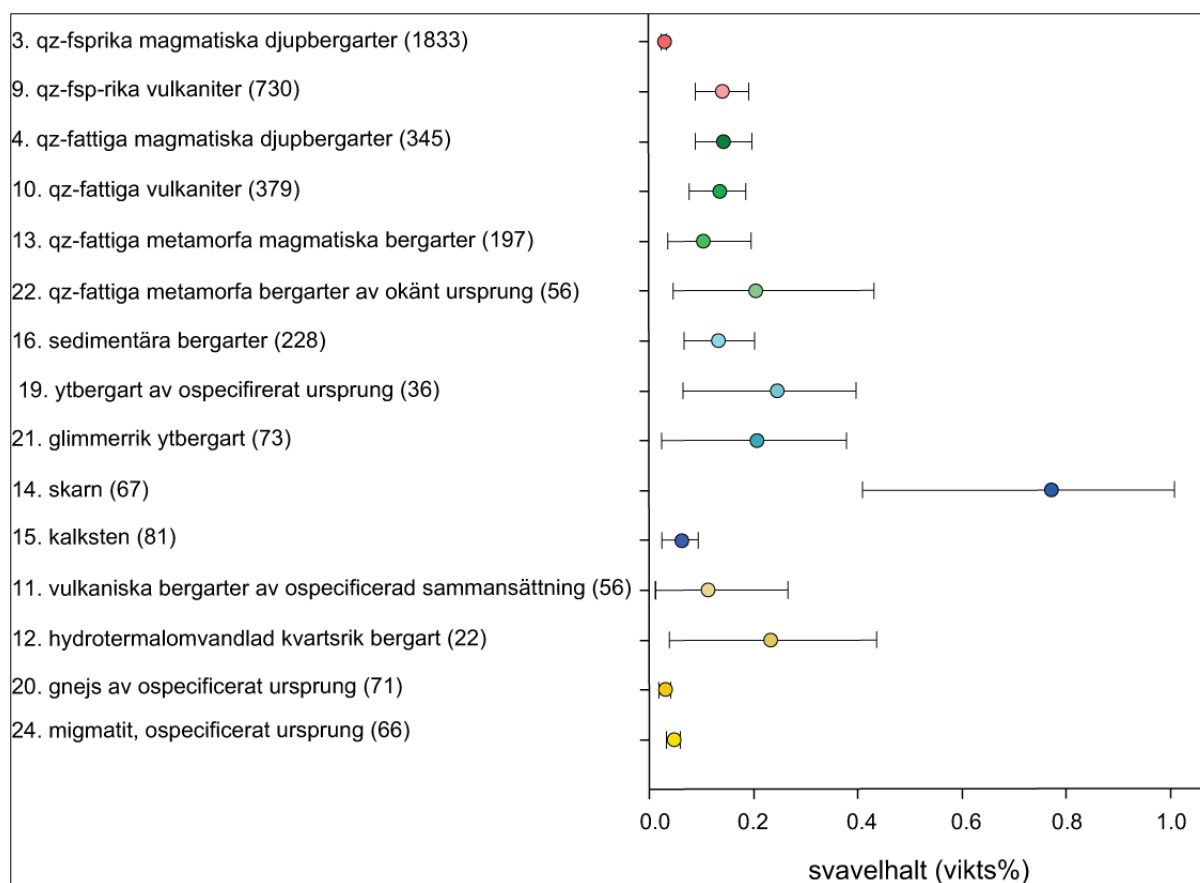
Bergartsgrupper kodade efter bergartenas ursprung. Samtliga bergartsgrupper omfattar även metamorferade och deformerade varianter. Metamorfa bergarter av okänt ursprung eller okänd sammansättning har kodats separat.	Kod	Ytor i berggrunds-kartan %	n	Aritmetisk medelvärde	95% confidence interval of arithmetic mean	95% confidence interval of arithmetic mean	median	min	max	5-percentile	10-percentile	25-percentile	75-percentile	90-percentile	95-percentile	Bootstrap estimate of sample mean	Bootstrap estimate of median	Bootstrap estimate of mode	Bootstrap estimate of upper quartile
Bergarter av magmatiskt ursprung																			
Kvartsrikare magmatiska bergarter (över 5% modal kvarts eller över 52 vikt% SiO₂)																			
Kvartsrik magmatisk djupbergart (granit, granodiorit, monzonit)	3	53	1833	0,03	0,03	0,04	0,01	0,00	2,10	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08	333	0,03	0,02	0,04
Kvarts-fältspatrik vulkanisk bergart (trösk, dykt)	3	7	730	0,14	0,09	0,20	0,01	0,01	17,35	0,01	0,01	0,01	0,02	0,26	0,75	333	0,14	0,09	0,19
Kvartsfattiga magmatiska bergarter (under 5% modal kvarts eller under 52 vikt% SiO₂)																			
Kvartsfattig magmatisk djupbergart (gabbro, diabas m.m.)	4	4	245	0,14	0,09	0,20	0,06	0,01	8,34	0,01	0,01	0,02	0,12	0,21	0,31	333	0,14	0,09	0,20
Kvartsfattig vulkanisk bergart (basalt, andosit)	10	3	373	0,14	0,06	0,19	0,02	0,01	7,07	0,01	0,01	0,01	0,06	0,21	0,51	333	0,14	0,06	0,19
Kvartsfattig bergart, ospecificerat ursprung	13	<1	197	0,10	0,01	0,20	0,01	0,01	3,40	0,01	0,01	0,01	0,05	0,15	0,26	333	0,10	0,04	0,20
Kvartsfattig metamorf bergart (amfibolit, eklogit m.m.)	22	1	56	0,20	-0,02	0,43	0,03	0,01	6,18	0,01	0,01	0,01	0,13	0,18	0,61	333	0,20	0,05	0,43
Magmatiska djupbergarter med varierande kvarts-fältspatrinnehåll																			
Alkalisk magmatisk djupbergart (sodalisyte)	5	<1	4	0,04			0,05	0,01	0,07										
Karbostråk djupbergart	6	<1	5	0,61			0,27	0,01	2,30										
Magmatisk blandbergart (hybridbergart)	7	<1	0																
Magmatisk djupbergart, ospecificerad sammansättning	8	<1	4	0,02			0,01	0,01	0,03										
Bergarter av sedimentärt ursprung																			
Sedimentär bergart med ursprung ur mer sandiga sediment (sandsten, gråvacka)	16	18	228	0,14	0,07	0,20	0,01	0,01	4,54	0,01	0,01	0,01	0,04	0,20	0,46	333	0,13	0,07	0,20
Sedimentär bergart med ursprung ur mer leriga sediment (leriga sediment, lerkliffer, silsten)	17	<1	7	0,41			0,02	0,01	2,38										
Ytbergart, ospecificerad sammansättning och ospecificerat ursprung	19	<1	36	0,25	0,06	0,44	0,02	0,01	1,89	0,01	0,01	0,01	0,07	1,41	1,66	333	0,25	0,07	0,40
Glimmerrik metamorf ytbergart (fyllit, skiffer, paragnejs)	21	7	73	0,14	0,00	0,40	0,01	0,01	6,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,09	0,78	333	0,21	0,03	0,38
Karbonatiska sedimentära bergarter																			
Karbostråk sedimentär bergart (kalksten, dolomit, marmor)	15	3	81	0,06	0,03	0,10	0,01	0,01	1,13	0,01	0,01	0,01	0,02	0,12	0,36	333	0,06	0,03	0,09
Metamorfa bergarter av ospecificerat ursprung eller																			
Vulkanisk bergart, ospecificerad sammansättning	11		56	0,11	-0,04	0,26	0,01	0,01	4,10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,45	333	0,11	0,01	0,27
Kvartsrik bergart, ospecificerat ursprung	12		22	0,24	0,01	0,46	0,01	0,01	2,05	0,01	0,01	0,01	0,21	0,83	1,53	333	0,23	0,04	0,44
Kvarts-fältspatrik metamorf bergart (gnejs, granitisk gnejs)	20	0,3	70	0,03	0,02	0,04	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,01	0,04	0,07	0,13	333	0,03	0,02	0,04
Metamorf bergart, ospecificerad sammansättning (migmatit, mylonit, granofels)	24	0,3	66	0,05	0,03	0,06	0,03	0,01	0,41	0,01	0,01	0,01	0,06	0,10	0,11	333	0,05	0,03	0,06
Ospecificerad bergart	25		12	0,08			0,04	0,01	0,35										
Kemiskt bildade eller omvandlade bergarter																			
Kalksilikatbergart av ospecificerat ursprung (skarn)	14	<1	67	0,77	0,48	1,07	0,08	0,01	5,01	0,01	0,01	0,01	1,16	2,86	3,13	333	0,77	0,41	1,01
Kemiskt bildad bergart	18		2																
Hydrotermalometadid bergart	23		3																

De flesta bergartsgrupperna uppvisar en stor spridning i svavelhalt. Grupperna uppvisar inte normalfördelningar utan merparten av data har en asymmetrisk frekvensfördelning. Enstaka värden är väldigt höga, avvikande värden (outliers). Detta illustreras av att många av populationernas medelvärden hamnar ovanför den övre kvartilen (Q₃) i respektive låddiagram (figur 3).



Figur 3. Låddiagram som visar fördelning av totalsvavel i utvalda bergartsgrupper. Observera den skeva fördelningen av totalhalter som illustreras med höga medelvärden och låga medianvärden i de flesta grupperna.

Eftersom data i de olika bergartsgrupperna tydligt uppvisar asymmetrisk fördelning är det mer lämpligt att redovisa populationens spridning, och särskilt dess högre värden, utifrån percentilindelning. En indelning av data för svavelhalter hos de olika bergartsgrupperna i percentiler åskådliggörs i låddiagrammet i figur 3. Fördelningen i percentil 5, 25, 75, 90 och 95 för de olika bergartsgrupperna anges även i tabell 2. Svavelhalterna varierar mycket både inom och mellan grupperna. Eftersom ingen av grupperna uppvisar enkel normalfördelning av data är inte gruppernas aritmetiska medel- och medianvärden illustrativa för fördelning av data. Många bergartsgrupper har en stor andel uteliggare med förhöjda värden (figur 3) och har medelvärden som avviker kraftigt från medianvärdet. För vissa bergartsgrupper ligger medelvärdet långt över 75-percentilen och för många grupper även över 90-percentilen (grupp 9, 10, 16, 19, 21, 15 och 11). Figur 4 visar bootstrapmedelvärden för data från bergartsgrupperna med 95 % konfidensintervall (biasjusterade). I denna analys görs inga antaganden om fördelningen av data inom gruppen, varför data inte behöver vara normalfördelad. Ett stort konfidensintervall visar att det är stor variation i data, men inte hur fördelningen ser ut. Bergartsgrupper av ospecificerat ursprung eller sammansättning visar störst variation i data (största konfidensintervallen), t.ex. grupperna 12, 14, 19, 21 och 22.



Figur 4. Fördelning av medelvärden med 95 % konfidensintervall för svavelhalt i vikt% från bootstrapanalys av data för utvalda bergartsgrupper. Observera skillnaden i konfidensintervall mellan de olika bergartsgrupperna.

Nio av de 14 bergartsgrupper vars data har analyserats i detalj visar svavelhalter vid eller under detektionsgränsen på 0,01 vikt%. Detta illustreras i figur 3 genom att medianvärdet för dessa prover sammanfaller med botten av stapeln (den nedre kvartilen) och lägsta värdet på 0,01 vikts% svavel (detectionsgränsen för analyserna). De nio bergartsgrupperna utgör ytmässigt nära 90 % av den svenska berggrunden (tabell 2, figur 1).

Kvartsfattiga magmatiska djupbergarter (grupp 4) och tre av bergartsgrupperna av okänt ursprung eller sammansättning: kalksilikatbergarter (skarn, grupp 14), kvartsfältspatbergarter av okänt ursprung (grupp 12) och migmatit av ospecificerat ursprung (grupp 24) har lägre andel lägsta värden. Svavelinnehåll i dessa grupper beskrivs därför mer i detalj nedan.

Kvartsfältspatrika bergarter av magmatiskt ursprung

Gruppen kvartsfältspatrika magmatiska djupbergarter (grupp 3 och 9) har genomgående låga svavelhalter och färre uteliggare med höga halter (figur 3-4, tabell 2). I denna bergartsgrupp ingår graniter samt granitoida och syenitoida bergarter som granodiorit, monzonit, och tonalit, liksom metamorfa varianter av dessa bergarter. Bergartsgruppen dominerar berggrunden arealmässigt (53 % av ytan i kartmodellen, figur 1, tabell 2). Ytbergarter med liknande sammansättning, kvartsfältspatrika vulkaniter (grupp 9) som upptar 7 % av ytan i kartmodellen, har också en stor andel prov med låga halter svavel. Denna grupp har dessutom en stor andel uteliggare med höga halter. I låddiagrammet i figur 3 indikeras detta genom ett medelvärde som ligger långt ovanför både övre kvartilen och övre morrhåret. I bootstrapanalysen i figur 4 framträder skillnaderna i andelen uteliggare och deras svavelhalt mellan de kvartsfältspatrika yt- och djupbergarterna tydligt.

Kvartsfattiga bergarter av magmatiskt ursprung

Gruppen kvartsfattiga magmatiska bergarter (gabbro, diabas, basalt och metamorfa varianter av dessa, grupp 4, 10, 13 och 22) har genomgående något förhöjda svavelhalter jämfört med berggrunden i genomsnitt. Medelvärdena för svavel ligger i intervallet på 0,10–0,20 vikt% (tabell 2). Dessa bergarter har en viss andel uteliggare, men inte så extremt som för de kvartsfältspatrika vulkaniska bergarterna. I figur 3 illustreras detta med att det aritmetiska medelvärdet för de kvartsfattiga magmatiska bergarterna ligger ovanför övre kvartilen (75:e percentilen), men inom eller i nära anslutning till övre morrhåret. De kvartsfattiga djupbergarterna (grupp 4) sticker ut något från de andra kvartsfattiga magmatiska bergarterna genom att ha en liten andel analyser med mycket låga svavelhalter som ligger på eller under detektionsgränsen. Det är den enda bergartsgruppen som har ett värde över 0,01 vikt% redan i den 25:e percentilen (tabell 2). Detta illustreras även i figur 3 där den nedre begränsningen av "morrhåret" för grupp 4 plottar ovanför lägsta värdet på 0,01 vikt %. Medelvärdena för denna bergartsgrupp ligger på 0,14 vikt% (både aritmetiska och bootstrap) och inom samma intervall på 0,10–0,20 vikts% svavel som de andra kvartsfattiga magmatiska bergarterna (grupp 10, 13 och 22, tabell 2). Kvartsfattiga metamorfa bergarter av okänt ursprung (grupp 22) har högre medelvärde än de andra kvartsfattiga magmatiska bergarterna.

Silikatrika bergarter av sedimentärt ursprung

Silikatrika bergarter av sedimentärt ursprung och metamorfa varianter av dessa (grupp 16, 17, 19 och 21) är bergartsgrupper med stor inbördes variation i svavelhalt. De har en stor andel analyser med låga svavelhalter på detektionsgränsen (0,01 vikt%), låga medianvärden och låga halter upp till 75-percentilen, men samtidigt relativt höga medelvärden (tabell 2). De har höga halter i 90-percentilen och i låddiagrammet i figur 3 ligger samtliga medelvärden högt ovanför övre morrhåret. Detta indikerar stor spridning i analysdata och en stor andel uteliggare med höga svavelhalter. I likhet med de kvartsfattiga magmatiska bergarterna av ospecificerat ursprung (grupp 22) har de sedimentära bergarterna av ospecificerat ursprung (grupp 19 och 21) större andel analyser med högre svavelhalter. De silikatrika bergarterna av sedimentärt ursprung har bildats på liknande sätt genom att sediment har avsatts i vatten och cementserats (litifierats). Bergartsgrupperna skiljs åt inbördes av kornstorleken på ursprungsmaterialet, d.v.s. om det sedimentära ursprungsmaterialet var lera, silt, sand eller grus samt graden av metamorfos. Ställvis förhöjda svavelhalter i dessa bergartsgrupper kan bero på att ursprungsmaterialet har avsatts i syrefattiga miljöer där rester av organiskt liv har bevarats under merparten av Prekambrium i form av blågröna alger (en övergångsform mellan alger och bakterier) och från och med Kambrium även som flercelliga organismer. Med tiden har geologiska och kemiska processer omvandlat resterna av organiskt material till grafit och sulfider och skapat sulfidrika horisonter i berggrunden.

Skiffrar kan innehålla höga halter svavel. Av den kvalitetsklassade data som använts i denna studie finns endast enstaka analyser av skiffrar (grupp 17, sedimentär bergart med ursprung ur mer leriga sediment, tabell 2). Merparten av dessa motsvarar Prekambriska (Paleoproterozoiska) metasedimentära bergarter i norra Sverige. Det finns inga analyser av bergarter som har kodats som alunskiffrar.

Karbonatrika sedimentära bergarter

Kalkstenar och metamorfa varianter av dessa (bergartsgrupp 15) har generellt lägre svavelhalter (låga medelvärden) och få ytterlighetsvärden, varav de flesta ligger långt under 0,5 vikt% (90-percentilen ligger på 0,12 vikt% svavel). I likhet med de flesta andra bergartsgrupperna ligger medianvärdet på detektionsgränsen (0,01 vikt%), medan medelvärdena plottar ovanför 75:e percentilen i låddiagrammet i figur 3. I denna bergartsgrupp har de flesta prover låga svavelhalter.

Metamorfa bergarter av ospecificerat ursprung eller sammansättning och kemiskt bildade eller omvandlade bergarter

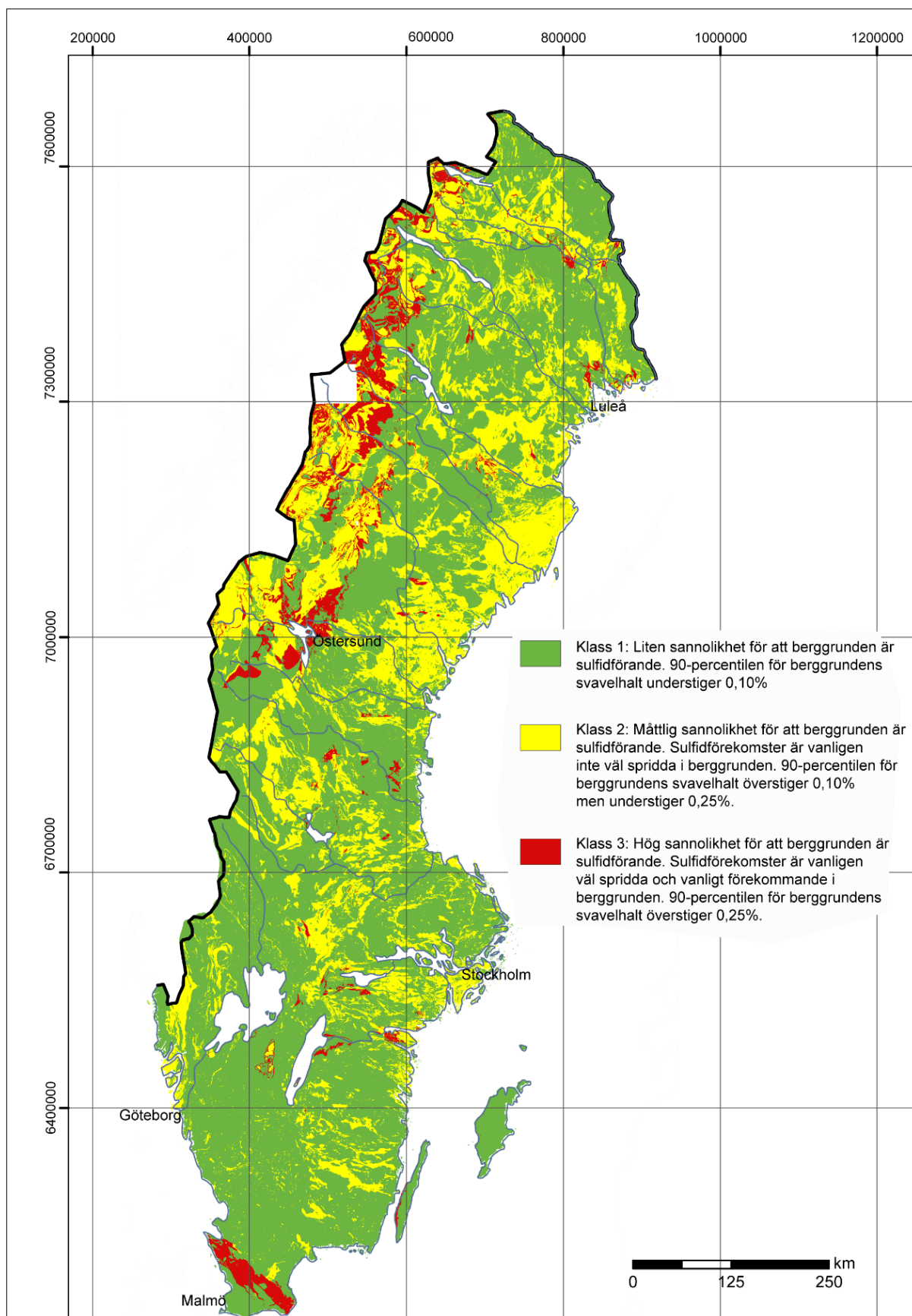
Störst variation i svavelhalt visar bergartsgrupperna med ospecificerad sammansättning eller av ospecificerat ursprung (grupperna 11, 12, 14, 20 och 24). Av dessa är det endast vulkaniska bergarter av okänt ursprung (grupp 11) som har ett medelvärde högre än 75:e percentilen (ovanför övre kvartilen, figur 3). Detta indikerar att bergartsgruppen har stor andel prov med låga svavelhalter och mindre andel med höga svavelhalter. För övriga bergartsgrupper (12, 14, 20 och 24) hamnar medelvärdet inom den övre kvartilen (75-percentilen). Två av dessa, bergartsgrupp 20 och 24, som omfattar gnejs och migmatit, d.v.s. metamorfa bergarter som har omvandlats under höga temperaturer, har låga svavelhalter och endast enstaka uteliggare. De övriga två bergartsgrupperna kalksilikatbergart av ospecificerat ursprung (skarn, grupp 14) och kvartsrik bergart av ospecificerat ursprung (grupp 12) har hög andel förhöjda svavelhalter. Högst svavelhalter har skarnbergarterna i grupp 14 som också har högst svavelhalter av alla bergartsgrupper i databasen (medelvärde närmare 0,8 vikt%, 75-percentilvärde på 1,16 vikt%). Denna bergartsgrupp uppträder i hydrotermalomvandlade bergarter, oftast då en kalksten reagerar med en intruderande magma. De kan också bildas vid hydrotermalomvandling av kalciumrika kvartsfattiga magmatiska bergarter som diabas och gabbro (t.ex. bildning av s.k. rodingit). Både bergartsgrupp 12 och 14 är bildade genom hydrotermala processer, vilka kan associera med mineraliseringar. I Sverige är många malmfyndigheter lokaliserade till skarnförekomster. Det är oklart om de höga svavelhalterna i analyserna för dessa bergartsgrupper speglar riktad provtagning av potentiellt mineraliserad berggrund och i vilken grad analyserna är representativa för bergartsgrupperna i sin helhet. De är till ytan mycket begränsade och förekommer oftast i begränsade stråk som tillsammans täcker mindre än 1 % av ytorna i berggrundskartan. Skarnmineraliseringar har i många kartläggningsprojekt redovisats på berggrundskartan med överbeteckningar då de uppfattats som förekommande i smalare stråk och inte i större sammanhängande ytor. Därför utgör sådana mineraliseringar inte nödvändigtvis några egna berggrundsytor i kartbilden, men kan likväl förekomma i berggrunden.

En generell trend i databasen är att bergarter av okänt eller odefinierat ursprung och sammansättning har högre andel förhöjda svavelhalter. Att information om ursprung och sammansättning saknas beror ofta på att bergarten har omvandlats genom deformation, metamorfos eller hydrotermalomvandling så till den grad att ursprungliga bergartsegenskaper inte är urskiljbara. I dessa bergartsgrupper är det större sannolikhet att höga svavelhalter härrör från metasomatiska processer.

3.1.5 Klassificering av sulfidförande berggrund

Utifrån svavelanalyserna i databasen har klassificering av sannolikheten för olika bergartsgruppers benägenhet att vara sulfidmineraliserad genomförts. Klassificeringen baseras på Europakommissionens angivna begränsningsvärden (EU-kommissionen (2009/359/EG).

Resultatet från klassificeringen illustreras i en kartbild (figur 5). Utfallet i de olika klasserna presenteras nedan.



Figur 5. Regional klassificering av den svenska berggrunden för sannolik förekomst av sulfidförande berggrund. Bergrundsytornas utbredning baseras på SGU:s berggrundskartdatabas i skala 1:50 000-1:250 000.

Liten sannolikhet för sulfidmineraliserad berggrund

Om en bergartsgrupps 90:e percentil underskrider 0,1 % svavel har bergarterna i gruppen kategoriserats som att sannolikheten för förhöjda svavelhalter är liten. Bergartsgrupper vars 90-percentilvärde underskrider 0,1 % svavel är kvartsfältspatrika magmatiska djupbergarter (grupp 3), vulkaniska bergarter med ospecificerad sammansättning (11), karbonatrika, sedimentära bergarter (15), kvarts-fältspatrika omvandlade bergarter (20), glimmerrika omvandlade bergarter (21) och omvandlade bergarter av ospecificerad sammansättning (24). Tillsammans täcker dessa bergarter knappt två tredjedelar av ytorna i berggrundskartan.

Måttlig sannolikhet för sulfidmineraliserad berggrund

Bergartsgrupper vars 90:e percentil för svavelhalt överstiger 0,10 % men understiger 0,25 % har kategoriserats som att de har en måttlig risk att innehålla förhöjda svavelhalter. Eventuella sulfidförekomster är vanligen inte väl spridda inom den här berggrunden som omfattar kvartsfattiga magmatiska bergarter (4, 10, 13 och 22), kvartsfältspatrika vulkaniter (9) och kvartsfältspatrika bergarter av sedimentärt ursprung (16). Tillsammans täcker dessa bergarter knappt en tredjedel av ytorna i berggrundskartan.

Förhöjd sannolikhet för sulfidmineraliserad berggrund

Bergarter vars 90-percentil för svavelhalt överstiger 0,25 % har kategoriserats som att sannolikheten för att de innehåller sulfidförande berggrundsenheter är förhöjd. Sulfidförekomst är vanligen väl spridd och vanligt förekommande inom de här bergartsgrupperna som alla är klassificerade som bergart av ospecificerat ursprung i databasen. I denna kategori ingår kvartsrika bergarter av ospecificerat ursprung (12); kalksilikatbergart av ospecificerat ursprung (skarn, 14) samt ytbergart av ospecificerad sammansättning och ospecificerat ursprung (19). Tillsammans täcker dessa bergarter mindre än 5 % av ytorna i berggrundskartan.

3.1.6 Sammanfattande kommentarer

Utvärderingen av sulfidförekomster i den svenska berggrunden är starkt styrd av tillgången på analysdata. Antalet analyser varierar kraftigt mellan olika bergartsgrupper och i olika områden i Sverige (figur 2). Det är också viktigt att notera att analysdata inte är normalfördelade. De flesta bergartsgrupper uppvisar stor skevhet i fördelning av data, med en stor andel analyser med låga halter svavel på eller nära detektionsgränsen för analysen och ett mindre antal analyser med höga halter svavel. Underlaget kan användas för en översiktlig prognostisering av förväntat sulfidinnehåll i en bergartsenhet, men kan inte användas i detaljskala, exempelvis för bedömning av sulfidinnehållet i ett specifikt bergartsprov.

Sannolikhetskartan för sulfidförekomst är en översiktlig, tillämpad karta där kvalitetsklasserna indikerar sannolikheten för eventuell förhöjning av svavelinnehåll i berggrunden. Flera av berggrundsensheterna är att betrakta som mycket heterogena med avseende på mineralsammansättning och omvandlingsgrad. Inom en och samma bergartsgrupp förekommer både välbevarade led och kraftigt deformerade, metamorfoserade och ådergnejsiga varianter. Förekomsten av potentiellt pH-neutraliserande berggrund, t.ex. karbonatbergarter, är också ojämnt fördelad. Av denna anledning bör sannolikhetskartan användas vid inledande regionala undersökningar och endast för riskbedömning i regional skala. Kartmodellen är uppbyggd från kartdata för presentationsformat i skala mellan 1:50 000 och 1:250 000. All användning av kartmodellen mer detaljerat är förknippat med stora felkällor.

3.2 Anrikning av sulfidmineral i samband med bergmaterialproduktion

3.2.1 Inledning

Delprojektets syfte var att studera potentiell anrikning av sulfidmineral i samband med produktion av olika krossprodukter. Erfarenhet från malmanrikningsprocesser visar att krossningens funktion är att blotta och frigöra malmmineralen från omgivande bergmassa för att öka deras reaktivitet och möjlighet att utvinnas (Wills & Finch, 2016).

Krossning av bergmaterial till olika krossprodukter fyller delvis malmkrossningens funktion genom att frigöra de i bergmassan ursprungliga fastbundna sulfidmineralen i krossproduktens finfraktion och därmed öka deras koncentration och reaktivitet (Wills & Finch, 2016). Konsekvenserna av krossningsförfarandet blir accelererad oxidation av finfraktionens sulfidmineral som vid kontakt med perkolerande vatten kan ge upphov till förurning och utsläpp av metaller till recipienten.

Utgångspunkt för delprojektet är att det svavelinnehåll som finns i bergmaterial och som inte exponerats för syre kan antas bestå i stort sett uteslutande av sulfidmineral. Fördelning av sulfidmineral mellan olika storleksfraktioner kan följaktligen följas genom analys av total svavelhalt.

En viktig fråga var att undersöka hur reaktivitet med avseende på sulfidoxidation varierar med ökande partikelstorlek hos krossmaterialet.

3.2.2 Laboratorieförsök, metodik och genomförande

Med utgångspunkt från erfarenheter från mineralteknikområdet att sulfidmineral anrikas vid krossning och malning i de finaste fraktionerna (Wills & Finch, 2016) undersöktes fördelning av svavel mellan fin- (0/1 mm) och grovfraktion (1/32 mm) i krossprodukter. Försöket genomfördes på tre prov D7, D10 och D11 av sulfidförande krossprodukter.

Siktkurvor med kornstorleksfördelning framställdes för varje prov. Fraktioner 0/1 och 1/32 mm separerades. Fraktionen 1/32 mm nedkrossades vidare till kornstorlek 0/1 mm. Båda fraktionernas (0/1 mm och 1/32 mm krossad till 0/1 mm) svavelhalt bestämdes med hjälp av handhållen XRF och med varje mätning upprepade tre gånger. Resultatet från mätningarna redovisas i tabell 3.

Grovfraktionens 1/32 mm totala svavelhalt fördelades på fraktioner 1/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm och 16/32 mm efter deras viktandel i respektive kornstorleksfördelningskurva. På så sätt erhöles svavelfördelning med ökande kornstorlek i krossprodukten. Genom att jämföra svavelhalten i fraktionen 0/1 mm med de i grovfraktion 1/32 mm ingående delfraktionerna erhöles information om anrikning av sulfidmineral i finfraktionen 0/1 mm.

Sulfidmineraliseringens kornstorleksvariation bedömdes med hjälp av SEM (Svepelektronmikroskopi).

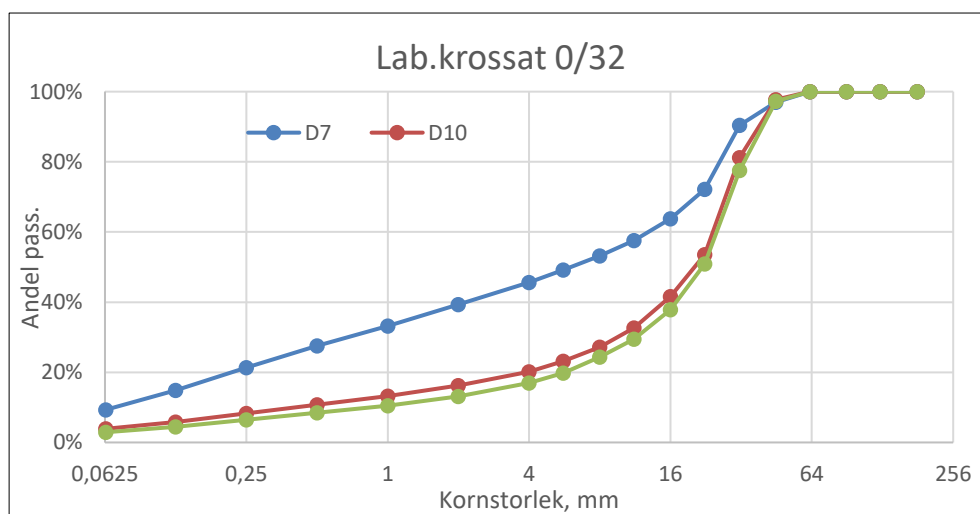
3.2.3 Resultat

För två av de tre testade materialen var svavelhalterna betydligt högre i fraktion 0/1 mm än i 1/32. I det tredje fallet uppmättes högre halt i den grövre fraktionen (tabell 3).

Tabell 3. Koncentration av svavel (mass%) i fraktion 0/1 mm och 1/32 mm.

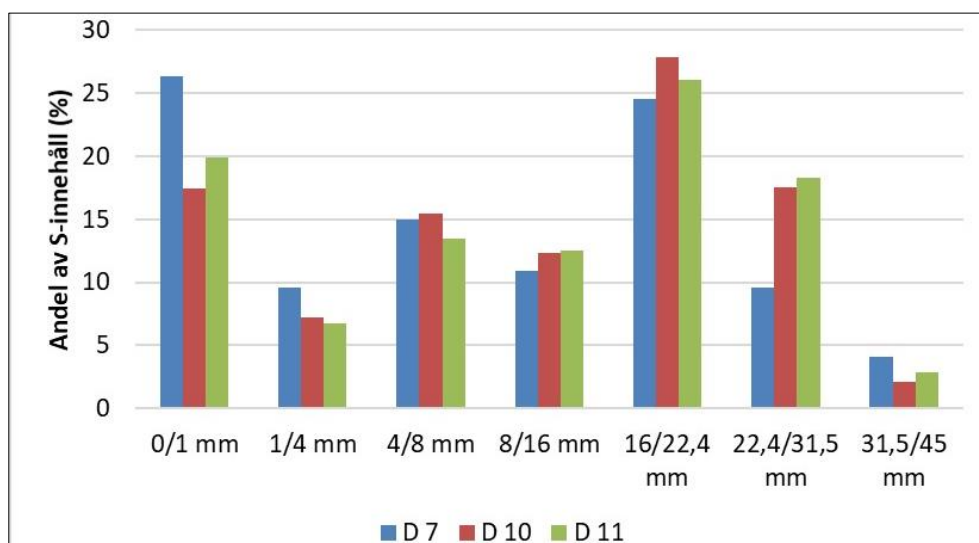
Prov-ID	Fraktion 0/1 mm (mass%)	Fraktion 1/32 mm krossad till 0/1 mm (mass%)
D7	0,553	0,943
D10	0,760	0,583
D 11	1,490	0,793

För att beräkna hur innehållet av svavel fördelas mellan kornstorleksfraktionerna i krossmaterialet kombinerades haltfördelningen med kornstorleksfördelningen för de tre materialen (figur 6). Finfraktion (0/1 mm) utgör 33 % i prov D7 och 13 % respektive 11 % i prov D10 och D11.



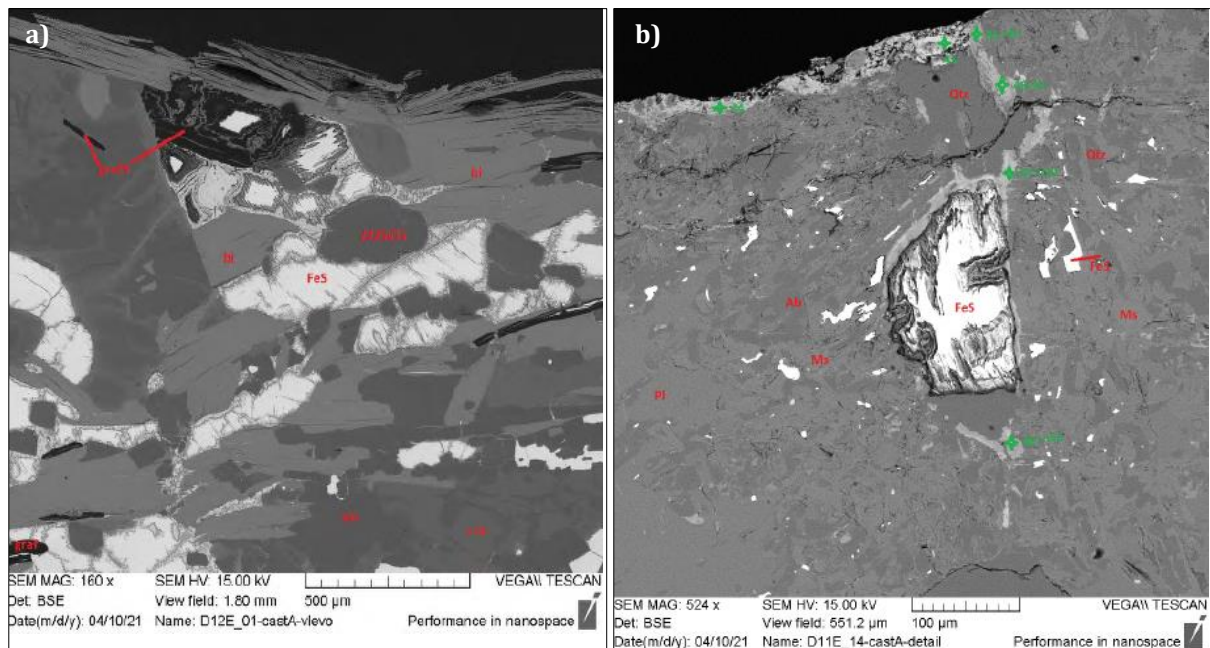
Figur 6. Kornstorleksfördelning i prov D7, D10 och D11.

Även om den uppmätta svavelhalten i finfraktion i prov D7 är lägre än i grovfraktion finns så mycket som 26 % av allt svavel i 0/1 mm. För proven D10 och D11 gäller att trots den låga massandelen finfraktion (13 % respektive 11 %) finns 17 % respektive 20 % av svavlet i denna fraktion (figur 7). Detta ligger i linje med vad som är känt från mineralteknik (Wills & Finch, 2016).



Figur 7. Fördelning av svavelinnehåll över olika storleksfraktioner i prov D7, D10 och D11.

Från figur 8 framgår att sulfidmineralens kornstorlek varierar mellan <0,002 och 0,5 mm.



Figur 8. Kornstorleksvariation hos sulfidmineralisering (FeS, vit) i prov a) D7 och b) D11.

Uppskattning av sulfidernas minskande reaktivitet med ökande kornstorlek

Oxidation av sulfidmineral (syrabildning) kan endast ske där de exponeras för luftens syre, d.v.s. på sulfidmineralens ytor. Som framgår av figur 8 ligger sulfidmineralens kornstorlek inom intervallet <0,002 mm-0,5 mm. Det innebär att sulfider i grövre krossfraktioner utgörs av kristaller av sulfidmineral inneslutna i en matris bestående av silikater. Dessa sulfidmineral är därför inte tillgängliga för oxidation. Det innebär i praktiken att krossprodukter i grova fraktioner bidrar till syrabildning endast i mycket begränsad omfattning. Genom att beräkna den specifika ytarean kan reaktiviteten hos krossmaterial av olika kornstorlek uppskattas. Från tabell 4 framgår tydligt hur den specifika ytarean ökar kraftigt med minskande kornstorlek. I tabellen jämförs den specifika ytarean för olika kornstorlekar med ytarean för en 1 mm partikel. Exempelvis är den specifika ytarean ca 16 gånger större för en 0,063 mm-partikel än en 1 mm partikel. Om en partikel i finfraktion 0,063 mm jämförs med en partikel med storlek 32 mm, blir den uppskattade reaktiviteten ca 500 gånger högre för 0,063 mm-partikeln.

Tabell 4. Relation mellan krosspartikelns ytarea och volym uttryckt i specifik area och sulfidernas potentiella reaktivitet.

Partikeldiameter (mm)	Ytarea (mm ²)	Volym (mm ³)	Ytarea/volym (mm ² /mm ³)	Specifik ytarea (m ² /g)	Specifik ytarea i relation till partikeldiameter 1 mm
0.002	0.000013	0.0000000042	3000	107	50000%
0.063	0.0125	0.00013	95	3.40	1587%
0.25	0.196	0.01	24	0.86	400%
0.5	0.785	0.07	12	0.429	200%
1	3.14	0.52	6	0.214	100%
2	12.6	4.19	3	0.107	50%
4	50.3	33.5	2	0.0536	25%
8	201	268	1	0.0268	13%
11.3	401	756	1	0.0190	8.8%
16	804	2145	0.375	0.0134	6.3%
31.5	3117	16366	0.190	0.00680	3.2%
63	12469	130925	0.095	0.00340	1.6%
90	25447	381704	0.067	0.00238	1.1%
150	70686	1767150	0.040	0.00143	0.7%

3.2.4 Utvärdering och slutsatser

Försökets resultat visar att:

1. Det faktum att sulfidpartiklarna anrikas och frigörs i krossmaterialets finfraktion 0/1 mm ökar både deras koncentration och specifika yta och därmed finfraktionens reaktivitet (tabell 4).
2. Från tabell 4 framgår att krossmaterialets reaktivitet (sulfidoxidation) avtar markant med ökad kornstorlek.

Sammanfattnings kan sägas att laboratorieförsöket stöder teoretiska antaganden baserade på exempelvis Wills & Finch (2016) om sulfidanrikning i finfraktionens kornstorleksområde 0/1 mm och med det ökning av dess reaktivitet samt minskning av krossmaterialets reaktivitet med ökande partikelkornstorlek. Det innebär att bedömning av ett bergmaterials syrabildande förmåga även ska innefatta vilken storleksfraktion som ska användas.

3.3 Undersöknings-, provtagnings- och provberedningsmetoder

3.3.1 Introduktion

Eftersom huvudprojektets mål är att utveckla ett säkert system för bedömning av sulfidförande bergmaterialens miljöpåverkan spelar delprojektet "Undersöknings-, provtagnings- och provberedningsmetoder" en viktig, om inte avgörande, roll i sammanhanget. Felaktig bedömning av sulfidmineraliseringens karaktär och utbredning kombinerat med icke representativ provtagning kan föröda projektets slutliga resultat.

3.3.2 Inledande undersökning

Syftet med en inledande studie är att göra en initial översiktlig bedömning om objektets berggrund kan vara potentiellt sulfidförande och i behov av vidare undersökningar. Inledningsfasen utgörs av två steg bestående av en regional och en platsspecifik studie.

Regional studie

För primär bedömning av sulfidförande bergmaterialets regionala förekomst utvecklade projektet genom SGU utredningsteam en översiktskarta baserad på äldre och nya totalsvaveldata hos i Sverige förekommande utvalda bergartsgrupper (delprojekt 1). Kartans klassificering vilar på europeiska begränsningsvärden (EU-kommissionen (2009/359/EG). Utöver kartans information bör också tidigare gjorda utredningar inom intresseområdet studeras. En regional studie ger vägledning om behov och omfattning av fortsatta platsspecifikt inriktade arbeten.

Platsspecifik studie

Under den platsspecifika studien studeras underlagsmaterial i form av kartunderlag såsom berggrunds-, jordarts- och jorrdjupskartor, topografiska kartor, ortofoto m.fl., olika tillgängliga databaser samt eventuella tidigare genomförda utredningar, analyser, befintliga detaljplaner och planerad hantering av bergmaterial utvunnet från det aktuella objektet. Om massorna redan är avlägsnade från moderlokalen bör deras ursprung identifieras i den mån det är möjligt.

Undersökningsobjekten kan utgöras av:

- ✓ Fast, ostörd berggrund (tunnelsträcka, bergmaterial i väg- och järnvägslinje, utökning eller nyetablering av bergtäkt, terrängsjustering av exploateringsområde etc.)
- ✓ Sprängt berg (tunnelmassor, sprängmassor från väg- och järnvägslinjelinje etc.)
- ✓ Krossade bergmaterialprodukter i upplag
- ✓ Utlagda krossade bergmaterialprodukter

Vart och ett av ovannämnda objekt kräver specifik undersöknings- och provtagningsmetod.

Resultatet från studien sammanfattas i kortfattat rapport med kartmaterial. Genom den inledande utredningen erhålls information både på regional och lokal nivå. Den inledande undersökningen ska efterföljas av fältbesiktning för bedömning av bergets/bergmaterialets eventuella sulfidmineralinnehåll och mineraliseringens spridning. Oavsett utfall från den inledande studien bör en platsspecifik fältbesiktning av aktuellt objekt genomföras.

3.3.3 Fältbesiktning

Beroende på objektets karaktär, d.v.s. om det är fast berg, sprängberg eller bergmaterial i upplag och i redan utlagda massor, måste fältbesiktningen genomföras utifrån olika förutsättningar. Platsbesökets syfte är att identifiera eventuella sulfidmineraliseringar utifrån den inledande teoretiska studien samt att dokumentera områdets övriga nödvändiga förutsättningar inför upprättande av provtagningsplan. Fältbesiktningen bör genomföras av berggrunds-/malmgeolog eller person med motsvarande kompetens och erfarenhet.

Fast berg

Platsbesiktning av fast berg krävs inför exempelvis projektering av väg, järnväg, exploatering av markområden samt vid utökning eller nyetablering av bergtäkt.

Vid platsbesöket identifieras i första hand berg i dagen som okulärt kan besiktas utan omfattande avtäckning, men även eventuella skärningar i anslutning till väg eller järnväg inom området bör inspekteras. Blottade berghällar och skärningar undersöks, karteras, och fotodokumenteras. Riktad provtagning av ytberg genomförs vid lokaler där sulfidmineral kan misstänkas uppträda, t.ex. på yta där sulfidmineral tydligt kan utskiljas okulärt, i kross- och

sprickzoner, inom områden med rostutfällning och där inledande undersökning indikerar att sulfidmineraliseringar kan förekomma. Även om det inte är uppenbart att sulfidmineral uppträder inom undersökningslokalerna ska prov tas för vidare undersökning. Proven märks och med syfte att få spårbarhet noteras provtagningsplatsen genom koordinater eller noggrann markering på kartunderlag.

Terrängförhållanden och tillgänglighet för ytterligare provtagning dokumenteras och övriga förhållanden såsom kraftiga sluttningar, överlagrade lösa avlagringar, kraftledning, myrmarker, vattendrag eller andra förutsättningar för framkomlighet och möjliggörande av vidare provtagning med borrhög dokumenteras.

Proven från fältundersökningen analyseras i första hand med hjälp av okulär- och polarisationsmikroskopi som stöd för upprättande av provtagningsplan och vidare provtagning av undersökningsområdet.

Om objektet ska undersökas med jord-bergsondering sparas och enligt anvisning undersöks provtagna borrhögprov från berget.

En sammanfattande rapport med resultat från platsbesiktningen och de inledande analyserna upprättas till grund för planering av provtagningsplanen.

Sprängt berg, bergmaterial i upplag och utlagda massor

Fältbesiktning av sprängt berg, bergmaterial i upplag eller redan utlagda bergmassor genomförs dels om massorna förmodas härröra från en lokal med känd sulfidmineraliserad berggrund, dels vid misstanke om att materialet har sitt ursprung från berggrund i ett uttagsområde som misstänks eller är verifierad som potentiellt sulfidförande. Sprängt berg, bergmaterial i upplag eller på redan utlagd yta kan bestå av material från väg- och järnvägslinje, tunnelbergmassor, bergmaterial avsett för höjdtjämnings/höjdsättning inom markexploateringsområden (losshållet, krossat, utlagt) eller sprängsten och krossade bergmaterialprodukter i bergtäkt.

Vid platsbesöket undersöks åtkomliga upplag eller utlagda ytor av bergmaterialet okulärt. Objektet karteras och fotodokumenteras. Stickprov av misstänkt sulfidförande berg uttas utifrån okulär bedömning, men även om sulfidmineralisering inte kan identifieras provtas massorna slumpvis enligt standard SS-EN 932-1 (Svenska Institutet för Standarder, 1997) för vidare undersökning. Proven märks och med syfte att få spårbarhet verifieras provtagningspunkten genom skriftliga noteringar, fotodokumentation och eventuellt bestämning av koordinater.

Terrängförhållanden och tillgänglighet för ytterligare provtagning dokumenteras och övriga förhållanden för möjliggörande av provtagning med borrhög dokumenteras.

Proven från fältundersökningen analyseras i första hand med hjälp av okulär- och polarisationsmikroskopi som stöd för upprättande av provtagningsplan och vidare provtagning av undersökningsområdet.

En sammanfattande rapport med resultat från platsbesiktningen och de inledande analyserna upprättas till grund för planering av provtagningsplanen.

3.3.4 Provtagningsmetoder

Provtagningens metod och frekvens har tillsammans med analysmetodiken avgörande betydelse för undersökningens representativitet och praktiska tillämpning.

Provtagning av fast berg

Det finns fyra vedertagna metoder för provtagning av fast berg: 1) losshållning med slägga, 2) provsprängning, 3) kärnborrning samt 4) kaxborrning och jord-bergsondering (JB-borrning).

Losshållning med slägga

Provtagning genom släggning rekommenderas endast i en inledande undersökning för att med hjälp av kvalitativa optiska undersökningar erhålla indikationer på om berget är potentiellt sulfidförande. Sulfidmineraliseringar uppträder vanligtvis ojämnt fördelade och i varierande koncentration inom hela bergmassan, både i vertikal- och horisontalled, varför metoden inte ger representativa prov. I figur 9 visas ett exempel på en bergskärning med konstaterad relativt hög koncentration av sulfidmineral och där endast provtagning av ytberg hade visat felaktiga resultat vid analys. I kombination med mineralogisk analys kan dock utvalda stickprov ge kvalitativ information om sulfidmineralens typ och kornstorlek i tidiga projektskeden.



Figur 9. Bergskärning med relativt hög koncentration av sulfidmineral i partier med rostutfällning. Mineraliseringens ojämna fördelning i bergmassan ställer stora krav på representativ provtagning. Det bör observeras att rostutfällning inte per automatik innebär att berget är sulfidförande, eftersom det i ingående bergarter kan finnas andra järnrika mineral som faller ut järn i kontakt med vatten och syre.

Provsprängning

Berg kan även provtas genom sprängning, men provtagningsfrekvensen tenderar att bli låg. Med hänsyn till mineraliseringens varierande förekomst och frekvens i både areell och i vertikal utsträckning (figur 9) bedöms sprängningsprovtagning inte vara lämplig för detta ändamål.

Kärnborrning

Genom kärnborrning är det möjligt att provta berg på djupet och därmed få representativa prov även i vertikalled. Eftersom sulfidmineral anrikas i finfraktion vid krossning är det nödvändigt att krossa borrhärdarna för vidare analyser. Kärnborrning är en dyr metod, vilket innebär att provtagningsfrekvensen ofta begränsas med sämre representativitet som följd. Då kärnborrning måste kompletteras med krossning blir metoden ännu dyrare och mer tidskrävande. Terrängförhållanden och framkomlighet för borrhärderna är av stor betydelse för lokalisering av

borrhål. Med hänsyn till sulfidmineraliseringarnas heterogena spridning både i areell och vertikal riktning krävs det ofta ett stort antal borrhov för att uppnå en representativ bedömning av det aktuella objektet. I sådana fall är borrhovprovtagning att föredra.

Kaxborrning och jord-bergsondering

Att använda kaxborrning för provtagning i varierande former av bergmaterial inom lokaliseringar med olika förutsättningar har erfarenhetsmässigt visat sig ge mycket goda resultat. Dels är metoden jämförelsevis tidseffektiv och många punkter kan provtas under relativt kort tid, dels är tekniken förhållandevis billig och ingen efterföljande krossning krävs inför vidare analyser.

Kaxborrning kan genomföras med en vanlig rigg för hammarborrning, "produktionsborrning", eller med en rigg som är avsedd för jord-bergsondering. Vilken typ av rigg som är lämplig att använda avgörs av faktorer såsom terrängförhållanden och framkomlighet, lösa avlagringars mäktighet samt planerat sprängningsdjup för etablering eller exploatering. Jord-bergsondering är att föredra om jordjupet är stort, om planerat sprängningsdjup inte är större än ca 5 m eller om terräng och omgivning kräver en rigg med bra framkomlighet. Provtagningen kan kombineras med geotekniska undersökningar i tidiga projektskeden.

Provtagning av sprängt berg, bergmaterial i upplag och redan utlagda massor

Sprängt berg

Sprängt berg kan provtas med hjälp av grävmaskin, hjullastare, kaxborrning eller eventuellt manuellt om sprängstenarna inte är så stora. Svårigheten med provtagningen är främst att få representativa prov från sprängmassorna. Standard SS-EN 932-1 (Svenska Institutet för Standarder, 1997) kan ge viss vägledning för representativiteten. Eftersom sulfidmineral anrikas i finfraktion vid krossning (Wills & Finch, 2016) är det nödvändigt att krossa sprängt berg för vidare analyser om provtagning inte sker genom kaxborrning.

Bergmaterial i upplag

Provtagning av bergmaterial i upplag sker i enlighet med standard SS-EN 932-1 (Svenska Institutet för Standarder, 1997) som i korthet innebär att prov uttas med skopa, skyffel eller gripskopa på olika ställen och på varierande höjder inom upplaget. Neddelning i fält utförs genom t.ex. kvarteringsmetoden som beskrivs i Standard SS-EN 932-1. För att öka representativiteten på proven kan åtminstone grova sorteringar i upplag provtas med hjälp av kaxborrning. I sådana fall krävs ingen neddelning i fält eftersom prov bör uttas för varje bormeter och provmängderna är i allmänhet inte stora.

Redan utlagda massor

När det gäller redan utlagda massor kan provgropar grävas för att möjliggöra representativ provtagning genom hela bergmaterialprofilen. Om massornas mäktighet är stor eller om de utlagda massorna består av grova sorteringar/fraktioner kan provtagning ske genom kaxborrning. Neddelning av prov från provgrop görs lämpligen genom kvartering (Svenska Institutet för Standarder, 1997). Neddelning av borrhovprov i fält är inte nödvändig eftersom provmängderna är i allmänhet inte stora.

Utvärdering av provtagningsmetoder

Provtagning av ytberg med hjälp av slägga bör enbart göras med syfte att få indikation på bergets potentiella sulfidmineralinnehåll i ett inledande skede och för att närmare bergartsbestämma lokaliseringens berggrund. Metoden garanterar inte att provet är representativt för hela bergmassan eftersom den inte ger upplysningar om bergets egenskaper i vertikalled.

Provsprängning är inte heller en metod som ger full representativitet på proven och dessutom är tätheten mellan provtagningspunkterna begränsad. Stor hänsyn till omgivning och lokala förutsättningar måste tas.

Kärnborrning ger representativa prov under förutsättning att kärnorna krossas inför efterföljande analyser. Borrningsmetoden är dyr, vilket innebär att provtagningsfrekvensen ofta begränsas med sämre representativitet som följd. Då kärnborrning måste kompletteras med krossning blir metoden ännu dyrare och mer tidskrävande.

Provtagning genom kaxborrning och jord-bergsondering är den metod som hittills har visat sig ha de största fördelarna. Dels är kaxborrning ekonomiskt gynnsam och repetitiv, dels är den flexibel och kan användas för provtagning i såväl fast berg som sprängberg, bergmaterial i upplag och redan utlagda massor. Provtagningsförfarandet kräver ingen neddelning i fält och ingen efterföljande krossning för vidare analyser är nödvändig. Om jord-bergsondering ska utföras kan provtagningen med fördel kombineras med geotekniska undersökningar i tidiga projektskeden

3.3.5 Framställning av provtagningsplaner

Med utgångspunkt i resultaten från den inledande undersökningen och efterföljande fältbesiktning ska en provtagningsplan framställas. Provtagningsplanens utformning beror av om det potentiellt sulfidmineraliserade berget består av fast berg eller om det förekommer som losshållet och/eller som vidareförädlad bergmaterial i upplag eller på redan utlagda ytor. Provtagningsplanen upprättas på ett kart-/planunderlag med koordinatangivelser för varje provtagningspunkt. Vid provtagning är noggrannheten på borrhöjningarna inte exakta. Om en provtagningspunkt inte är tillgänglig kan den flyttas och ifall en provtagningspunkt inte alls är möjlig att provta ska det noteras att den har utgått. Anledningen till att provtagning inte har gått att genomföra ska anges.

Fast berg

Provtagningsplanen och antal provtagningspunkter anpassas utifrån resultaten från den inledande utredningen och fältbesiktningen. Hänsyn måste tas till bl.a. genom den inledande undersökningens konstaterade frekvens av sulfidmineralisering, planerat sprängningsdjup vid etablering eller exploatering, jorddjup, omgivande terräng och framkomlighet samt motstående intressen. Inom vissa områden kan det krävas tillstånd för borrning.

Sprängt berg, bergmaterial i upplag och redan utlagda massor

Även en provtagningsplan för sprängt berg, bergmaterial i upplag och redan utlagda massor baseras på resultaten från inledande utredning och fältbesiktning. Planeringsförutsättningarna är vanligen mindre komplicerade vid provtagning av losshållet/krossat berg då massorna ofta är lokaliserade i tillgänglig terräng och delvis homogeniserade genom krossning och siktning.

De viktigaste parametrarna att ta hänsyn till i provtagningsplanen är de losshållna massornas ursprung och kornstorlek/produkt, upplagets storlek, volym och form samt utlagda massors areella utbredning och mäktighet på djupet. Grova fraktioner i upplag eller utfyllnad kan provtas genom kaxborrning eller enligt standard SS-EN 932-1 (Svenska Institutet för Standarder, 1997). Bergmaterialprodukter med andel av finfraktion provtas i enlighet med standard SS-EN 932-1. Anledningen är att grovt bergmaterial kräver krossning inför eventuella vidare undersökningar, medan det ur finare sorteringar är möjligt att sikta fram erforderlig finfraktion som krävs för efterföljande analyser.

3.3.6 Provhantering och provberedning

Provhantering

All provtagning ska medge spårbarhet för varje prov. Det innebär att provpunktens läge ska definieras i den mån det är möjligt, t.ex. genom att mäta in koordinater eller att noga markera provtagningsplatsen på en karta. Även provtagningspunkter i upplag och av redan utlagda bergmassor ska dokumenteras. Proven ska märkas tydligt med ett system som gör det möjligt att spåra det till provtagningspunkten. Provkärnen eller provpåsarna ska förslutas väl, märkas med läsbar text och med permanent penna samt emballeras omsorgsfullt inför transport till analyslaboratorium. Märkningen måste tåla eventuell väta, nödvändig hantering och den ska vara läsbar efter transport.

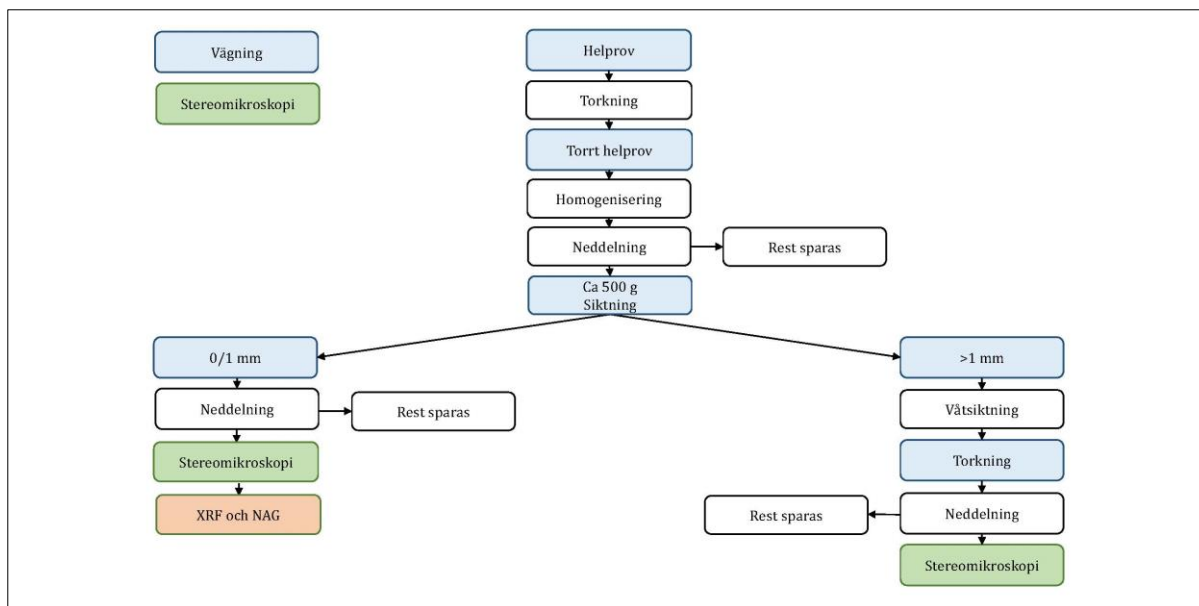
Vid provtagning genom kax- och jord-bergborrning gäller också:

- ✓ Undvik inblandning av lösa avlagringar. Jord stör kaxproven och kan ge felaktiga analysvar.
- ✓ Samla borrhaxprov från varje meter vid vardera provpunkten.
- ✓ Allt borrhax som är möjligt att omhändertas från varje bormeter samlas in.
- ✓ Borrhaxproven samlas enklast in i tjocka plastpåsar av typen provtagningspåsar för jord.
- ✓ Förslut påsarna väl, gärna med buntband.
- ✓ Varje provpåse ska märkas med borrhaxnummer och djup.
- ✓ När provpåsarna skickas för vidare analys ska de paketeras väl emballerade och förslagsvis i hinkar med lock på pall med bottenkiva, "lock" och pallkrage.

Provberedning

Provberedning av alla typer av provtaget material förutsätter att proven är krossade och innehåller representativ andel finfraktion. Borrhax likställs med krossat bergmaterial.

Provberedningen består av vägning, torkning, neddelning, siktning till fraktionerna 0/1 mm och >1 mm. Våtsiktning/tvättning och torkning genomförs på material >1 mm. Rå- och torrsvikt för helproven registreras och fuktkvot beräknas. Siktning och neddelning sker i enlighet med standarderna SS-EN 932-2 och SS-EN 933-1 (Svenska Institutet för Standarder, 1999; 2012). Hela provberedningsförfarandet visas schematiskt i figur 10. Om provet innehåller kornstorlekar >4 mm siktas framsiktas 1/4 mm och >4 mm i stället för >1 mm. Fraktion 1/4 mm behandlas som >1 mm-fraktionen och grövsta kornstorlekarna sparas för eventuell senare behandling.



Figur 10. Schematisk bild över provberedningsförfarandet.

3.4 Val av relevanta och effektiva analysmetoder

Uppkomsten av surt lakvatten från oxidation av sulfidmineral är ett miljöproblem av global betydelse som främst är förknippat med gruvverksamhet. Därmed har merparten av de analysmetoder som tillämpas idag utvecklats inom gruvsektorn. En utmaning i detta sammanhang är att de (bio-)geokemiska förlopp som ligger bakom syrabildning och neutralisering av den syra som bildats är mycket långsamma förlopp. Flera av de analys- och testmetoder som tagits fram syftar i första hand till att klarlägga materialens totala syrabildande respektive syraneutraliserande förmåga på ett sådant sätt att tidsaspekten kringgås. Dessa metoder klassificeras som statiska tester. Som komplement finns ett antal kinetiska metoder där de geokemiska processerna i materialet följs över tid. I det följande beskrivs ett antal av de frekvent använda metoderna för att bestämma syrabildnings- och syraneutraliseringsegenskaper hos sulfidhaltigt geologiskt material såsom gruvavfall och bergkross.

3.4.1 Kemisk och mineralogisk karaktärisering

Den kemiska sammansättningen av bergmaterial kan bestämmas på olika sätt. Flera metoder kräver att det fasta materialet löses upp innan analys, medan andra metoder kan utföras direkt på det material som undersöks.

Induktivt kopplat plasma (ICP) med masspektrometri (MS)

En av de vanligaste metoderna för bestämning av ett materials totala grundämnes-sammansättning är Induktivt kopplat plasma (ICP) följt av detektion med exempelvis optisk emissionsspektrometri (AES) eller Sector Field Mass Spectrometry (SFMS). ICP-baserad analys förutsätter att materialet först löses upp och överförs i en vattenlösning som injiceras i ett instrument. Beroende vilken provmatris som ska analyseras sker upplösningen på olika sätt. Normalt är det första, och ofta enda, steget att provet i mikrovågsugn exponeras för en stark syra av hög koncentration, exempelvis 7 M HNO_3 (salpetersyra), alternativt kungsvatten (HCl/HNO_3). Detta är emellertid ofta inte tillräckligt för att lösa upp all fast fas. För upplösning av olika former av silikatmineral krävs ytterligare ett steg. Genom att tillsätta fluorvätesyra (HF) eller genom uppslutning i litiummetaboratsmälta följt av upplösning i utspädd salpetersyra kan

både amorfa och kristallina silikater lösas upp och svårlösliga grundämnen komplexbindas. Prover som innehåller grövre partiklar krossas innan upplösning till <0,075 mm.

Genom att kombinera ICP-analys med olika kromatografiska metoder såsom vätskekromatografi eller gaskromatografi kan information om fördelning av metaller över olika kemiska förekomstformer (speciering) erhållas.

Grundämnesanalys med hjälp av ICP-AES och ICP-MS är en väletablerad analysmetod som utförs av ett antal kommersiella laboratorier i Sverige. Laboratorierna erbjuder en palett av analyser och analyspaket för många olika typer av provmatriser. Sammansättningen av grundämnen liksom detektionsgränsen i paketen varierar beroende på typ av prov. Beroende på val av paket kan från ett tiotal upp till 40 grundämnen ingå. Dessutom kan normalt ytterligare grundämnen adderas mot en tilläggskostnad. Svavel är ofta ett sådant tilläggsämne som inte ingår i analyspaketet. Ett laboratorium erbjuder paket för mineral och bergarter som inkluderar så många som 67 grundämnen.

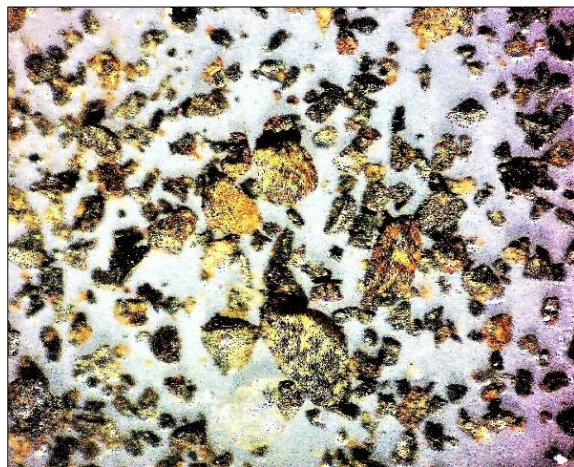
Laboratorierna tillhandahåller olika former för förbehandling och upplösning av fast material innan analys. Valet av förbehandlingsmetod styrs i hög grad av vilken frågeställning som behöver besvaras.

Mineralogisk analys

Karaktärisering av bergmaterialets mineralogiska sammansättning kan ge en översiktlig uppfattning om förutsättningarna för att materialet ska vara syrabildande (Becker m.fl., 2015). Den mineralogiska analysen består av en bestämning av vilka mineral som finns närvarande i materialet och kan även innehålla en kvantifiering av mineralsammansättningen liksom analys av kornstorlek och kornens textuella förekomst i bergprovet. Verktygen för mineralogisk karaktärisering består i första hand av metoder som använder sig av påfallande eller genomfallande ljus i det synliga våglängdsområdet eller av röntgenstrålning. Även svepelektronmikroskopi kombinerad med detektion baseras på det ljus som emitteras av ytligt liggande atomer när elektronstrålen träffar mineralkornens ytor.

Stereomikroskopi

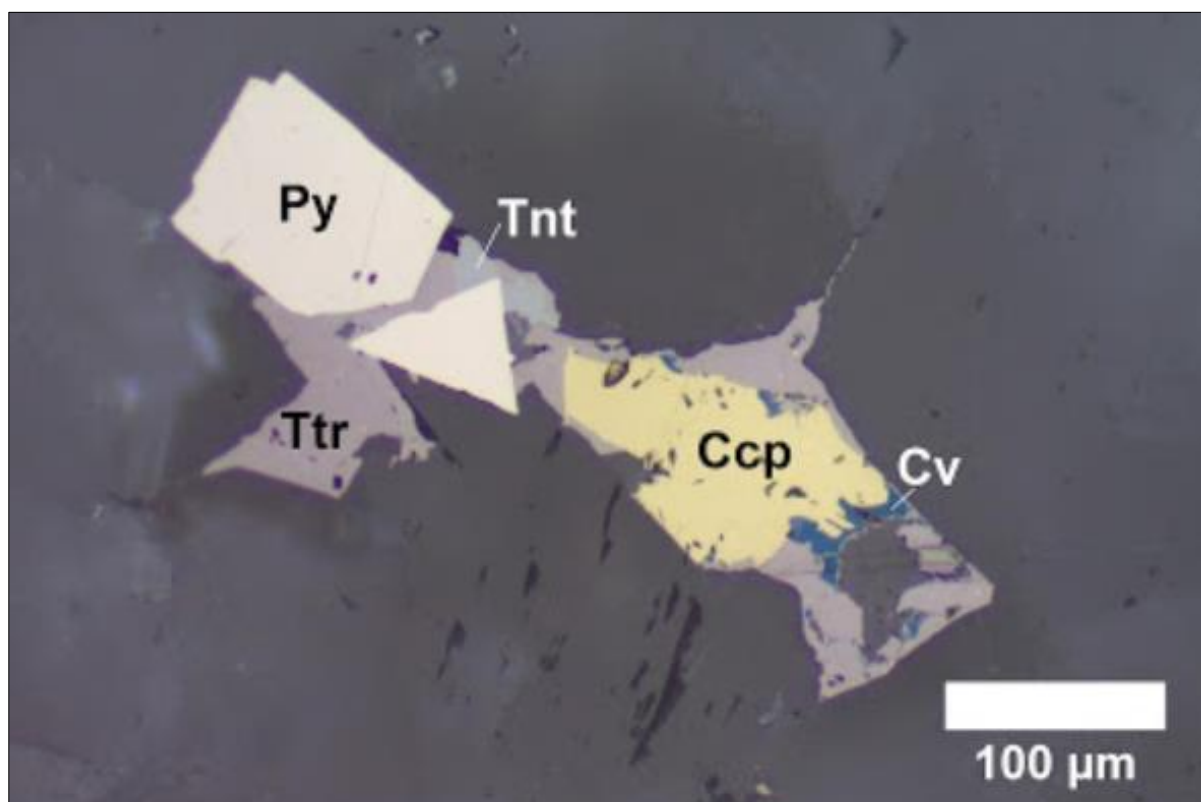
Metoden nyttjar stereomikroskop med påfallande ljus (figur 11). Med hjälp av stereomikroskopi kan kvalitativt och semikvantitativt identifieras i provet ingående sulfidmineral och deras kornstorlek. Metoden kan med fördel nyttjas i undersökningens inledande fas.



Figur 11. Mikroskopisk bild av finfraktion med anrikade sulfidmineralpartiklar (svavelkis, FeS₂, ljusgul; kopparkis, CuFeS₂, mässingsgul; zinkblände ZnS, brun).

Polarisationsmikroskopi av tunnslip

Polarisationsmikroskopi nyttjar både genomfallande (transparenta mineral) och påfallande (opaka mineral) ljus som passerar mikroskopens polariserade skivor, kompensator och analysator (figur 12). Vid analys studeras mineralens optiska egenskaper såsom ljusbrytning, dubbelbrytning, isotropi, anisotropi m.m. Med hjälp av mineralens optiska egenskaper identifieras ingående mineral. Samtidigt kan mineralens texturella egenskaper (kornstorlek, avgränsning) och moderbergartens strukturella uppbyggnad bestämmas. Opaka sulfidmineral undersöks med hjälp av påfallande ljus av polerade slip. Metodens nackdel är att den studerade provytan är liten, vilket kräver många prov vid undersökning av heterogena material. Ytterligare en nackdel av metodens tillämpning vid kvantitativa bedömningar är dess kostnad och tämligen lång tid för tillverkning av slippreparat.



Figur 12. Mikroskopisk bild (opak mikroskopi) av svavelkis (Py), kopparkis (Ccp), teraeedrit (Ttr) och tentatit (Tnt).

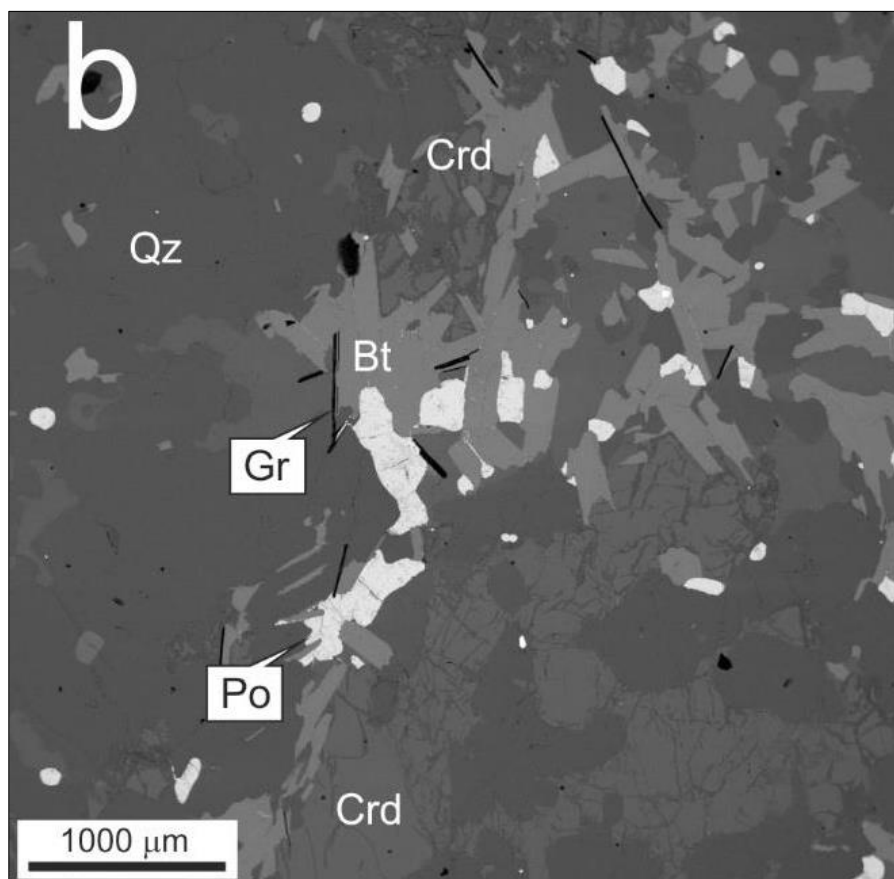
XRD (Pulverröntgendiffraktion)

En annan klassisk metod att identifiera mineralsammansättning i geologiska material är pulverröntgendiffraktion (XRD). Som namnet antyder är det finpartikulära prov som kan analyseras med XRD. I en pulverdiffraktometer appliceras materialet till en flat provhållare där det försiktigt jämnas ut till en slät yta. Röntgenstrålning med väldefinierad våglängd träffar provet i sned vinkel. Röntgenstrålningen reflekteras mot atomplanen i de kristallina mineralen och med en detektor som placerats på motsatt sida av provet i exakt samma vinkel som strålkällan mäts intensiteten hos det reflekterade röntgenljuset. Genom att i ett svep förändra strålkällans och detektorns vinklar i förhållande till provet erhålls ett spektrum (diffraktogram) som består av toppar, vilka representerar reflexer vars position och relativa intensitet är typiska för de ingående mineralen. Med mjukvara jämförs ett uppmätt diffraktogram mot en databas så att mineralinnehållet i provet kan bestämmas. För att få kvantitativ information om sammansättningen kan metoden Rietveldanalys tillämpas. En sådan analys utgår från diffraktionstopparnas intensitet, position och form.

SEM (Svepelektronmikroskopi)

Ett viktigt och vanligt använt verktyg för mineralogisk karaktärisering av geologiskt material är svepelektronmikroskopi (SEM). SEM har många tillämpningar. Morfologi och kemisk sammansättning är två av dessa. I ett svepelektronmikroskop skannas provet i ett raster med en stråle av elektroner som interagerar med atomerna vid föremålets yta, vilket genererar signaler som kan användas för att få information om yttopografi, sammansättning, ledningsförmåga m.m. När elektronerna träffar provet genereras röntgenstrålning vars energinivå och intensitet kan användas för att beräkna grundämnessammansättning i varje punkt och på så sätt ge information om en rumslig fördelning av grundämnena på partikelytan. Exempel på en sådan teknik är FE-SEM-EDS (Field Emission Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy), Karlsson m.fl. (2018). QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) är ett exempel på en tillämpning av detta. Stommen i ett QEMSCAN-instrument är ett svepelektronmikroskop som är försett med olika typer av EDS-detektorer. Genom att kombinera de olika formerna av fysikaliska data kan sammansättningen i enskilda mineralkorn på en slipad provyta bestämmas med hjälp av en automatiserad mjukvara (figur 13).

I litteraturen finns exempel på studier där en kombination av kvantitativ information om materialets mineralsammansättning från FE-SEM-EDS-analys och antaganden om de ingående mineralens reaktivitet har använts för att prediktera materialets syrabildande potential eller åtminstone som nyttjats som kompletterande information i tolkningen av experimentella data från exempelvis NAG- eller ABA-test (Becker m.fl., 2015; Karlsson m.fl., 2018). Det finns dock stora osäkerheter förknippade med dessa beräkningar, inte minst beträffande de ingående mineralens reaktivitet och hur exponerade de är för syre alternativt bildad syra, varför det är svårt att använda mineralogisk karaktärisering som en enskild metod för prediktering. Däremot är den typ av information av värde för förståelse om hur ett material kan tänkas uppträda.



Figur 13. SEM-bild som visar Qz=kvarts, Gr=grafit, Crd=kordierit, Po=magnetkis (pyrrhotit).

XRF-instrumentet beskriver en liten yta av provet med joniserande strålning och registrerar sedan energin hos exciterade elektroner i de atomer som ingår i det undersökta materialet när de återgår till grundtillståndet och då alstrar sekundär röntgenstrålning (fluorescens), Price (2009) På så sätt kan halterna av ett stort antal grundämnen analyseras samtidigt. Det finns flera olika typer av XRF-instrument, alltifrån små handhållna till bänkinstrument och instrument som monteras på annan teknisk utrustning för simultan analys. Det har även utvecklats instrument speciellt för automatisk mätning (skanning) på borrhärdar och sedimentkärnor med hög spatial upplösning. XRF-analys har en lång rad tillämpningar inom industrin. Automatiserad XRF-utrustning är vanligt förekommande i bland annat mineralbaserad industri och metallindustrin för kontinuerlig kvalitetskontroll i olika steg av processen och av produkter, men används även inom exempelvis livsmedelsindustrin.

Vid analys med handhållen XRF kan proverna analyseras utan förbehandling. För att skydda instrumentet bör provet innehållas i en plastpåse eller i provkopp täckt med en film som inte absorberar röntgenstrålning. Analysen förstör inte provet. Hela hanteringen inklusive mätning är snabb, vilket medför att ett stort antal analyser kan utföras under en begränsad tid. För ett av de vanligaste handhållna instrumenten anges en mättid på 2-3 sekunder för standardelement och 5-15 sekunder för lätta element. Portabla XRF-instrument är relativt enkla att hantera utan omfattande träning. Dock krävs en kort strålningsutbildning. XRF-analys görs på små ytor som är några få mm i diameter. Det innebär att det räcker med en liten provvolym för att genomföra en analys. Samtidigt ska användaren vara medveten om att analysen endast avser ett djup på ett par mm i provet. Den enskilda analysen ger följaktligen inte svar på hela den analyserade partikelns sammansättning. Det faktum att en mätning görs på en liten yta innebär samtidigt att heterogeniteter hos det material som analyseras kan resultera i stor spridning i uppmätta värden om de partiklar som mäts är av samma storlek eller t.o.m. större än strålpunktens yta. En liten förskjutning av strålpunkten över ytan kan leda till ett helt annat resultat om röntgenstrålen då kommer att träffa en helt annan typ av mineral.

På grund av fysikaliska begränsningar klarar inte XRF-instrumenten att detektera de allra lättaste grundämnena. Natrium (atomnummer 11) eller magnesium (atomnummer 12) är för många XRF-instrument de lättaste grundämnena som kan analyseras med XRF. Uran (atomnummer 92) anges ofta som det tyngsta elementet.

En erfarenhet som har rapporterats i litteraturen är att de uppmätta halterna blir lägre om provet inte är torrt. I de fall analys görs på blöta eller fuktiga prov i fält eller på material som inte bör förändras kan korrigering för fukthinnehållet (Bastos m.fl., 2012) göras. Fuktigt bergmaterial som ska analyseras på laboratorium bör därför torkas (högst 105°C till konstant torrsvikt) innan analys. En annan faktor som har visat sig påverka kvaliteten hos XRF-analys är partikelstorlek. Finare partiklar ger högre intensitet hos det fluorescerande röntgenljuset (Imanishi m.fl., 2010).

De senaste åren har det gjorts ett antal jämförelser avseende analys av tungmetaller i förorenade jordar med portabel XRF och grundämnesanalys med ICP-AES och/eller ICP-MS (Wu m.fl., 2012, Kilbride m.fl., 2006, Rouillon and Taylor, 2016). Slutsatsen från dessa studier är att det finns god överensstämmelse mellan de båda analysmetoderna. För vissa grundämnen, exempelvis arsenik, kan överensstämmelsen ibland vara sämre. I flera fall har XRF-analyserna skett i fält. För fältmätningar kan dock fukt (lägre intensitet hos strålningen) och sämre kontroll av partikelstorlek göra analyserna mindre säkra.

3.4.2 Geokemiska test

Sura och tungmetallhaltiga lakvatten (Acid and Metalliferous Drainage; även Acid Mine Drainage, AMD, eller mer generellt Acid Rock Drainage, ARD) är ett av de dominerande miljöproblemen världen över för gruvindustrin. Branschen har stora krav på sig att vidta åtgärder för att minimera uppkomsten av AMD. Därför har det inom den branschen utvecklats ett stort antal metoder för att ta fram den information som behövs för att prioritera och dimensionera åtgärder mot AMD. Inom den internationella gruvindustrin finns flera stora sammanställningar av testmetoder, eller snarare handböcker. Ett par exempel på detta är ARD Test Handbook (Amira, 2002) som har sammanställts av den Australienbaserade organisationen Amira International och Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide (www.gardguide.com) och ges ut av INAP (The International Network for Acid Prevention). Båda dessa handböcker innehåller beskrivningar av ett stort antal metoder som passar gruvindustrin. Nedan beskrivs de vanligast förekommande metoderna i detta sammanhang med fokus på metoder som även kan bedömas vara av intresse för hantering av bergmaterial för konstruktionsändamål.

NAG (Net Acid Generation)

Net Acid Generation (NAG) är en experimentell metod som används för analys av ett bergmaterials nettosyrabildande egenskaper, vilket betyder att materialets syrabildande potential och dess neutraliserande kapacitet undersöks simultant (Sobek m.fl., 1978; Morin m.fl., 1999;). Det sker genom att forcera de långsamma kemiska processer som sker i ett sulfidinnehållande material under oxidation. Svaveloxidationen påskyndas genom att materialet exponeras för väteperoxid (H_2O_2), vilket är ett starkt oxidationsmedel. Oxidationen av svavel till sulfat resulterar i avgivande av vätejoner. Vidare oxiderar tvåvärt järn, Fe(II), till trevärt, Fe(III) som i sin tur faller ut som järn(hydr-)oxid och är en syrabildande process. Den bildade surheten kan till en mindre eller större del neutraliseras om det i bergmaterialet finns karbonatmineral närvarande (i huvudsak kalcit).

I ett NAG-test slammas en känd mängd finpartikulärt (<0,075 mm) material upp i 15 %-ig väteperoxid i ett öppet kärl. Suspensionen ska stå i rumstemperatur över natten. Därefter värms suspensionen upp till nära kokning under ett par timmar för att påskynda nedbrytningen av oförbrukad väteperoxid. Efter avsvalning till rumstemperatur tillförs avjoniserat vatten för att kompensera för avdunstning och pH mäts liksom lösningens elektriska ledningsförmåga (konduktivitet). Förfarandet kan upprepas en eller ett par gånger med ny väteperoxidlösning i de fall det befaras att svavelhalten i materialet är relativt hög ($S > 7\,000\text{--}10\,000$ ppm) att inte allt material har oxiderats (Karlsson m.fl., 2018). Även hög halt organiskt material i provet kan leda till att väteperoxiden utarmas innan allt svavel har hunnit oxidera. I sådana fall kan proceduren upprepas genom att dekantera reaktionslösningen och tillföra ytterligare portion(er) väteperoxidlösning till återstoden av det fasta materialet (Amira, 2002).

I de fall pH är 4,5 eller lägre betraktas materialet som potentiellt syrabildande och titrering med natriumhydroxid genomförs för att kvantifiera nettosyrabildande potential. Titreringen utförs i två steg: först till pH 4,5 och därefter till pH 7,5. Den nettosyrabildande potentialen beräknas därefter på basis av resultatet av titreringen.

I sammanhanget är det värt att nämna att den aktiva oxidant som används i NAG-test, väteperoxid, i sig är instabil, framför allt vid högre pH-värden. pH i väteperoxidlösningar av högre koncentration har låga pH-värden. Dessutom tillsätts i många produkter en pH-buffrande substans (ofta fosforsyra) för att hålla pH inom önskat intervall $\leq 4,5$. Beroende på fabrikat och renhet kan lösningen vara betydligt surare än så. Eftersom en viktig del av NAG-analysen är den syra/bas-titrering som följer på oxidationen med väteperoxid är det viktigt att innan försöken påbörjas säkerställa att lösningens pH håller sig nära 4,5 så att inte lösningens inneboende

syrabasegenskaper påverkar bedömningen av testets resultat för mycket. Samtidigt är det också nödvändigt att säkerställa att den väteperoxid som används inte har brutits ned till vatten och syre.

För att NAG-testet fullt ut ska ge indikation på den totala syrabildande potentialen krävs att inte bara svavlet utan även det tvåvärda järn som finns bundet i svavelkis och magnetkis hinner oxideras till trevärt och att järnhydroxid fälls ut. Denna process utgör som nämnts halva den syrabildande potentialen i materialet och gynnas av högre pH-värden. Det är en av orsakerna till att titreringen görs i två steg: Ep1 (pH 4,5) omfattar i huvudsak den bildade fria syra som finns i lösningen och den fortsatta titreringen till pH 7,0 (Ep 2) indikerar syra som bildas främst genom utfällning av järnhydroxider.

En annan viktig sak att beakta avseende NAG-test är att ett negativt utfall, d.v.s. att pH överstiger 4,5, inte ger någon kvantifiering av materialets nettoneutraliserande förmåga – endast att materialet inte är nettosyrabildande (Morin and Hutt, 1999).

Räisänen m.fl. (2010) rekommenderar NAG-test före ABA bl.a. baserat på deras slutsats att NAG-försöken inkluderar syraneutralisation genom upplösning av mer långsamt reagerande karbonater än kalcit.

I en undersökning med fem olika material inom ett vitt spann med avseende på svavelinnehåll från granit till massiv sulfid med 13 % svavel drogs bland annat slutsatsen att NAG-tester bekräftade klassificering av materialen i enlighet med standard ABA-test (Sapsford m.fl., 2008). Undersökningens NAG-tester resulterade i frisläppande av mer lösta komponenter än vad som skedde i ett fuktkammarförsök som pågick mer än 80 veckor. Studien visade också att kinetiska data från NAG-test inte gav någon ytterligare information av värde än vad som ges av NAG-pH.

I en kritisk genomgång av olika metoder för prediktering av ARD (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015) pekar författarna bland annat på att det inte finns etablerat någon "Best Practice" för provtagning. De menar även att de geokemiska testmetoderna generellt sett har betydande osäkerheter och kan leda till både över- och underskattning av risken för nettosyrabildning bl.a. genom användning av aggressiva reagens. Författarna efterlyser också närmare koppling mellan fältobservationer, laboratorietest och teoretiska modeller. De trycker speciellt på behovet av bättre metoder för analys av svavel och metaller i borrhärdar.

ABA (Acid Base Accounting)

ABA-test (Acid Base Accounting) är en semiexperimentell metod som initialt togs fram för att bestämma både den syrabildande potentialen och hos avfall från kolgruvor och avfallets syraneutraliserande förmåga (Sobek m.fl., 1978). Den syrabildande potentialen (AP) beräknas utifrån totalhalten av svavel i materialet. Utgångspunkten är att all sulfid är bunden till järn i mineralen pyrit/svavelkis (FeS_2) eller pyrrhotit/magnetkis (Fe_{1-x}S). Oxidation av en mol svavelkis genererar fyra mol vätejoner. Oxidation av en mol magnetkis genererar två mol vätejoner. I båda fallen frigörs följaktligen två vätejoner per svavelatom. Enligt proceduren för ABA-tester beräknas syrabildande potential (AP) uttryckt som $\text{kg CaCO}_3/\text{ton material}$, d.v.s. den mängd kalciumkarbonat som erfordras för att neutralisera den bildade syran.

Kalkylen av AP utgår från oxidation av svavelkis/magnetkis och till den kopplad utfällning av järnhydroxid som medför frisläppande av vätejoner och bildning av sulfatjoner:

AP: $\text{S}(\%) \times 31.25 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$

Materialets syraneutraliserande kapacitet NP (Neutralisation Potential) bestäms experimentellt genom att tillsätta saltsyra (HCl) i överskott och därefter bestämma den mängd syra som inte neutraliserats av materialet genom titrering. Provet suspenderas i avjoniserat vatten och därefter tillsätts en känd mängd 1 mol/L HCl. pH i suspensionen ska efter 22 timmar ligga mellan 2,0 och 2,5. Om pH ligger över detta värde tillsätts ytterligare HCl så att pH efter 24 timmar hamnar inom detta intervall. Därefter genomförs en titrering där kvarvarande syra kvantifieras genom tillsats av 0,1 mol/L NaOH (natriumhydroxid) till ekvivalenspunkten pH 8,3.

Även NP beräknas uttryckt som kg CaCO₃/ton. Nettoneutraliserande förmågan, NNP (Net Neutralisation Potential), beräknas med ekvationen:

$$NNP = NP - AP$$

Ett annat sätt att uttrycka relationen mellan syrabildande och syraneutraliserande förmåga är genom NPR (Neutralisation Potential Ratio):

$$NPR = NP / AP$$

Antagandet att allt svavel som förekommer som sulfider är bundet till järn (svavelkis eller magnetkis) är en approximation som i de allra flesta fall är motiverad. Halterna av andra metallers sulfider är regelmässigt betydligt lägre. Förhållandet mellan svavelkis och magnetkis kan visserligen variera så att magnetkis i vissa fall kan vara det dominerande mineralet. För beräkningen av AP spelar detta ingen roll då relationen mellan svavelinnehåll och syrabildning är lika för båda mineralen. I gällande metodstandard (Svenska Institutet för Standarder, 2011) ingår även en möjlighet att analysera innehållet av sulfat för att i större eller mindre utsträckning reducera den svavelhalt som ligger till grund för beräkningen av AP. Huvudrekommendationen är dock att basera beräkningen på totalsvavel.

En möjlig komplikation vid ABA-tester är att bestämning av NP hos finkrossade silikatbergarter med hjälp av saltsyra kan påverkas av silikatpartiklarnas katjonbyteskapacitet. Detta skulle innebära att katjoner, såsom Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ etc. lokaliserade på bergartfragmentens ytor byts ut mot vätejoner från vattenlösningen och därigenom påverka lösningens pH. Detta ställt mot vittring (upplösning/omvandling,) av bl.a. aluminosilikater då mineralen övergår till lermineral eller andra sekundära mineral under bildning av fria metaljoner och buffrande vätekarbonat. Silikatvittring sker emellertid mycket långsammare än upplösning av karbonatmineral och bedöms inte kortsiktigt kunna bidra i betydande omfattning till neutralisering av den syra som bildas i krossmaterial vid oxidation av svavelkis och magnetkis. Jonbytesreaktioner är mer av "engångskaraktär" och bidrar därför inte till uthållig syraneutralisering.

Fuktkammarförsök (Humidity Cell Test)

I fuktkammarförsök undersöks materialets syrabildande och syraneutraliserande förmåga experimentellt i laboratorium under lång tid för att följa hur vattenkvaliteten utvecklas med tiden. I fuktkammarförsöken sker de (bio-)geokemiska processerna något forcerat jämfört med vad som sker i naturen, men efterliknar de naturliga tidsförloppen betydligt närmare än vad exempelvis NAG- och ABA-tester gör. I ett NAG-test genereras information som kan användas för att bestämma om ett fast material kommer att producera ett surt, alkaliskt eller neutralt lakvatten. Genom kemisk analys av prov tagna vid fuktkammarförsök lösta kan ämnen i vattnet som representerar vittringsprodukter som bildas under en viss tidsperiod identifieras, mängden lösta ämnen som frisätts fastställas och hastigheten med vilken lösta ämnen frigörs (från de fasta ämnena till utflödet) bestämmas.

Normalt placeras 1 kg prov (partikelstorlek <6 mm) i en kolonn (ett rör av glas eller plast) och utsätts sedan för vatten och luft i veckocykler som innebär att materialet först mätas med vatten och därefter dräneras med uppsamling av lakvattnet. Följt på detta exponeras materialet

för en ström av torr luft (3 dygn) och därefter fuktmättad luftad (3 dygn) innan ytterligare vattenbegjutning och urlakning av reaktionsprodukter. De veckovisa lakvattnen analyseras avseende pH, konduktivitet samt innehåll av lösta ämnen. Genom att systematiskt sätta in de analyserade parametrarna i ett diagram kan utvecklingen av vattenkvaliteten följas. Testet fortsätter tills sulfatgenerering och metallutlakning har varit i stabil nivå i åtminstone fem veckor (Price, 2009). Försöken pågår minst 20 veckor. En erfarenhet är att det normalt tar minst 40-70 veckocykler innan det uppstår någon form av stabilitet i systemet (steady state) (Maest & Nordstrom, 2017).

Kolonnförsök

Ett kolonnförsök i detta sammanhang kan beskrivas som ett experiment där man följer geokemiska processer i ett material över tid genom att placera provet i ett rör av glas eller plast och omväxlande exponera det för vatten och luft. Materialet placeras i röret på en genomsläpplig botten bestående av en silduk eller något annat inert material. Kolonnen är öppen upptill för att möjliggöra luftutbyte. Med givna intervall tillförs vatten så att materialet blir mättat. Efter ett antal dagar öppnas en ventil i botten och materialet dräneras på vatten. Därefter får materialet stå omättat med avseende på vatten och svavelhaltigt material blir på så sätt exponerat för luftens syre. I likhet med fuktkammarförsök upprepas begjutning med kontrollerade volymer av vatten och dränering med en viss frekvens. Till skillnad från fuktkammarförsöken sker ingen aktiv genomblåsning av luft. Kolonnförsöket har därför mera karaktären av ett lakförsök och andelen av materialet som exponeras för luft beror i hög grad på hur väl materialet dräneras.

3.4.3 Resultat och slutsatser från litteraturstudien med avseende på metodernas lämplighet för ändamålet

Syftet med delprojektet är att "identifiera, testa och verifiera snabba, utslagsgivande och effektiva analysmetoder för svavelhalts- och metallbestämning i krossmaterialet för vidare bedömning av krossmaterialets förmåga att generera surhet (aciditet) och för beräkningar av sulfidneutraliserande åtgärder". För att kvalificera som lämplig bör en metod således generera analysdata utan lång väntetid och med en måttlig arbetsinsats beträffande provtagning och provberedning samt genomförande av analysen. Vidare ska analysdata vara tillförlitliga och delges i sådan form att de kan användas för att bestämma ett bergmaterials syrabildande och eventuella syraneutraliserande förmåga.

Sulfidmineralisering är generellt heterogen till sin karaktär. Sulfidmineral är oftast ojämnt fördelade i bergmassan. För att få analysresultat som är representativa för ett visst område krävs att hela kedjan från provtagning via provberedning till kemisk och/eller mineralogisk analys är optimerad för att minimera effekterna av heterogeniteten. I analysen av de olika metodernas lämplighet för karaktärisering av bergmaterial utifrån risken för bildning av sura lakvatten har därför möjligheten att adressera heterogen fördelning av syrabildande och eventuella syraneutraliserande mineral givits stor vikt.

Induktivt kopplat plasma (ICP)

Grundämnesanalys med ICP-baserade analysmetoder är väletablerade metoder som utförs av flera ackrediterade laboratorier i Sverige. Kostnadsbilden varierar en hel del mellan företagen. Kostnaden per grundämne blir mycket billigare om analyspaket i stället för analys av enstaka grundämnen väljs, men är det bara ett eller ett fåtal grundämnen som är intressanta av kan val av enstaka grundämnen vara fördelaktigt. Det är dock inte alla laboratorier som erbjuder analys av enstaka grundämnen.

Mätosäkerheten är inte försumbar. Ett laboratorium anger att den kan variera mellan 15 och 105%. Ett annat laboratorium anger normalt 20%. För att öka träffsäkerheten kan prov skickas in i triplikat för att möjliggöra statistisk behandling.

Listpriset för analys av bergmaterial varierar från några hundralappar per prov till >5 000 kr. Priset beror av flera faktorer såsom förbehandling, antal, vilka grundämnen som ingår och rapporteringsgränser. Analys av prov i triplikat kan därför bli kostsam.

XRD (Pulverröntgendiffraktion)

Pulverröntgendiffraktion kan i kombination med andra analytiska metoder, t.ex. SEM, vara ett värdefullt verktyg i de fall det finns behov av fördjupad mineralogisk karaktärisering av ett krossmaterial. I det syftet har XRD använts i detta projekt för att vetenskapligt utvärdera eventuell bildning av sekundära mineral efter neutralisering. För bestämning av ett materials syrabildande och syraneutraliserande potential bedöms dock metoden inte vara lämplig sett utifrån tids- och kostnadseffektivitet.

XRF (Röntgenfluorescens)

XRF-analys är en mycket vanligt använd metod för samtidig analys av ett stort antal grundämnen. Handhållna instrument kan användas efter en måttligt omfattande strålningsutbildning och XRF-mätningar kan utföras i fält om så erfordras. Marginalkostnaden per analys är mycket låg. Detta kombinerat med kort analystid gör att det går att genomföra ett stort antal mätningar på en begränsad tid. Följaktligen går det bra att göra multipla mätningar på ett och samma prov för att öka mätnoggrannheten i varje punkt. XRF-analys har sin styrka främst hos fina partiklar, vilka ger högre intensitet hos det fluorescerande röntgenljuset (Imanishi m.fl., 2010). Därmed är metoden inte lika lämplig för analys på fasta prov såsom direkt på bergvägg eller berg i dagen. Proven bör vara torkade innan analys.

Kemiska analyser

Litteraturstudien visar på god samstämmighet mellan ICP-MS/ICP och XRF beträffande resultat från svavel och metallanalys. Marginalkostnaden per analys är avsevärt lägre för handhållen XRF. Analys med handhållen XRF möjliggör dessutom kort tid mellan provtagning och analys. Det innebär att med handhållen XRF kan ett större antal prov analyseras för en given kostnad och på kortare tid, vilket ger förutsättningar för bättre representativitet i provtagning och analys. Den korta tiden mellan provtagning och analys ger dessutom bra möjligheter att genomföra kompletterande provtagning och analys där så är önskvärt.

Geokemiska test

ABA

Liksom NAG-test är ABA-analys en väletablerad metod för undersökning av sulfidinnehållande bergmaterials nettosyrabildande förmåga. Till skillnad från NAG bestäms syrabildande potential genom en teoretisk beräkning utgående från analys av materialets totalhalt av svavel alternativt halt av sulfidsvavel. Sulfidhalten bestäms indirekt genom att separat analysera innehållet av sulfat och subtrahera detta från totalhalten av svavel. I den svenska berggrunden är innehållet av sulfat generellt försumbart. Antagandet att allt svavel i ett prov utgörs av sulfidmineral är därför välgrundad. Däremot kan det finnas signifikanta andelar sulfat i material som har krossats och exponerats för luft och nederbörd under en längre tid. I det fallet är bestämning av sulfat mer välmotiverad.

Vid bestämning av NP är provet under 24 timmar exponerat för en vattenlösning med pH 2,0-2,5 innan titrering med NaOH påbörjas. I jämförelse med NAG-test innebär det att provet är exponerat för syra under längre tid och oftast vid ett lägre pH-värde, vilket kan leda till en viss överskattning av NP.

NAG

I den vetenskapliga litteraturen finns flera studier där olika metoder att estimerar geologiska materials nettosyrabildande förmåga (Räisänen m.fl., 2010; Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015; Lindgren, 2020). Inte i något fall finns en perfekt överensstämmelse av resultat från de olika metoder som har undersökts, tvärtom kan det skilja avsevärt mellan analysmetoderna. Det understryker komplexiteten i den problematik som ligger i att entydigt bestämma i vilken utsträckning ett material utgör en risk för miljön genom frisläppande av surhet.

Räisänen m.fl. (2010) rekommenderar NAG-test före ABA bl.a. baserat på slutsatsen att NAG-testen inkluderar syraneutralisation genom upplösning av mer långsamt reagerande karbonater än kalcit.

ABA-analys och NAG-test är båda metoder som syftar till att bestämma ett geologiskt materials nettosyrabildande förmåga. NAG-testet är enklare i utförandet genom att allt utförs i en sekvens. Den syraneutralisering som sker under försöket baseras på den syra som bildas vid oxidationen av sulfidmineral. I de fall material har en nettosyrabildande förmåga kan resultatet av NAG-testet användas för beräkning av dosering av alkalisk tillsats. ABA-analys ger å sin sida en tydligare kvantifiering av syraneutraliserande förmåga (NP) som möjliggör beräkning av neutralisationspotentialkvoten (NPR), vilket är en parameter som används för bedömning av miljörisker förknippade med avfall. För bedömning av bergmaterial som används för konstruktionsändamål har NPR inte motsvarande formell betydelse.

NAG-test är således en metod där såväl syrabildning som syraneutralisation undersöks i ett sammanhållet experiment. I och med att syrabildningen bestäms empiriskt finns inget behov av korrigering av syrabildande kapacitet (AP) för eventuell närvaro av sulfat. I ett NAG-test provoceras inte syraneutralisering i högre utsträckning än vad som ges av syrabildningen, vilket minskar risken för överskattning av NP.

Fuktkammarförsök

I fuktkammarförsök undersöks de geokemiska processer som ligger bakom syrabildning och syraneutralisation under lång tid. Genom att kontinuerligt analysera sammansättningen av lakvätskorna kan god förståelse av vilka geokemiska processer som är styrande under olika tidsperioder erhållas. Fuktkammarförsök tar därigenom mycket lång tid. 20 veckor anses vara ett minimum. För att man ska kunna göra en bedömning av ett fortvarighetstillstånd eller om exempelvis syraneutraliserande kapaciteten kommer att ta slut behöves oftast att försöken körs under mycket längre tid än så. Inom gruvindustrin är planeringshorisonterna långa och det finns tidsmässigt utrymme att genomföra fuktkammarförsök. För bergmaterial som ska användas för konstruktionsändamål är tidsramarna ofta mer begränsade och fuktkammarförsök med dess långvarighet inte möjliga att utföra.

Kolonnförsök

Kolonnförsök är ett vitt begrepp som innefattar många olika typer av material och frågeställningar. Till skillnad från fuktkammarförsöken sker ingen aktiv genomblåsning av luft. Kolonnförsök har därför mera karaktären av lakförsök och andelen av materialet som exponeras för luft beror i hög grad på hur väl materialet dräneras. Även om syrabildning kan påverkas av begränsad syretillförsel till materialet i kolonnen kan kolonnförsök ge värdefull information. Ett exempel är undersökning av varaktigheten hos ett tillsatt alkaliskt medel sett utifrån ett utlakningsperspektiv. Genom att omväxlande vattenbegjuta och dränera ett material kan effekten av nederbörd över längre tid simuleras.

3.4.4 Laboratorieförsök baserade på slutsatser från litteraturstudien

XRF-analys av grundämnessammansättning hos sulfidförande bergmaterial

Envix har utfört grundämnesanalys med handhållen XRF på ett stort antal prov. Instrumentet som har använts är Bruker S1 TITAN. Kalibrering har skett med referensmaterialet CS-M2 GEO/SOIL SAMPLE. Diameter på den yta som mäts är 8 mm. Provmaterialet har placerats i en provkopp med 4 µm Prolene-film i botten.

XRF-analys har utförts på bergkross, borrhax och borrhärdor från tre olika lokaler (Lokal 1, prov D1-D16, Lokal 2, prov BP 15-23 samt Lokal 3, prov KBH 1-7). Bergmaterial från alla tre lokaliteter utgjordes av migmatiserade metaargillitiska bergarter med varierande sulfidmineralisering.

För att utreda hur svavelhalten i bergmaterialet varierar med kornstorlek har materialet torkats och siktats i fraktioner 0/0,063 mm, 0,063/1 mm, 1/4 mm och 4/8 mm före analys.

XRF-analys av bergkross

XRF-analys genomfördes främst på storleksfraktionerna 0/0,063 mm och 0,063/1 mm som siktats fram från material från 16 olika provpunkter representerande krossfraktionerna 0/8 mm (8 prov) och 0/150 mm (8 prov). För krossfraktionen 0/150 mm undersöktes även fraktionerna 1/4 mm och 4/8 mm. I de flesta fall mättes varje delprov tre gånger med materialbyte mellan varje skott för att möjliggöra statistisk analys.

Resultat från XRF-mätningarna på bergkross presenteras i tabell 5a och tabell 5b. Här redovisas svavelhalter och halter av relevanta metaller i kornstorleksfraktioner 0/0,063 och 0,063/1 mm och för åtta prov redovisas även fraktionerna 1/4 mm och 4/8 mm. Redovisade halter är medelvärden beräknade på tre mätningar per prov.

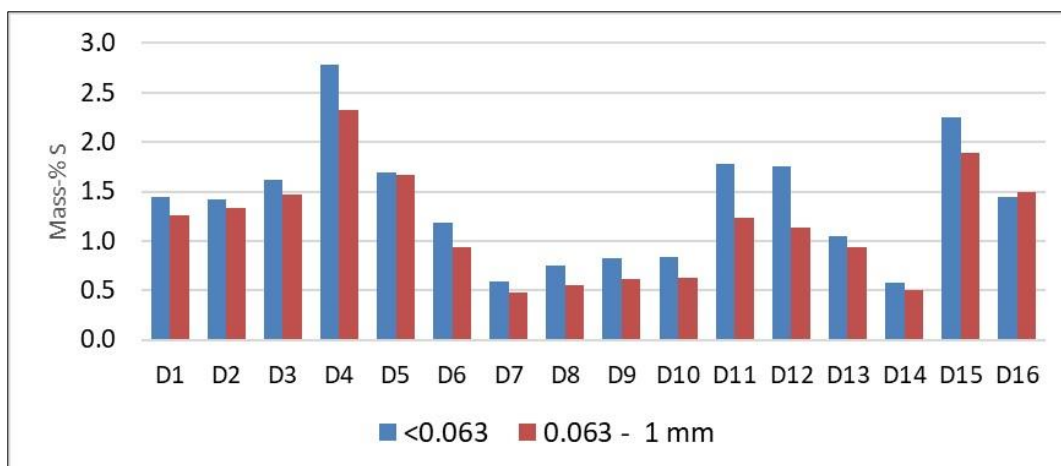
Tabell 5a. Sammanställning av XRF data för svavel (S) och relevanta metaller (mass%) för krossfraktion 0/8 mm. Angivna värden är medelvärden av tre mätningar per prov.

ID	Fraktion	S	Fe	Cu	Zn	Ba
D1	<0.063 mm	1.449	6.172	0.0074	0.0078	0.0516
D1	0.063/1mm	1.258	4.579	0.0016	0.0056	0.0619
D2	<0.063 mm	1.417	6.898	0.0073	0.0092	0.0512
D2	0.063/1mm	1.339	5.336	0.0019	0.0072	0.0717
D3	<0.063 mm	1.617	7.063	0.0085	0.0089	0.0608
D3	0.063/1mm	1.464	5.022	0.0021	0.0059	0.0684
D4	<0.063 mm	2.780	9.289	0.0093	0.0097	0.0598
D4	0.063/1mm	2.324	6.114	0.0035	0.0069	0.0752
D5	<0.063 mm	1.698	7.708	0.0072	0.0121	0.0539
D5	0.063/1mm	1.671	6.038	0.0020	0.0064	0.0711
D6	<0.063 mm	1.183	7.144	0.0059	0.0110	0.0524
D6	0.063/1mm	0.943	4.567	0.0015	0.0060	0.0694
D15	<0.063 mm	2.245	8.069	0.0059	0.0115	0.0549
D15	0.063/1mm	1.887	5.817	0.0023	0.0070	0.0691
D16	<0.063 mm	1.444	7.276	0.0066	0.0100	0.0550
D16	0.063/1mm	1.499	5.943	0.0035	0.0073	0.0623

Tabell 5b. Sammanställning av XRF data för svavel (S) och relevanta metaller (mass%) för krossfraktion 0/150 mm. Angivna värden är medelvärden av tre mätningar per prov.

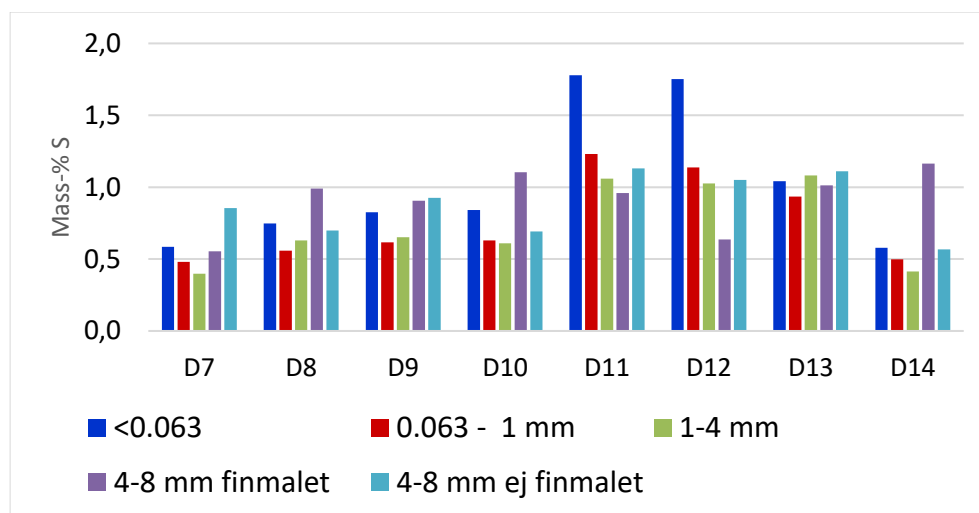
ID	Fraktion	S	Fe	Cu	Zn	Ba
D7	<0.063 mm	0.585	3.982	0.0042	0.0100	0.0614
D7	0.063/1mm	0.480	3.583	0.0017	0.0056	0.0630
D7	1/4 mm	0.399	2.338		0.0031	0.0795
D7	4/8 mm	0.854	3.461	0.0014	0.0120	0.1097
D8	<0.063 mm	0.747	5.326	0.0045	0.0158	0.0460
D8	0.063/1mm	0.558	4.132	0.0036	0.0066	0.0530
D8	1/4 mm	0.630	4.554	0.0028	0.0080	0.0807
D8	4/8 mm	0.699	3.175	0.0011	0.0058	0.0798
D9	<0.063 mm	0.825	5.356	0.0044	0.0166	0.0430
D9	0.063/1mm	0.616	4.137	0.0023	0.0069	0.0576
D9	1/4 mm	0.653	4.114	0.0022	0.0073	0.0749
D9	4/8 mm	0.926	4.170	0.0028	0.0065	0.0857
D10	<0.063 mm	0.842	5.381	0.0055	0.0145	0.0485
D10	0.063/1mm	0.630	4.371	0.0023	0.0073	0.0635
D10	1/4 mm	0.610	3.427	0.0021	0.0047	0.0912
D10	4/8 mm	0.691	3.003	0.0018	0.0053	0.0698
D11	<0.063 mm	1.780	7.256	0.0066	0.0120	0.0475
D11	0.063/1mm	1.230	4.940	0.0020	0.0063	0.0740
D11	1/4 mm	1.060	4.012	0.0014	0.0050	0.0608
D11	4/8 mm	1.131	4.580	0.0020	0.0077	0.0852
D12	<0.063 mm	1.753	7.231	0.0061	0.0129	0.0490
D12	0.063/1mm	1.137	5.070	0.0026	0.0069	0.0748
D12	1/4 mm	1.026	2.970		0.0042	0.0777
D12	4/8 mm	1.051	2.813	0.0015	0.0042	0.1000
D13	<0.063 mm	1.043	5.645	0.0048	0.0121	0.0466
D13	0.063/1mm	0.936	4.389	0.0013	0.0067	0.0597
D13	1/4 mm	1.082	3.612	0.0018	0.0067	0.0799
D13	4/8 mm	1.111	2.676	0.0040	0.0041	0.1209
D14	<0.063 mm	0.579	4.398	0.0043	0.0121	0.0519
D14	0.063/1mm	0.498	3.913	0.0018	0.0071	0.0698
D14	1/4 mm	0.413	2.685	0.0012	0.0043	0.0757
D14	4/8 mm	0.568	2.377	0.0017	0.0059	0.1000

De uppmätta halterna av svavel är med endast ett undantag högre i den minsta fraktionen (0/0,063 mm) än i den näst minsta fraktionen (0,063/1 mm), figur 14.



Figur 14. Svavelhaltsfördelning i bergkross. Analyserna är gjorda på prov framsiktade ur krossprodukterna 0/8 mm och 0/150 mm.

Trenden att uppmätta svavelhalter minskar med ökande partikelstorlek gäller även när fraktionen 1/4 mm inkluderas. Data från XRF-mätningar av grövre fraktioner från krossfraktionen 0/150 mm redovisas i figur 15. Bilden kompliceras när grövre partiklar än 4 mm analyseras. Mätosäkerheten, d.v.s. spridningen mellan de enskilda mätningarna på samma prov, blir då mycket stor. Detta kan sannolikt förklaras av att den yta som instrumentet analyserar är av samma storleksordning eller t.o.m. mindre än de partiklar som analyseras. Därför genomfördes försök där krossfraktionen 4/8 mm finkrossades innan analys. På så sätt blev analyserna mer representativa för hela provet.



Figur 15. Svavelhaltsfördelning med ökande kornstorlek. Data från analys av material framsiktade från krossprodukt 0/150 mm. Fraktionen 4/8 mm analyserades dels i befintlig kornstorlek, dels efter krossning till 0/1 mm.

Statistisk bearbetning av data visar tydligt hur precisionen i mätningarna beror av partikelstorlek, tabell 6. Storleksfraktioner mindre än 1 mm kan analyseras med god precision, men för grövre fraktioner blir spridningen större.

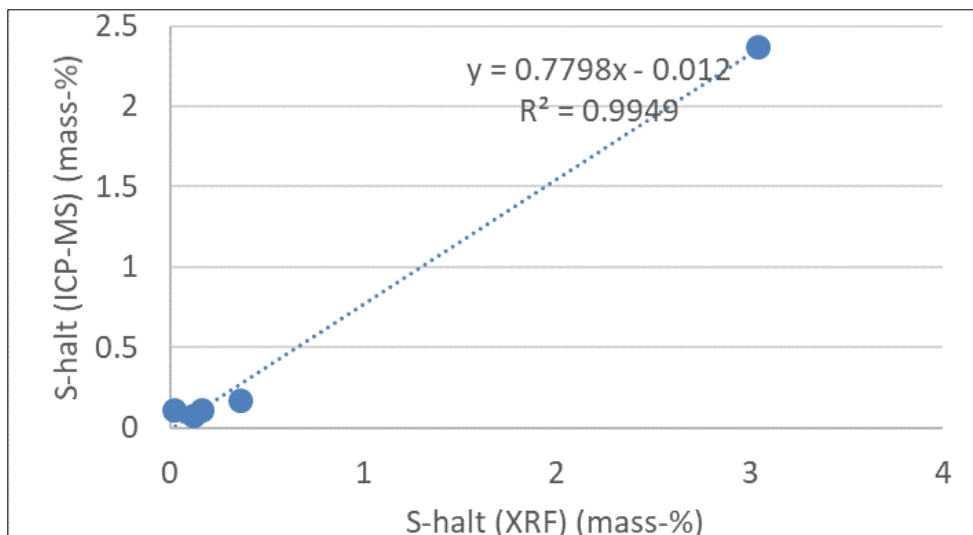
Tabell 8. Resultat från XRF-analys av borrhärnor.

Borr-kärna	Mät-punkt	Halt S (%) Medelvärde 5 mätningar	Stdv	Rel. stdv	Halt S (%) Medelvärde 3 mätningar	Stdv	Rel. stdv.	Avvikelse 5-3 mätningar
KBH1	2	0.471	0.490	104%	0.636	0.603	95%	-35%
KBH1	13	0.466	0.369	79%	0.218	0.189	87%	53%
KBH1	22	0.041	0.025	60%	0.036	0.033	92%	13%
KBH1	33	0.028	0.027	96%	0.012	0.012	68%	58%
KBH1	40	n.d.*			n.d.*			
KBH1	52	0.212	0.138	65%	0.047	0.103	35%	78%
KBH1	59	0.099	0.085	86%	0.075	0.047	63%	24%
KBH1	61	0.064	0.060	93%	0.083	0.074	90%	-29%
KBH1	71	0.045	0.063	140%	0.059	0.083	141%	-31%
KBH1	73	0.050	0.048	96%	0.037	0.303	50%	24%
KBH1	79	0.398	0.303	76%	0.184	0.110	60%	54%
KBH1	84	0.342	0.161	47%	0.380	0.144	38%	-11%
KBH3	89	0.972	0.706	73%	1.305	0.751	58%	-34%
KBH3	100	0.589	0.378	64%	0.805	0.279	35%	-37%
KBH3	106	0.432	0.131	30%	0.376	0.129	34%	13%
KBH3	112	0.260	0.233	90%	0.238	0.257	108%	8%
KBH3	132	0.506	0.431	85%	0.799	0.219	27%	-58%
KBH3	138	0.275	0.281	102%	0.344	0.374	109%	-25%
KBH3	142	2.074	2.151	104%	0.984	0.661	67%	53%
KBH4	144	0.259	0.453	175%	0.374	0.600	160%	-45%
KBH4	151	0.181	0.148	82%	0.112	0.085	76%	38%
KBH4	163	0.265	0.355	134%	0.364	0.462	127%	-37%
KBH4	171	0.602	0.491	82%	0.697	0.666	96%	-16%
KBH4	177	0.720	0.768	107%	1.053	0.873	83%	-46%
KBH4	181	0.594	0.614	103%	0.308	0.156	51%	48%
KBH4	191	0.592	0.908	153%	0.254	0.163	64%	57%
KBH6	202	0.066	0.055	84%	0.059	0.073	124%	11%
KBH6	214	0.038	0.038	140%	0.059	0.064	110%	-54%
KBH6	229	0.017	0.014	81%	0.024	0.015	62%	-39%
KBH7	245	0.093	0.111	119%	0.097	0.135	139%	-4%
KBH7	254	0.024	0.029	118%	n.d.*			
KBH7	271	0.030	0.035	119%	0.045	0.041	92%	-50%
KBH7	284	0.153	0.296	193%	0.251	0.373	149%	-64%
							MEDEL	-3%

* Not detected

Korrelation mellan XRF och ICP-MS

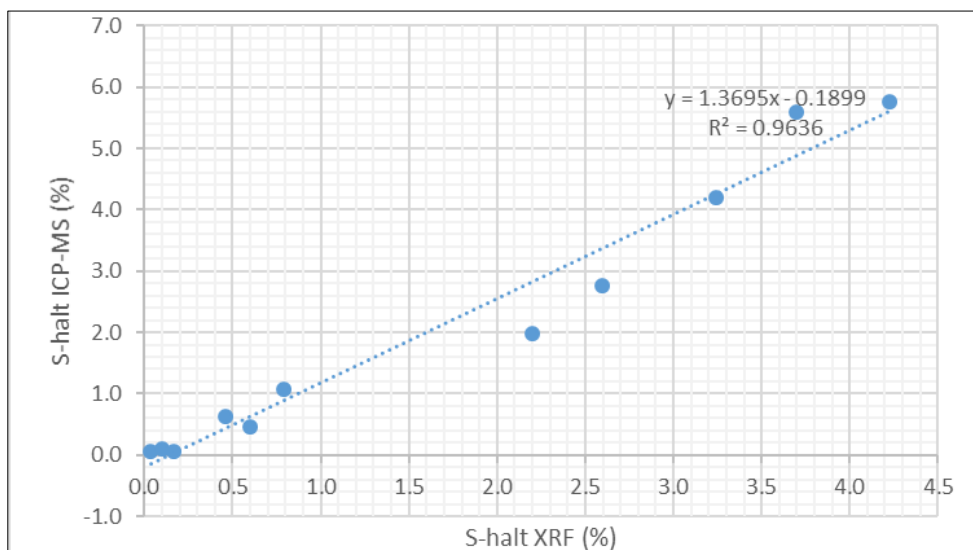
En jämförelse (avseende svavelhalt) mellan XRF och kemisk analys (ICP-MS) avseende har gjorts på fem prov med kornstorlek 0/1 mm, figur 16. Den kemiska analysen genomfördes av ALS Scandinavia AB. Varje prov analyserades i triplikat. XRF-analysen gjordes i triplikat (tre mätningar) på materialet innan det överfördes till provpåse för transport till ALS. Den kemiska analysen och XRF-analysen har följaktligen utförts på identiska material.



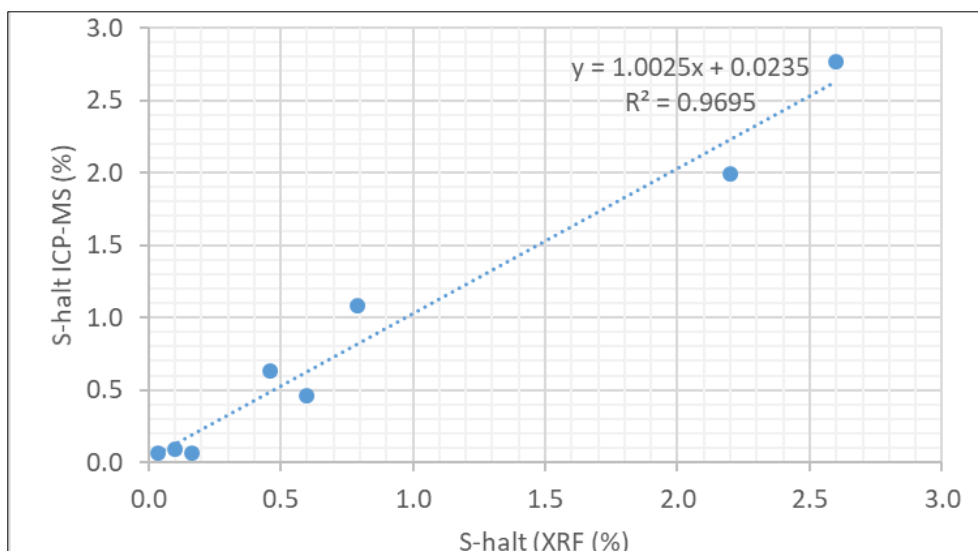
Figur 16. Korrelation mellan svavelhalt analyserad med ICP-MS (ALS) och svavelhalt analyserad med handhållet XRF-instrument (Envix).

Jämförelsen visar att det finns en tydlig korrelation mellan de båda metodernas analysresultat. ICP-MS-analys visade i denna undersökning lägre svavelhalter jämfört med vad handhållen XRF-gjorde. Den statistiska bearbetningen resulterar i att ICP-MS-värdena ligger ca 20 % lägre än XRF. I en liknande undersökning (Lindgren, 2020) baserat på ett något grövre material (70-80 % av materialet <2mm) framkom att grundämnesanalys med ICP-MS genererade högre värden och att avvikelsen blev större ju högre svavelhalt i materialet. Förutom att det studerade materialet var grövre i kornstorleken kan en förklaring till de lägre XRF-mätta halterna vara att dessa inte utfördes med tunn plastfilm utan genom plastpåse.

I ett annat dataset där analyser med såväl XRF som ICP-MS gjordes utan replikat erhöles också god överensstämmelse mellan XRF och ICP-MS. I likhet med den ovan refererade studien av Lindgren (2020) gav XRF lägre värden än ICP-MS vid höga svavelhalter. I figur 17 jämförs de båda metodernas resultat för hela datasetet och i figur 18 görs jämförelsen där de högsta värdena (svavelhalt >4,5 %) har eliminerats. Slutsatsen av jämförelsen är att det finns bra korrelationen mellan handhållen XRF och ICP-MS-analys för svavelhalter upp till ca 2,5–3 %. Vid högre halter erhålls något lägre värden med XRF.



Figur 17. Jämförelse mellan svavelanalyser med hjälp av ICP-MS och XRF. Figuren visar komplett dataset och en mätning per prov.



Figur 18. Jämförelse mellan svavelanalyser med hjälp av ICP-MS och XRF. Figuren visar reducerat dataset (S-halt <3,0 %) och en mätning per prov.

NAG test

NAG-tester har genomförts i laboratoriet på Envix. Testerna har följt den metodik som finns publicerad i bl.a. Stewart, m.fl., 2006 och Karlsson m.fl., 2018:

- ✓ 2,5 g pulveriserat prov slammas upp i 250 ml 15 % (m/V) H₂O₂.
- ✓ Suspensionen får reagera i dragskåp över natten (ca 12 timmar).
- ✓ Överskottet av H₂O₂ avlägsnas genom att suspensionen upphettas till nära kokning tills den synliga reaktionen har upphört (ungefär 1–2 timmar).
- ✓ Avjoniserat vatten tillsätts så att ursprungsvolymen uppnås. Kontroll på volymen hålls genom att väga reaktionskärlet före och efter de olika stegen.
- ✓ Efter att provet svalnat till rumstemperatur mäts lösningens pH och elektrisk ledningsförmåga.
- ✓ Om pH <4,5 betraktas materialet som potentiellt syrabildande och lösningen titreras i reaktionskärlet med 0,1 mol/L NaOH till pH 4,5 och 7,0.

Materialets NAG-värde (nettosyrabildande förmåga) beräknas utifrån förbrukningen av NaOH och uttryckt som kg H₂SO₄/ton.

I denna studie har bergkross och borrhax från tre olika lokalteter (L1, L2 och L3) undersökts. Urvalet av prov har syftat till att få en god spridning i svavelhalt. NAG-testerna har utförts på storleksfraktionen 0/1 mm. Inför varje försök har varje delprov genomgått XRF-analys (triplikat) av det just det material som användes i NAG-försöket.

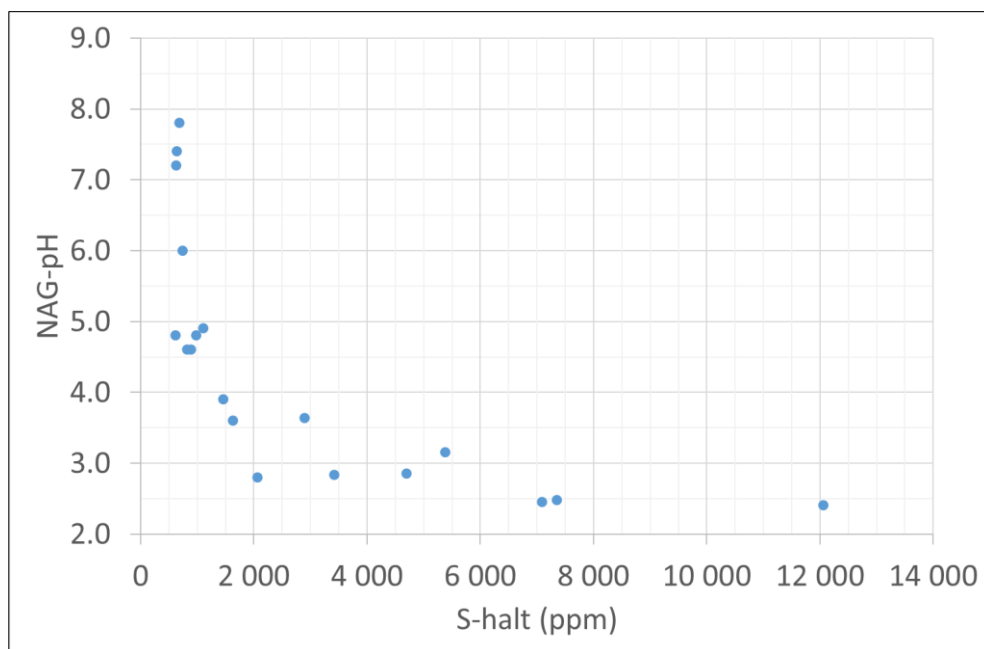
Titringar av de prov som efter oxidation hade pH <4,5 utfördes med SI Analytics Titrator TitroLine® 5000. pH-elektroden kalibrerades i buffertlösningar med pH 4,0 och 7,0.

Resultat

Totalt undersöktes 19 prov inom haltintervallet 600–12 000 ppm svavel. Halten av svavel i det material som testades analyserades med portabel XRF i samband med uppvägning för NAG-testet. Tre XRF-mätningar per prov genomfördes. Testerna genomfördes som "single addition test" på storleksfraktionen 0/0,063 mm.

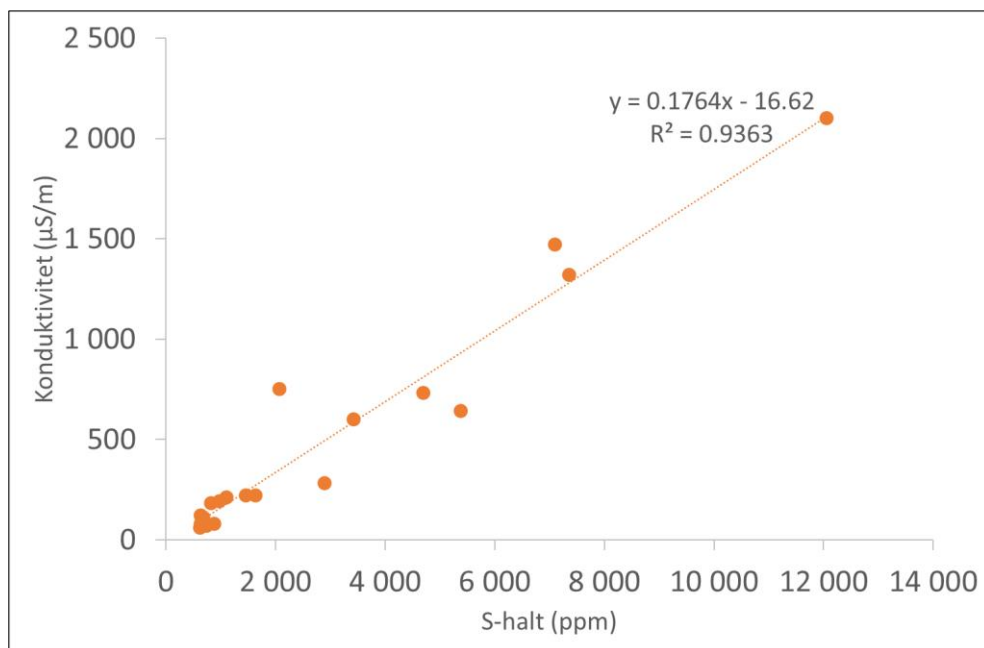
I enlighet med metodbeskrivningen för NAG-test genomfördes titrering med 0,1 mol/L NaOH på de prov vars NAGpH var 4,5 eller lägre.

Åtta av de testade materialen genererade ett pH-värde efter oxidation som låg över 4,5 (figur 19) och betraktas därmed som inte potentiellt syrabildande. Övriga prov klassificeras enligt NAG-metodiken som potentiellt syrabildande och titrerades med natriumhydroxid.



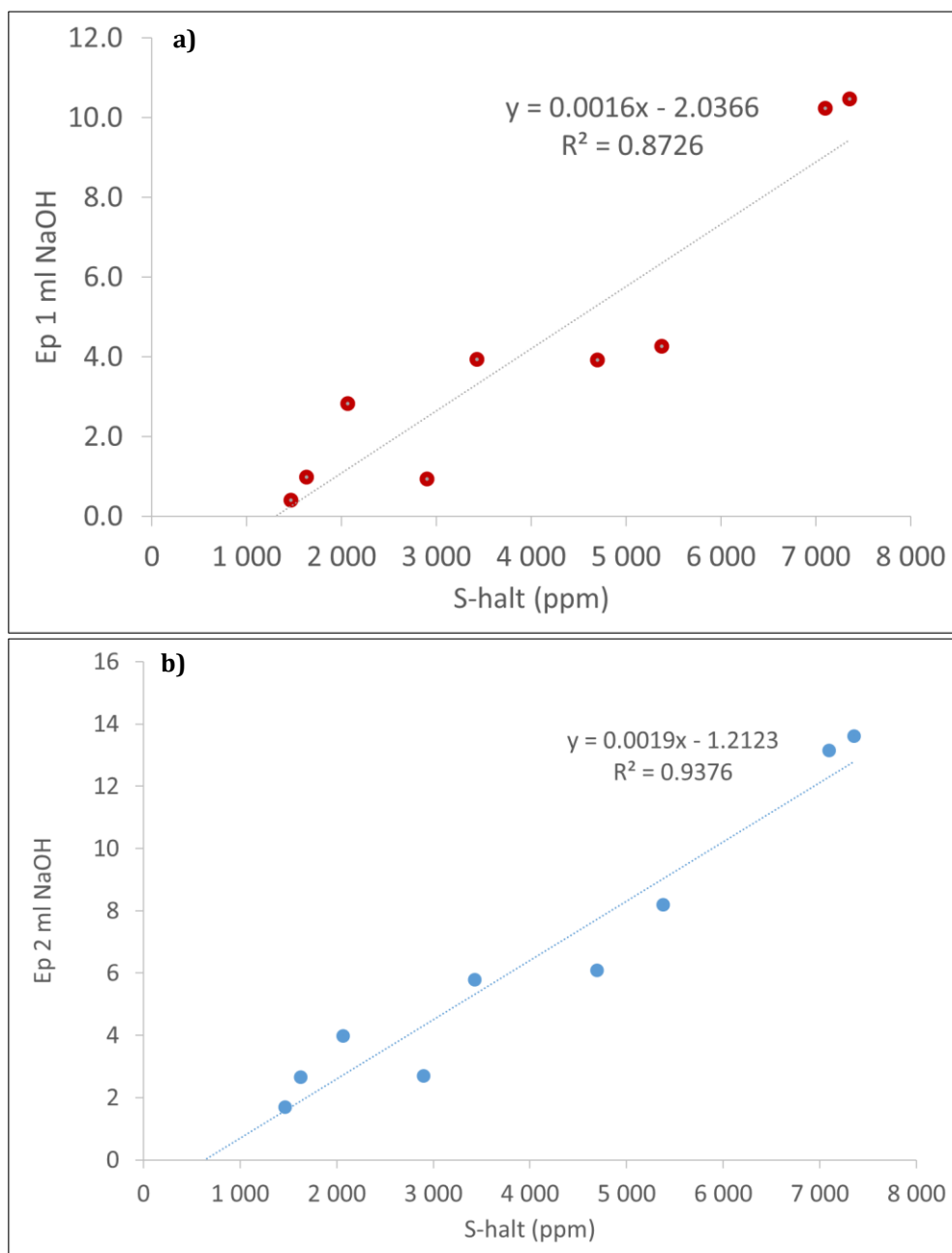
Figur 19. Resultat från NAG-test som visar samband mellan pH och svavelhalt.

Ett tydligt samband noteras mellan lösningens innehåll av lösta joner, mätt som elektrisk konduktivitet och svavelhalt (figur 20).



Figur 20. Resultat från NAG-test där figuren visar samband mellan elektrisk konduktivitet och svavelhalt.

Det finns även ett klart samband mellan svavelhalt och förbrukning av NaOH för såväl den första ekvivalenspunkten (pH 4,5) som den andra (pH 7,0), figur 21a-b.



Figur 21. Förbrukning av 0,1 mol/L NaOH vid titrering till a) pH 4,5 respektive b) pH 7,0 efter oxidation med väteperoxid. Figuren visar reducerat dataset där den högsta svavelkoncentrationen har uteslutits.

Den metod som har använts mellan undersökning med ett oxidationssteg rekommenderas normalt enbart för material som innehåller <7 000 ppm svavel. För högre halter rekommenderas sekventiell NAG med upprepade oxidationer för att säkerställa att allt svavel oxideras.

Linjär regression av erhållna data ger god passning till experimentella data. För ekvivalenspunkt 1, pH 4,5, ligger den resulterande skärningspunkten med X-axeln, d.v.s. den punkt som representerar att ingen nettosyrabildning sker, vid ca 1 300 ppm svavel, och för ekvivalens-

punkt 2, pH 7,0, passeras X-axeln vid ca 600 ppm svavel. Den avvikelse från regressionslinjen som finns mellan de olika proven kan förmodas till stor del reflektera olikheter avseende sulfidmineralens tillgänglighet för oxidation och variationer i syraneutraliserande kapacitet.

NAG-testerna som har genomförts inom ramen för denna utredning visar ett klart samband mellan de undersökta bergmaterialens svavelinnehåll och den nettosyrabildning som sker. Prov med totalsvavel ≤ 500 –1 000 ppm genererar NAG-pH $> 4,5$. I de fall NAG-pH understiger 4,5 visar sambandet mellan tillsatt mängd NaOH för att uppnå pH 4,5 och totalt svavelinnehåll att nettoaciditeten är noll vid totalsvavel ≤ 500 . Den variation i resultat som försöken har genererat kan till stor del förmodas bero på variationer i de sulfidinnehållande mineralens reaktivitet och tillgänglighet liksom variationer i sammansättning och tillgänglighet av syraneutraliserande mineral. Den slutsats som dras är att NAG är en användbar metod för fördjupad analys av sulfidinnehållande bergmaterials syrabildande förmåga.

3.5 Framtagning av klassificeringsmetoder

Resultaten från föreliggande undersökningar indikerar att klassificering av sulfidförande bergmaterial och av bergmaterial framställda krossprodukter efter deras potentiella förmåga att negativt påverka närmiljön genom utsläpp av surt, metallförande vatten ingalunda är en enkel uppgift.

3.5.1 Nuvarande reglering av bergmaterialens svavelhalt

För ballast finns en svensk standard (Svenska Institutet för Standarder, 2003) som reglerar klassificering av ballast gällande svavelinnehåll. Ballast som har totalhalt svavel på ≤ 1 % klassificeras som S₁ och ballast med högre halt av svavel än 1 % klassificeras som S_{Declared}.

De formella nationella regler som finns specifikt för hantering av svavelhaltigt bergmaterial utgör del av Förordning om utvinningsavfall (SFS 2013:319). Enligt förordningen anses bergmaterialet vara inert (d.v.s. icke försurande) om sulfidsvavelhalterna är $< 0,1\%$. Vid högre sulfidsvavelhalter behöver bergets neutraliserande förmåga inkorporeras i bedömningen om potentiell syrabildande potential. Utvinningsavfallsförordningen anger vidare att avfall som innehåller upp till 1 % sulfidsvavel anses vara inert om avfallets neutraliseringspotentialkvot (d.v.s. NP/AP) är större än 3, beräknad som kvoten mellan neutraliseringspotentialen och syrapotentialen enligt ABA-test eller liknande. Till skillnad från utvinningsavfall (främst gruvavfall), som till övervägande delen samlas och hanteras i deponier som kan kontrolleras, distribueras merparten av krossat konstruktionsmaterial frekvent innehållande reaktiv finfraktion över stora arealer och på ett sätt som gör det svårt eller omöjligt att övervaka och vid behov behandla uppkommen surhet. Det finns därför goda skäl att tillämpa en striktare bedömning av hur sulfidinnehållande bergmaterial används som konstruktionsmaterial.

En frekvent använd nedre gräns för vilket bergmaterial som kan bedömas potentiellt försurande är 1 000 ppm. De experimentella resultat som har erhållits i denna undersökning (figur 22) och andra studier, exempelvis Lindgren (2020), visar emellertid att även material med något lägre svavelhalter kan uppvisa försurande egenskaper. Det finns därför skäl att rekommendera en lägre gräns för när bergmaterial ska bedömas vara inert. Detta ligger även i linje med Trafikverkets handbok för hantering av sulfidförande bergarter (Trafikverket, 2015) där bedömningen av parametern försurningspotential byggde på totalsvavelhalter och haltområdet 500–1 000 ppm klassificerades som "Något förhöjd halt".

materiallets nettosyrabildande förmåga och eventuellt behov av behandling innan användning. Om NAG-pH visar <4,5 kan behandling erfordras.

NAG-test på material med höga svavelhalter (>7 000-10 000 ppm) bör genomföras med sekventiell NAG för att säkerställa att allt svavel oxideras.

I en samlad bedömning av försurningsrisk och eventuella behov av behandling är det dock inte tillräckligt att enbart utgå från krossmateriallets innehåll av syrabildande och eventuella syraneutraliserande mineral. Därutöver finns en rad kvarstående aspekter som också måste beaktas, exempelvis: Var i terrängen ska materialet användas? Hur stor volym? Hur ska materialet användas? Vilka storleksfraktioner ska användas? Hydrologiska förhållanden o.s.v. Sådana överväganden ligger utanför ramen för denna utredning att belysa.

3.6 Val, testning och verifiering av hållbara sulfidneutraliseringsmetoder

I syfte att få förståelse av nuvarande tillämpade metoder gällande neutralisering av surhetsgrad (pH) och bergmateriallets potentiella surhet (innehåll av AP och NP faktorer) utfördes en ingående litteraturstudie då grundläggande begrepp, kemiska samband samt olika typer av efterbehandlingsmetoder och effektivitet studerades och bedömdes. Teoretiska studier kompletterades med praktiska resultat från tidigare efterbehandlingar av sulfidgruvor.

3.6.1 Litteraturstudier av sulfidneutraliseringsprocesser

Bakgrund

En av projektets viktigaste uppgifter var att utveckla relevanta, snabba, effektiva och hållbara behandlingsmetoder som ska möjliggöra återanvändning av sulfidmineraliserat krossberg till väg-, järnvägskonstruktioner samt som byggnadsmaterial. De hittills tillämpade neutraliseringsmetoderna är huvudsakligen utvecklade av gruvindustrin och de är inriktade på hantering av surt, metallförande gruvvatten samt behandling av gråbergsdeponier och anrikningssand (J, Taylor m.fl., 2005).

Med hänsyn till att ursprungligt mineraliserat bergmaterial anrikas och aktiveras i krossprodukten finfraktion (Wills & Finch, 2016) samt att krossprodukten efter kort lagringstid ska användas i olika byggkonstruktioner, krävs snabba, effektiva och varaktiga behandlingsmetoder av källmaterialet.

Villkor för neutralisering av mineraliserade krossprodukter

Neutralisering av sulfidförande krossmaterial ställer specifika villkor för använda behandlingsmetoder i form av:

- ✓ Snabb reaktion.
- ✓ Säker och varaktig neutralisering av krossprodukten finfraktion.
- ✓ Enkel teknisk applikation i redan utlagd krossprodukt eller behandling i samband med krossning och siktning.

Med anledning av villkoren kan flera av de inom gruvindustrin använda neutraliseringsmetoderna inte tillämpas i de sammanhang denna studie avser.

3.6.2 Litteraturstudie

I underavsnittet presenteras i litteraturen redovisad kunskap gällande hantering och behandling av sulfidförande bergmaterial.

Aktiv och passiv behandling

Behandlingsmetoder för att reducera AMD (Acid and Metalliferous Drainage, även Acid Mine Drainage) betraktas som aktiva eller passiva. Val av metod baseras på bedömning av källmaterialets potentiella surhet, flöde och utsläppets belastningsgrad. Behandlingens syfte är att höja pH och minska koncentration av miljöfarliga metaller. Många behandlingsmetoder fokuserar på behandling av läckaget och inte på behandling av försurningskällan som i aktuellt fall utgörs av krossat bergmaterial (Matthies m.fl., 2011, Lindsay m.fl., 2015 och St. Arnault m.fl., 2019).

Med *aktiv behandling* menas användning av fasta eller portabla anläggningar för in situ-behandling av lakvatten. Exempel på aktiva behandlingsanläggningar är låg- och högdensitets slamanläggningar, pulserande karbonatreaktorer och mikrobiologiska reaktorer.

Passiva behandlingssystem lämpar sig bäst för utsläpp med låg surhet, låga flöden och därmed låg surhetsbelastning (tabell 9).

Tabell 9. Metoder för passiv behandling av sulfidmineraliserat berg (Taylor m.fl., 2005).

Passive Treatment Methods	Application
Open/Oxic limestone drains (OLD)	Successive alkalinity producing systems (SAPS)
Anoxic limestone drains (ALD)	Permeable reactive barriers (PRB)
Limestone diversion wells (LDW)	Slag leach beds (SLB)
Pyrolusite® limestone beds	Microbial reactor systems (MRS)
Aerobic and anaerobic wetlands	Sulphide passivation compounds
Reverse alkalinity producing systems (RAPS)	Alkalinity producing covers
Vertical flow wetlands	Gas Redox and Displaysments System (GaRDS)
Alkalinity producing systems (APS)	Electrochemical covers

Nästan alla återgivna åtgärder är inriktade på behandling av utläckande lakvatten och spridning av metallföroreningar till recipienten och lämpar sig därför inte för behandling av krossmaterial (källmaterial) som kommer att läggas i vägkonstruktioner, som utfyllnadsmaterial m.m. och som därför blir direkt påverkat av oxidation och genomströmmande nederbördsvatten (utlakning).

Syrebarriärer vid efterbehandling av gruvavfallsdeponier och gruvindustriområden

Vid efterbehandling av deponier med potentiellt syrabildande gruvavfall täcks normalt avfallet för att långsiktigt förhindra oxidation av sulfidmineral och läckage av tungmetaller. Det handlar antingen om s.k. kvalificerad torrtäckning eller genom vattentäckning. Val av metod beror på de lokala förutsättningarna. Oavsett form måste täckningen måste vara beständig över lång tid (Höglund m.fl., 2004).

En kvalificerad torrtäckning består av ett vattenhållande tätskikt närmast avfallet, följt av ett skyddsskikt med uppgift att skydda tätskiktet från uttorkning, tjälinträngning och rotpenetration. På skyddsskiktet anläggs ett vegetationsskikt som erosionsskydd.

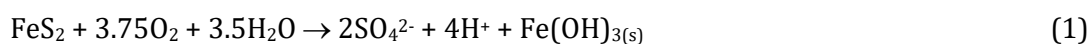
Vattentäckning sker genom överdämning av avfallsmagasin, deponering av anrikningssand och/eller gråberg i dagbrott följt av återställning av grundvattenytan eller genom deponering av avfallet i en sjö. Vid vattentäckning är det viktigt att åstadkomma ett stillastående vatten närmast avfallet för att minska tillförseln av syre genom diffusion eller strömning.

I de fall gruvavfallet inte bedöms vara syrabildande eller att avfallet klassificeras som inert används vanligtvis enklare former av torrtäckning.

Sulfidernas reaktivitet

Som primärt försurande mineral betraktas svavelkis och markasit, (FeS₂), magnetkis (FeS), kopparkis (CuFeS₂), arsenikkis (FeAsS) och pentlandit (Fe,Ni)₉S₈.

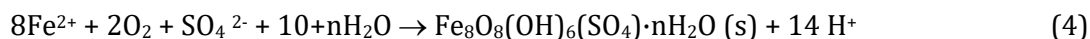
Svavelkis innehåller två komponenter som kan oxideras i kontakt med syre: tvåvärt järn (Fe^{II}) och disulfid (S₂²⁻). Vid fullständig oxidation frigörs totalt fyra vätejoner per formelenhet av svavelkis under bildning av sulfat och utfällning av järnhydroxid (reaktion 1).



Reaktionen kan emellertid ske i två steg där disulfiden först oxideras till sulfat och två vätejoner (reaktion 2), och det tvåvärda järnet senare oxideras till trevärt och fälls ut som järnhydroxid (reaktion 3).

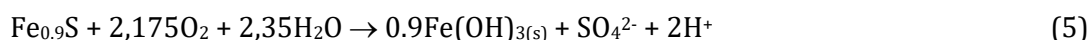


Vid mycket låga pH-värden kan i stället sulfatinnehållande faser med trevärt järn, såsom jarosit och schwertmannit, fällas ut (reaktion 4).

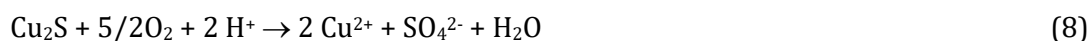


De sulfatinnehållande järnhydroxiderna kan i sig utgöra en källa till surhet då de med tiden kan omvandlas till rena järnhydroxider, vilket frigör vätejoner.

Vid oxidation av magnetkis frigörs en vätejon per formelenhet, men relaterat till mineralets svavelinnehåll blir relationen densamma, 2 vätejoner per svavelatom (reaktion 5).



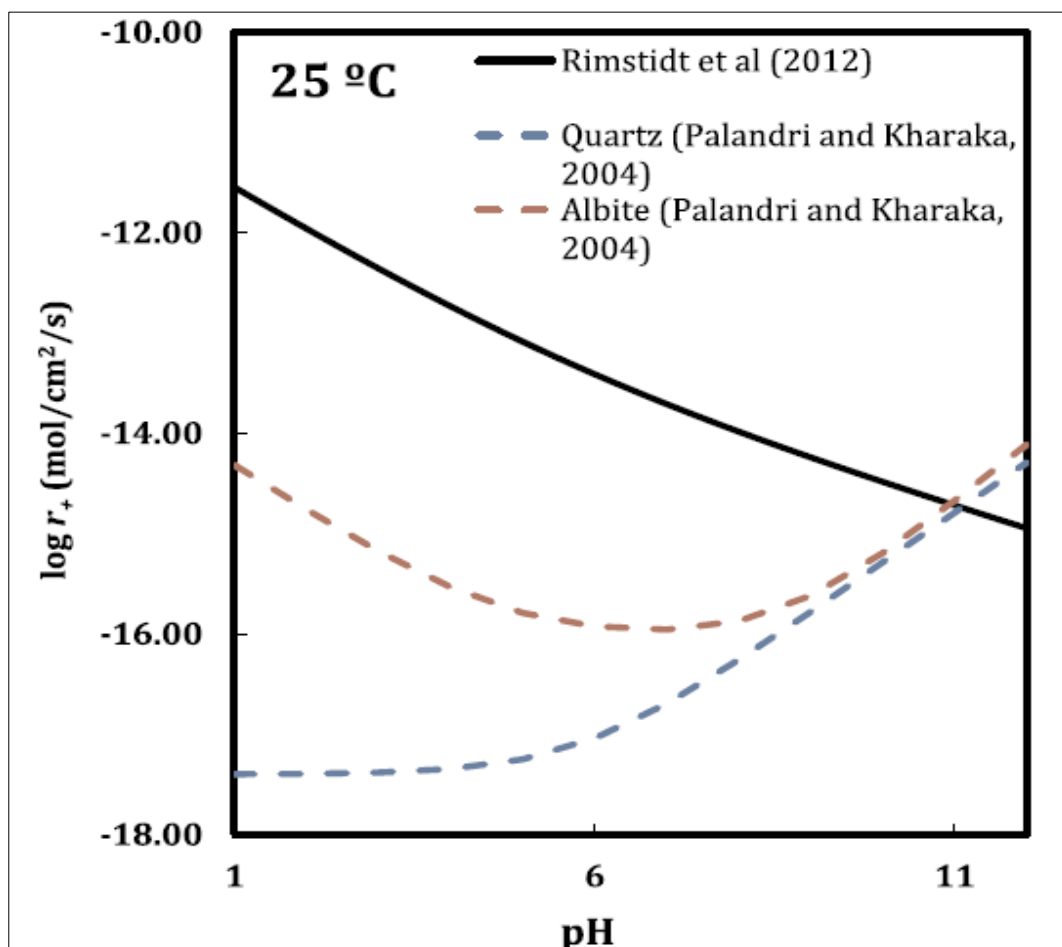
I litteraturen betraktas zinkblände, blyglans, kopparglans och covellin som icke försurande sulfider (reaktion 6-9):



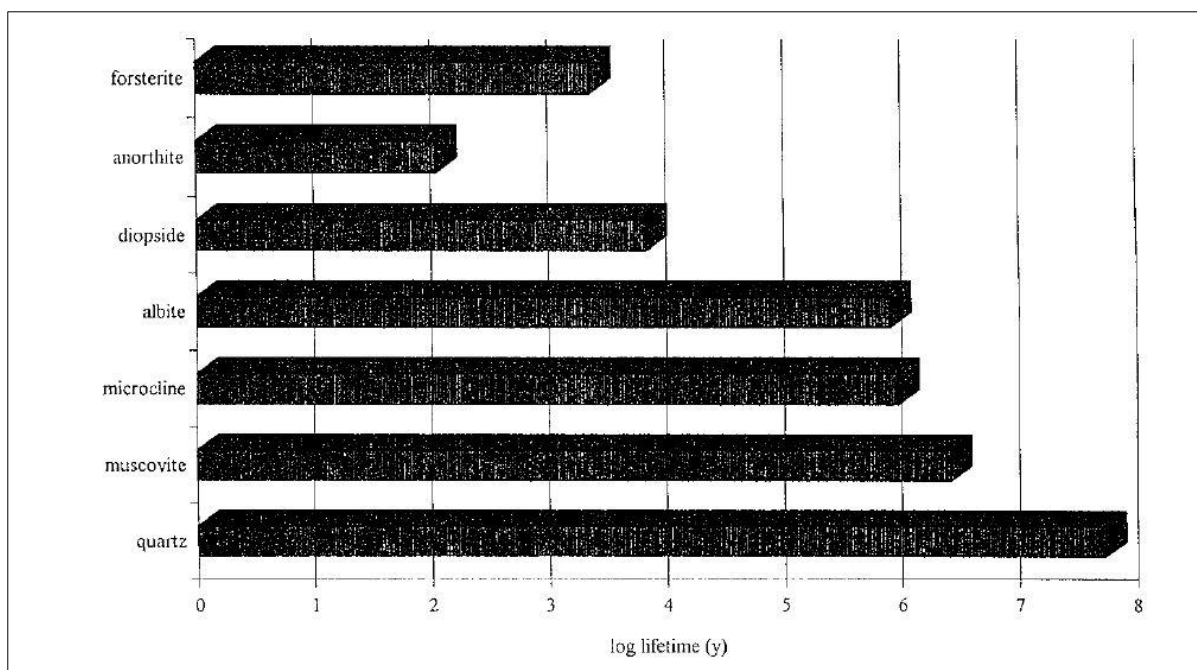
I vissa publikationer räknas även zinkblände (Zn, Fe, Cd)S-, blyglans (PbS), kopparglans (Cu₂S) och covellin (CuS) som surhetsbildande mineral, dock under starka oxidationsförhållanden (Stenvall, 2005).

Inom gruvindustri används begreppen utsläppskontroll på kort- och lång sikt, där korttidskontroll baseras på snabba NAP-reaktioner (innehåll av kalcit) och långtidskontrollen är beroende av vittring av svårslösliga silikater.

Den syra som bildas vid oxidation av sulfidinnehållande berg kan, avhängig av berggrundens sammansättning som helt, delvis eller i obetydlig utsträckning neutraliseras genom att reagera med de mineral som berggrunden på platsen innehåller. Mineral som utan konkurrens är de mest reaktiva vid neutralisering av surhet är karbonatmineral, varav kalcit (kalkspat, CaCO_3) är det dominerande. I den svenska prekambrisk berggrunden förekommer kalcit huvudsakligen som underordnat eller accessoriskt mineral, eftersom bergmassan domineras av silikater och aluminosilikater (Miškovský, 1985). Reaktiviteten hos aluminosilikater och silikater är mycket lägre och betydligt långsammare än hos karbonater och sulfider. Dessutom är de klimatberoende. Reaktionshastigheten normaliserad till yta är flera tiopotenser långsammare hos silikatmineralen (Jambor m.fl., 2002; Höglund m.fl., 2004) jämfört med karbonaters och sulfiders. Det har också visats att vittringshastigheter för silikatmineral i fält är upp till 10 gånger långsammare i fält än i laboratoriestudier (Höglund m.fl., 2014). I den utsträckning silikatmineral bidrar till syrakonsumtion handlar det främst om ytnära jonbyte där alkalimetaller (K^+ och Na^+) och alkaliska jordartsmetaller (Ca^{2+} och Mg^{2+}) byts ut mot vätejoner från vattenlösningen. Det finns exempelvis stark evidens för hur upplösning av mineralet forsterit (olivin) påtagligt avtar med tiden (Oelker m.fl., 2018). Den syraneutraliserande kapaciteten hos silikat- och aluminosilikatmineral är tidsmässigt och klimatomfattigt begränsad (figur 23-24).



Figur 23. Jämförelse av upplösningshastigheten normaliserad till yta för kvarts, albit (Palandri, Kharaka, 2004) och forsterit (Rimstidt m.fl., 2012) vid olika pH vid $T=25^\circ\text{C}$.



Figur 24. Tidsberäkningar (log lifetime) av silikaternas löslighet vid $T=25^{\circ}\text{C}$ och $\text{pH } 5$ (Lasaga m.fl., 1994).

Neutraliseringsreaktioner och neutraliseringsmedel

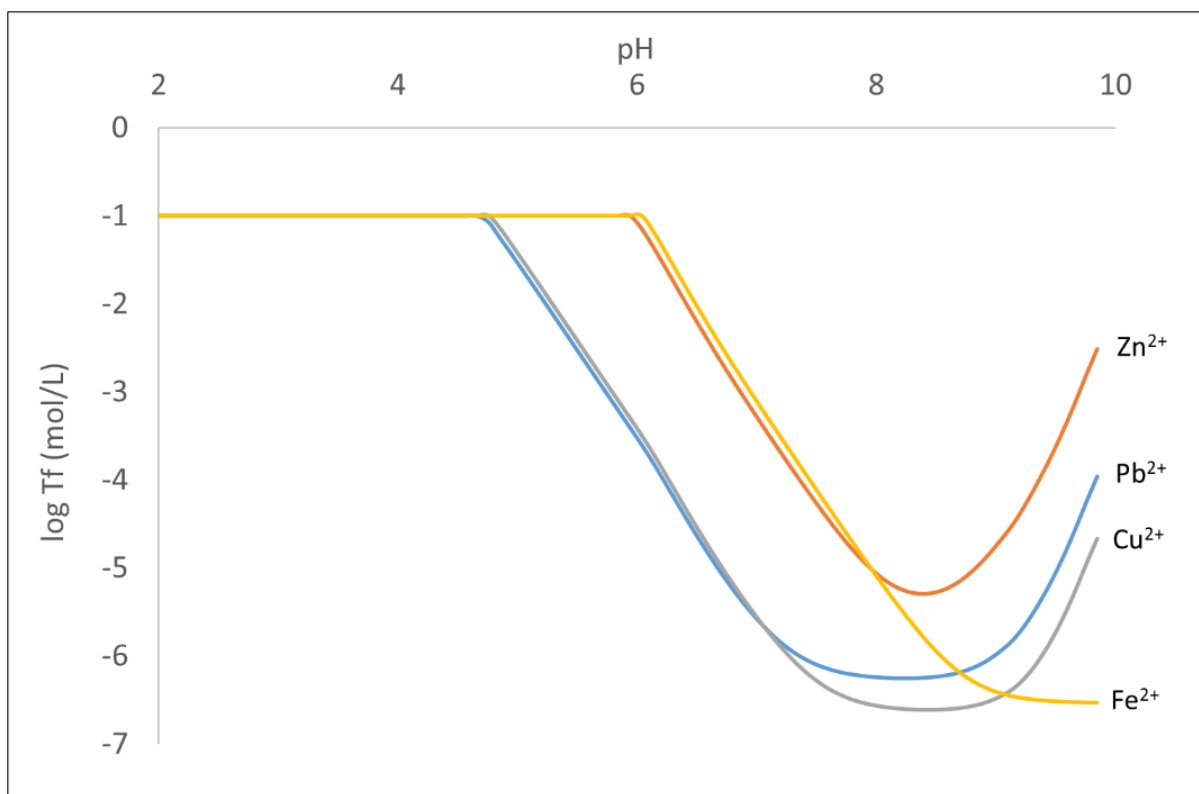
Med sulfidneutralisering menas i första hand pH-höjande åtgärder med buffrande effekt. I samband med pH-höjande åtgärder reduceras lösningens innehåll av metaller bundna till sulfidmineralen. Som pH-höjande medel används allmänt olika snabbt till medium lösliga oxider, hydroxider eller karbonater. Resultatet varierar då mellan 8,5-12. Trots att metallreduktionsprocesser har stor betydelse för varaktig neutralisering av primära sulfidmineral, behandlas dessa processer sparsamt i litteraturen. En del publikationer behandlar adsorption av metalliska kationer på mikrokristallina eller amorfa järnutfällningar. I ekvationerna (reaktion 10-11) nedan presenteras kalcitreaktioner i kontakt med vatten och med sulfidproducerad surhet (H_2SO_4), vilket leder till bildning av gips eller metalliska sulfater.



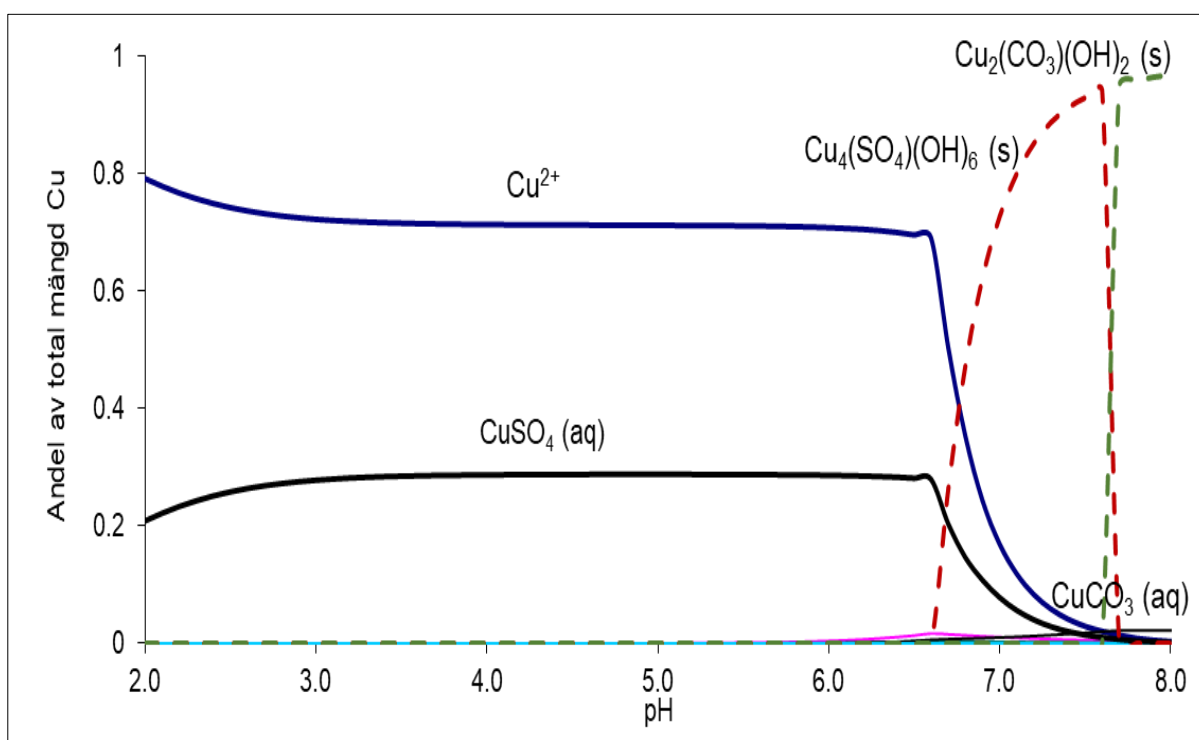
och



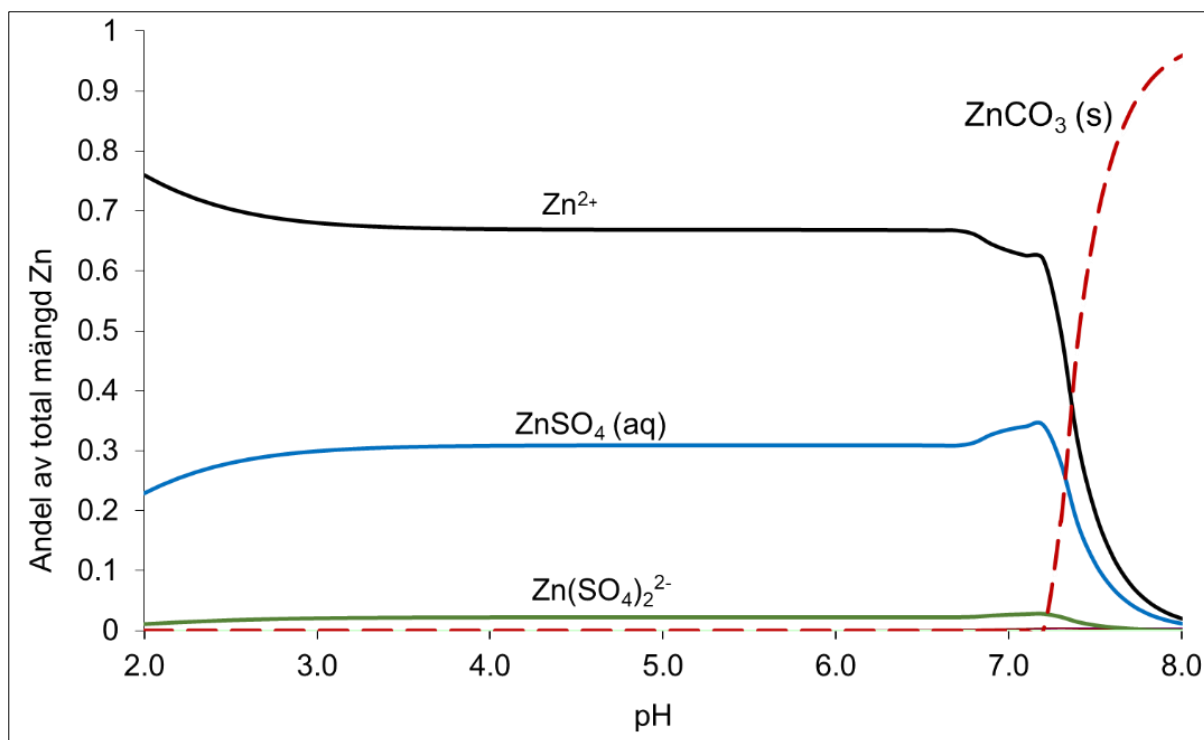
Ett av projektets mål var att studera reaktioner mellan sulfidens metalliska beståndsdelar och alkalilösningens karbonater som vid höga pH-förhållanden uppnår hög koncentration och kan ge upphov till bildning av mikrokristallina eller amorfa svårlösliga Me-hydroxykarbonater och Me-hydroxysulfater (figur 25). Teoretiskt kan dessa fällas ut på primära sulfidens exponerade reaktionsytor och på så sätt förhindra vidare oxidation (coating). Hypotesens idé grundas på teoretiska fasdiagram (figur 26-29), på naturliga malmbildande processer (supergen malmbildning) och på praktiska erfarenheter från efterbehandling av gråbergssupplag från sulfidmalmsgruvor.



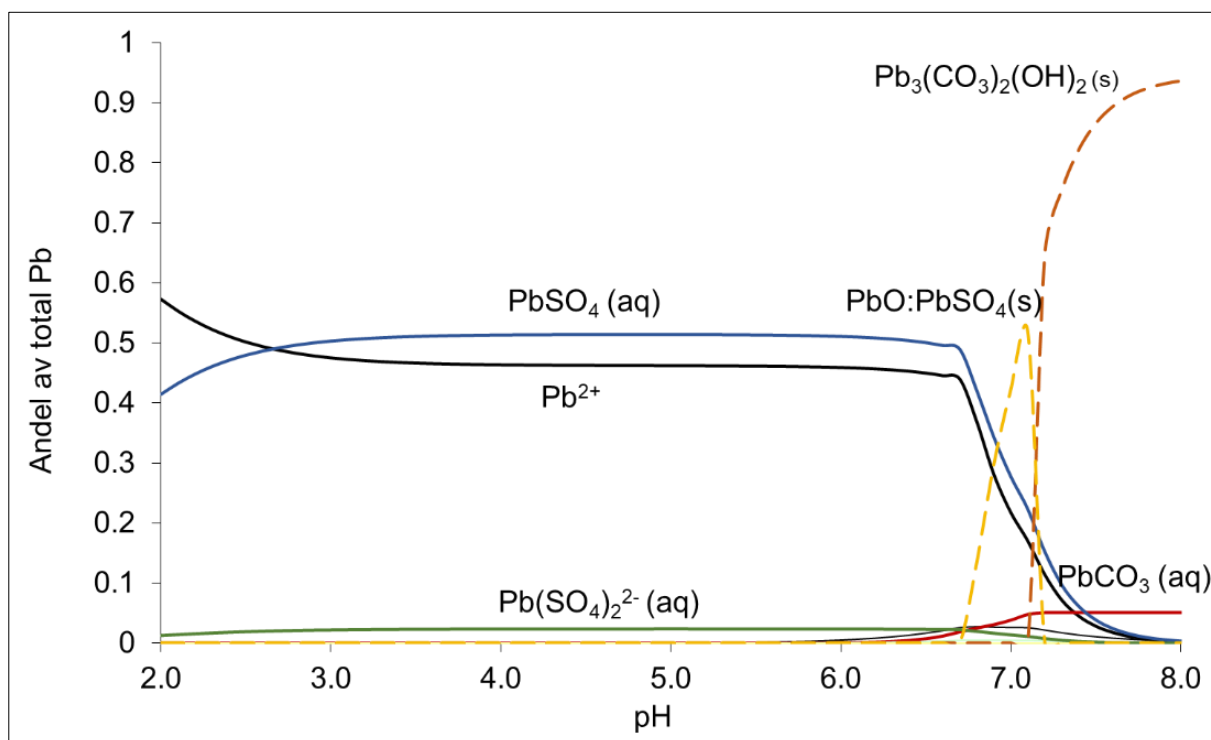
Figur 25. Samband mellan basmetallars, karbonaters löslighet och pH. Beräkningarna är gjorda med WinSGW (Karlsson and Lindgren, 2004), $[Me]_{tot} = 0.1 \text{ mol L}^{-1}$; $P_{CO_2} = 0.0004 \text{ atm}$.



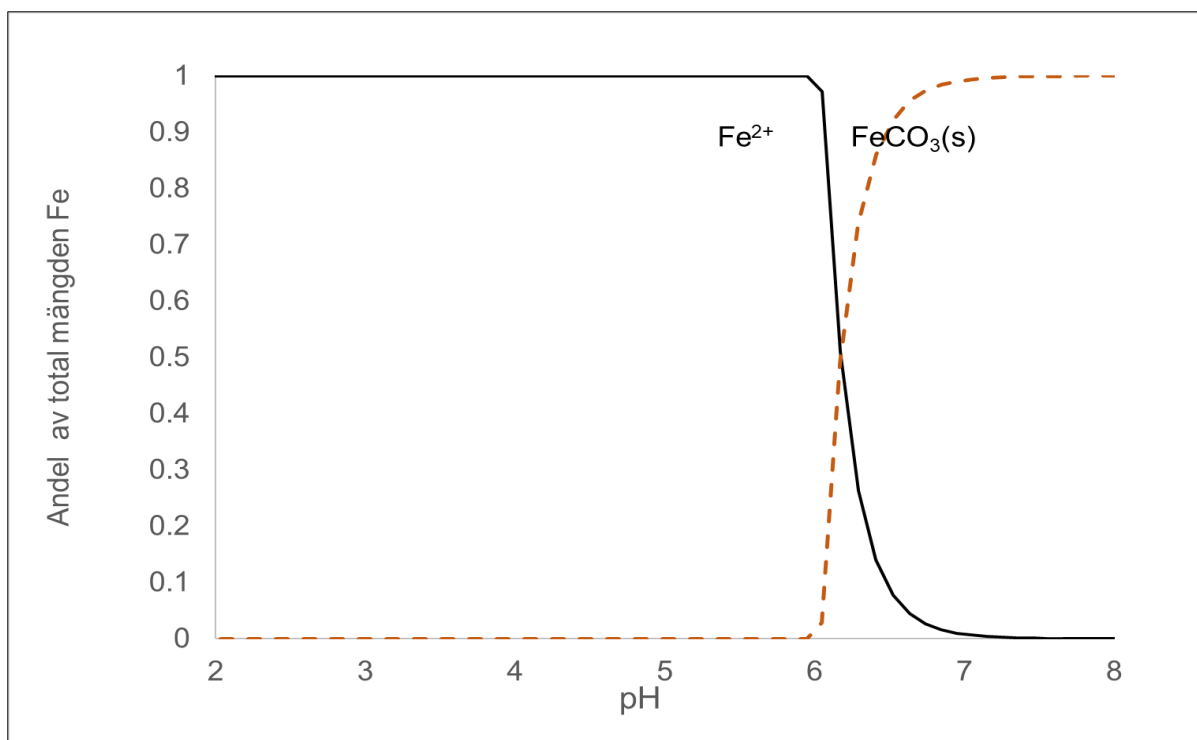
Figur 26. Fördelning av Cu-species med pH variation. Beräkningarna är gjorda med WinSGW (Karlsson and Lindgren, 2004), $[Cu]_{tot} = 0.1 \text{ mol L}^{-1}$; $[SO_4^{2-}]_{tot} = 10 \text{ mmol L}^{-1}$ och $P_{CO_2} = 0.00035 \text{ atm}$.



Figur 27. Fördelning av Zn-species med pH variation. Beräkningarna är gjorda med WinSGW (Karlsson and Lindgren, 2004). $[Zn]_{tot} = 0.1 \text{ mol L}^{-1}$; $[SO_4^{2-}]_{tot} = 10 \text{ mmol L}^{-1}$ och $P_{CO_2} = 0.00035 \text{ atm}$.



Figur 28. Fördelning av Pb-species med pH variation. Beräkningarna är gjorda med WinSGW (Karlsson and Lindgren, 2004), $[Pb]_{tot} = 0.1 \text{ mol L}^{-1}$; $[SO_4^{2-}]_{tot} = 10 \text{ mmol L}^{-1}$ och $P_{CO_2} = 0.00035 \text{ atm}$.



Figur 29. Fördelning av Fe^{+II} -species med pH variation. Beräkningarna är gjorda med WinSGW (Karlsson and Lindgren, 2004). $[Fe]_{tot} = 0.1 \text{ mol L}^{-1}$; $[SO_4^{2-}]_{tot} = 10 \text{ mmol L}^{-1}$ och $P_{CO_2} = 0.00035 \text{ atm}$. Notera att existensen av Fe^{+II} förutsätter anaeroba förhållanden.

De i branschen använda neutraliseringsmedlen redovisas i tabell 10.

Tabell 10. Exempel på neutraliseringsmedel (Taylor, Pape and Murphy, 2005).

Neutraliseringsmedel	pH vid mättnad	Löslighet i kallt vatten (mg/l)
Kalksten, $CaCO_3$	8-9.4	14
Dolomit, $CaMg(CO_3)_2$	8-9.5	10-300
Magnesit, $MgCO_3$	9.5-10	60-100
Bränd kalk, CaO	12.4	1 300-1 850
Släckt kalk, $Ca(OH)_2$	12.4	1 300-1 850
Magnesiumoxid, MgO	9.5-10.8	1-50
Magnesiumhydroxid, $Mg(OH)_2$	9.5-10.8	1-50
Soda, Na_2CO_3	11.6	75 000
Kaustiksoda, $NaOH$	14	450 000
Ammoniak, NH_3	9.2	900 000

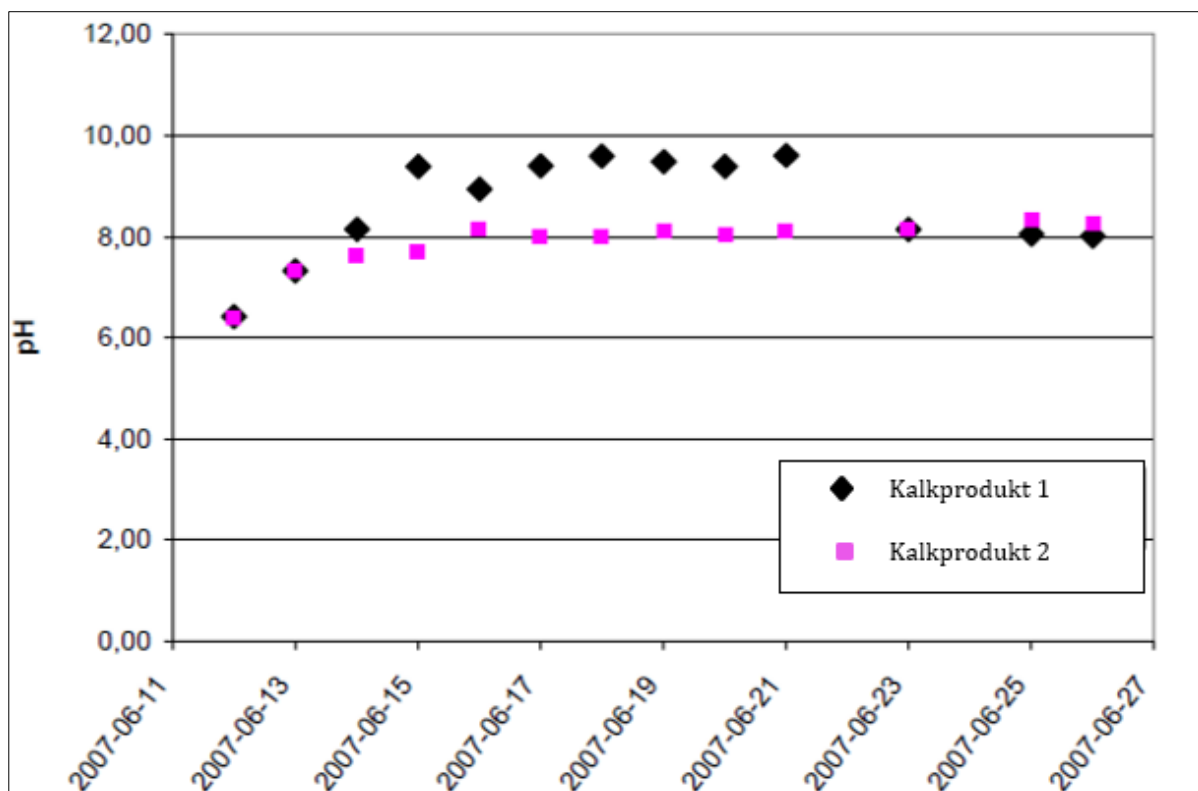
Som mindre vanliga neutraliseringsmedel nämns kalkugnsdamm, cementugnsdamm, flygaska m.m. Användning av kalkprodukter och grönlutsslam nämns i skandinavisk litteratur (Alakangas, m.fl., 2013).

3.6.2 Exempel på neutralisering av sulfidförande gråberg

I kommande stycken demonstreras ett exempel på resultat från laborietester samt från fullskalig behandling av gråbergskross, gruvutfyllnad och deponi. Projektets metod kan delvis tillämpas vid neutralisering av bergkross.

Val av neutraliseringsmedel

Efter laboratorieförsök inför efterbehandling av gråbergsfylld sulfidmalmsgruva, gråbergssupplag och industriområde valdes den kalkprodukt med ett högt initialt pH. Kalkprodukten domineras av CaCO_3 med inslag av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som neutraliseringsmedel. Närvaron av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i vald kalkprodukt höjer initialt pH och koncentration av CO_3^{2-} i slurryn (vatten och kalkprodukt) och påskyndar sulfidneutraliserings processen. Efter genomförd sulfidneutralisering upprätthåller CaCO_3 alkalisk miljö (figur 30).

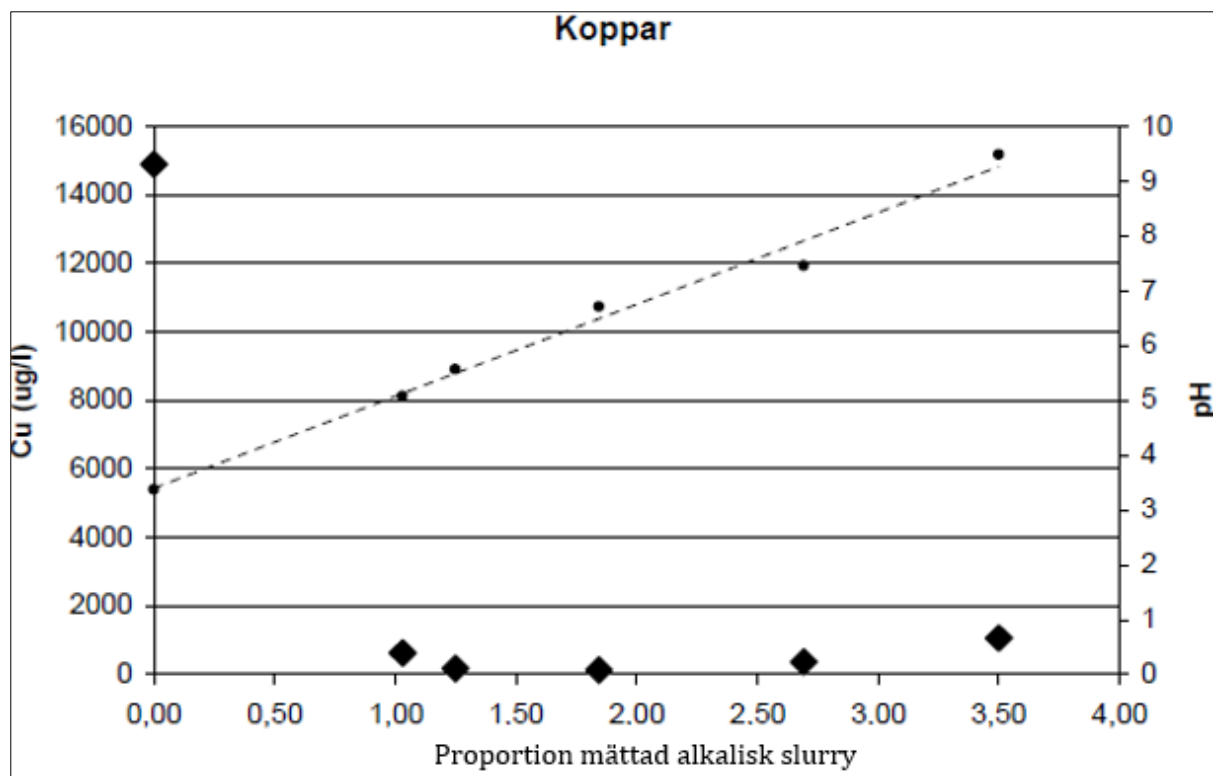


Figur 30. Jämförelse av pH-påverkan vid användning av två olika kalkprodukter vid neutralisering av sulfidförande finfraktion från en sulfidmalmsgruva.

Neutralisering av sulfidförande gråberg i laboratorieförsök

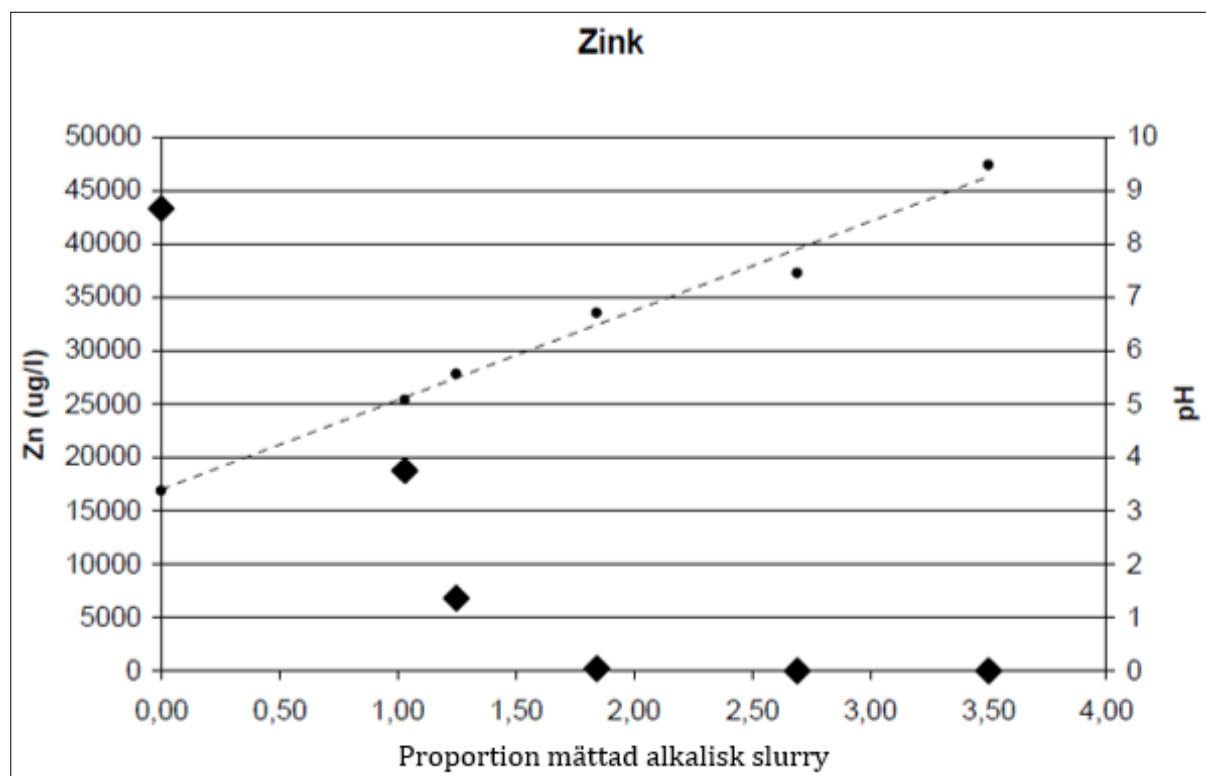
Krossmaterial 0/2 mm behandlades med varierande volymer av mättad alkalisk slurry. Resultat från flaskförsök (figur 31-33) visar att det behövdes förhållandet 1:1 mättad alkalisk slurry och volym av krossberg för att uppnå maximal reduktion av koppar (96 %). För reduktion av zink och kadmium krävdes 1,5-2:1 dos av mättad slurry.

Från figur 31 framgår att kopparhalten reduceras med >90% vid 1:1 proportion mättad slurry/sulfidkross hos gråbergsmaterial i studerad gruva. Reduktionen av koppar äger rum redan vid pH 5,5-6. Vid höga pH, >9,5, ökar kopparlösligheten något.



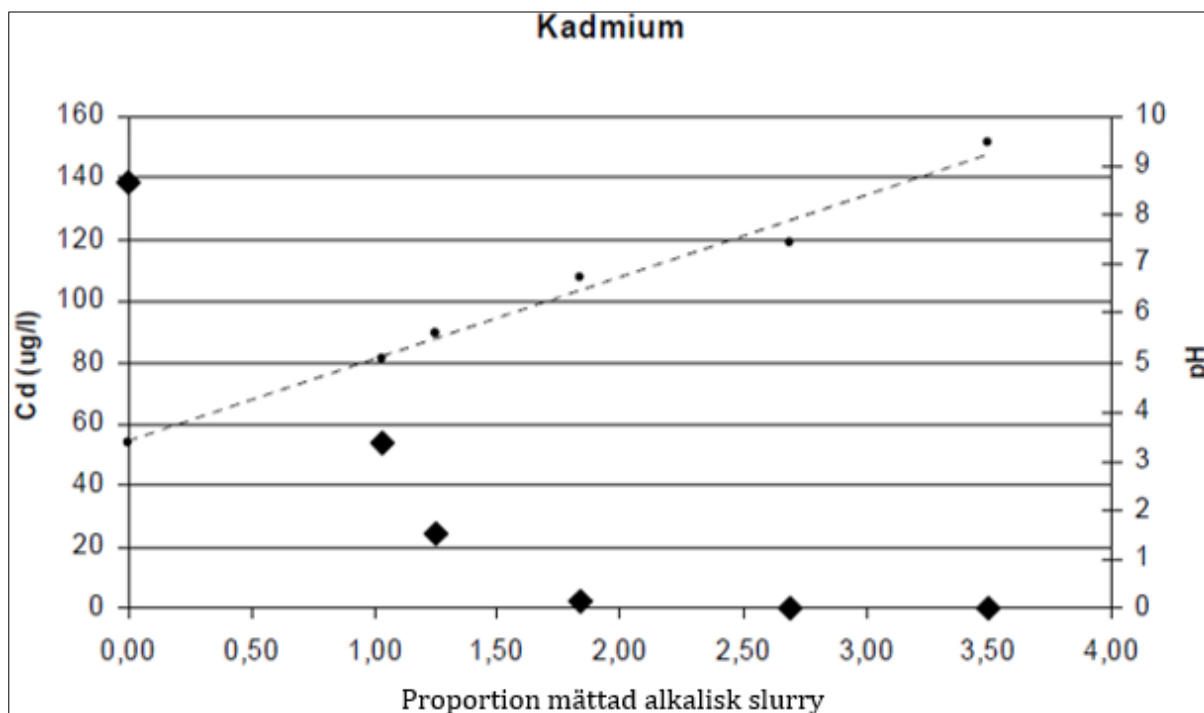
Figur 31. Proportion slurry/kross nödvändig för reduktion av Cu (●=pH, ◆=koncentration Cu).

Från figur 32 framgår att zinkreduktion kräver högre dosering av slurry än vid kopparreduktion, upp till 2:1, eftersom reaktionen äger rum vid pH 6,5-9,5.



Figur 32. Proportion slurry/kross nödvändig för reduktion av Zn, (●=pH, ◆=koncentration Zn).

Från figur 33 framgår att dosering av slurry och pH-område för reduktion av kadmium följer den för zink.



Figur 33. Proportion slurry/kross behövlig för reduktion av Cd (●=pH, ◆=koncentration Cd).

Det kan påpekas att försök gällande sulfidneutralisering genom tillförsel av rötslam i syfte att skapa reduktionsmiljö och stoppa sulfidoxidation inte gav några konkreta resultat. Anledningen till detta var med all sannolikhet krossmaterialets höga permeabilitet med initialt hög luftvolym i materialet, oxidationsreaktionens bakteriella beroende även under reduktionsförhållanden, humussyrornas buffringsförmåga (lågt pH) och absorption samt transport av katjoniska metaller.

Fullskalig behandling av sulfidmalmsgruva

Beroende på resultat från genomförda laboratieförsök och teoretiska beräkningar var fullskalig efterbehandling av studerad sulfidmalmsgruva baserad på två steg:

1. Kemisk behandling av gråbergsmassor med beräknade volymer av alkalisk slurry åtföljd med kontroll av grundvattnets pH och metallhalt.
2. Övertäckning av objekten (gruva och gråbergsdeponi) med icke-permeabelt geomembran överlagrad med moränskyddslager. Detta i syfte att primärt avleda områdets yt- och grundvatten (oxidationsprodukternas reaktions- och transportmedel) samt effektivt sänka gruvans grundvattennivå. Denna åtgärd minskade även massornas syresättning.

Efterbehandlingens resultat

Efterbehandlingen av det gråbergsfyllda dagbrottet och industriområdet resulterade i:

- ✓ Minskning av utströmmande vatten från gruvobjektet.
- ✓ 90 % reduktion av metallhalter (Cu, Zn, Cd) i utströmmande vatten.
- ✓ Tämigen snabb återhämtning av den metallförorenade och biologiskt starkt påverkade sjön. I dag är vattendragets bottenfauna och fiskbestånd normalt fungerande.
- ✓ Åtgärdens varaktighet kontrolleras årligen sedan 2007. Metallutsläpp reducerades med 90-97 % och en nära sjös flora och fauna är helt återställd.

3.6.3 Laboratorieförsök för neutralisering av sulfidmineraliserat bergkrossmaterial

Inom ramen för det aktuella projektet genomfördes laborativa studier av neutraliseringsprocesser av sulfidförande ballastprodukter. Syftet var att närmare undersöka neutraliseringsprocessens kemiska och mineralogiska reaktioner samt behandlingens varaktighet.

Bakgrund och val av neutraliseringsmedel

Till skillnad från efterbehandling av restprodukter från gruvproduktion ställer neutralisering av sulfidförande konstruktionsmaterial specifika villkor som innebär snabb reaktion enkel teknisk applikation samt varaktig neutralisering krossprodukternas finfraktion.

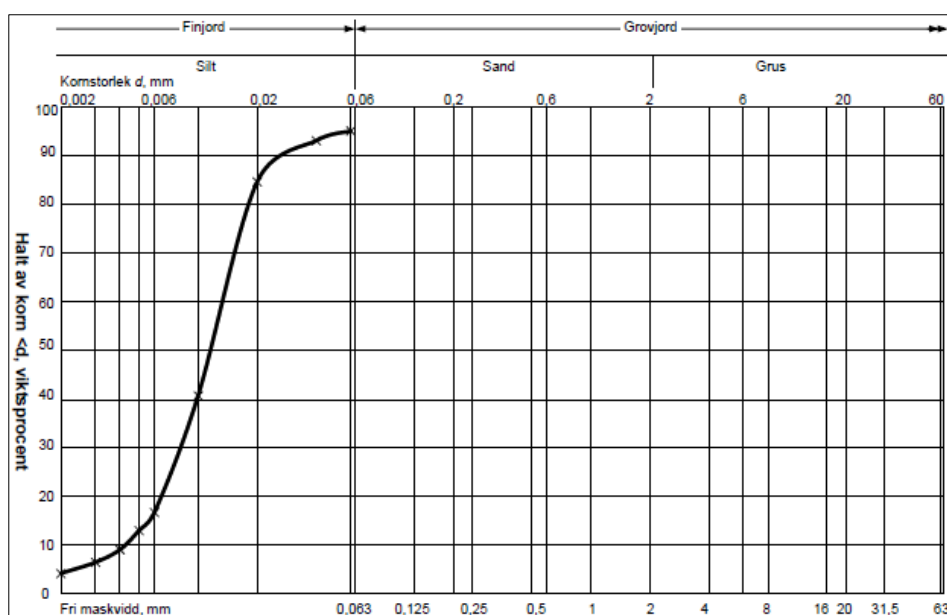
Av dessa anledningar har val av neutraliseringsmedel avgörande betydelse för lyckad behandling. I tabell 9 visas exempel på passiva neutraliseringsmedel.

I tabell 10 presenteras internationellt rekommenderade alkaliska neutraliseringsmedel inklusive kalksten och kalciumhydroxid. Observera kalkstensens relativt låga löslighet i jämförelse med lösligheten för kalciumhydroxid.

Med hänsyn till de krav som ställs på neutralisering av sulfidförande krossmaterial valdes för genomförandet av detta projekt en kalkprodukt bestående av kalcit (ca 95 %) och några procent av löslig kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Den alkaliska slurryn håller initialt ett högt pH (ca 12) varefter kalciumkarbonatens buffrande pH (8-9,5) erhålls. Genom reaktion med CO_2 från luften ökar detta koncentrationen av karbonatjoner i lösningen och gynnar bildning av sekundära karbonatmineral i reaktionens initiala läge. I silikatdominerade bergarter ökar högt pH silikatlösligheten och gynnar bildning av sekundära amorfa till mikrokristallina karbosilkater. Kalkprodukten är dessutom finkornig. Ungefär 95 % av partiklar är $<0,063$ mm (figur 34). Materialets stora specifika ytarea gynnar dess reaktivitet och möjliggör användning som slurry med möjlighet till snabb reaktion och enkel teknisk applikation. Dessutom är partiklarna i det alkaliska materialet starkt kohesiva och fäster sig vid större partiklar. Det kan dock påpekas att materialets sammansättning varierar med olika kalkprodukter och bör därför analyseras innan användning (tabell 11).

Tabell 11. Metallhalter i använd alkalisk produkt och ett urval av borrhax med varierande svavelhalt (huvudelement mg/kg, spårämnen µg/kg).

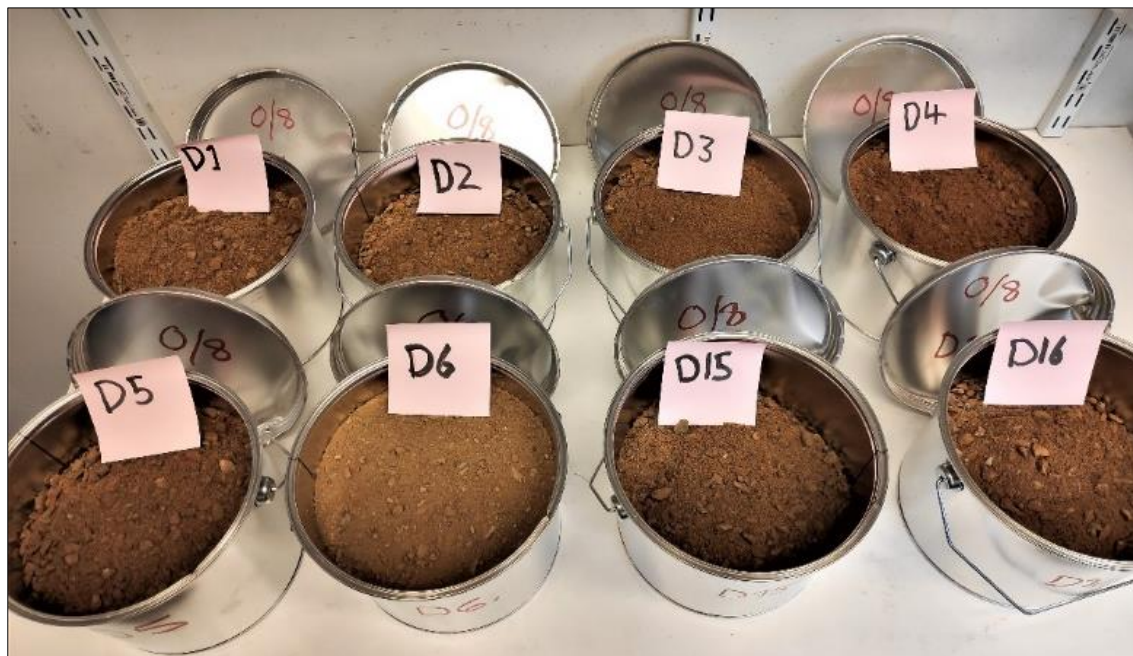
	Kalkprodukt 1	Kalkprodukt 2	Borrhax 1	Borrhax 2	Borrhax 3
SiO ₂	0.2		44.9%	52.5%	40.8%
Al ₂ O ₃	0.2	0.1%	12.1%	13.2%	11.5%
CaO	52.8	43.7%	0.0%	0.0%	0.0%
Fe ₂ O ₃	0.1	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%
K ₂ O	0.1	<0.01%	1.8%	2.7%	2.5%
MgO	0.5	0.5%	2.4%	2.0%	1.7%
MnO	0.01	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Na ₂ O	1.1	1.1%			
P ₂ O ₅	0.9	0.5%	0.0%		
TiO ₂	0.0				
Summa	55.7				
LOI 1000°C	42.8				
As	0.1	0.3	<LOD	<LOD	<LOD
Ba	328.5	171	200	390	900
Cd	0.15	0.187	<LOD	<LOD	<LOD
Co	0.13	0.583	<LOD	<LOD	<LOD
Cr	9.38	14.4	176	170	116
Cu	0.21	2.17	<LOD	<LOD	55
Ni	3.82	6.94	30	25	64
Pb	2.42	1.3	25	23	23
S	387.8	371	1112	1469	30400
Sr	243.9	271	269	157	160
V	2.1	2	<LOD	<LOD	172
Y	2.0	7.25	200	47	18
Zn	2.1		128	128	111



Figur 34. Kalkproduktens kornstorleksfördelning. Sedimentationsanalysen är utförd vid Statens geotekniska institut (SGI).

Provtagning

Provtagning av sulfidförande bergkross utfördes av VTI i enlighet med SS-EN 932-1 (Svenska Institutet för Standarder, 1997). Samtliga prov bestod av till ådergnejser och glimmerskiffrar omvandlade metaargillitiska sedimentbergarter. I försöket användes sorteringarna 0/8 mm (figur 35) och 0/150 mm (figur 36).



Figur 35. Prov 0/8 mm.



Figur 36. Prov 0/150 mm. Beteckningen G på bilden har ändrats till D.

Till neutraliseringsförsöket valdes samlingsprov bestående av delprov D4 och D15 från sortering 0/8 mm. Sorteringens 0/32 mm (med ursprung i sortering 0/150 mm) samlingsprov bestod av delprov D7, D10 och D11. Samlingsproven homogeniserades i en rengjord cementblandare.

Provberedning

- ✓ 500 g material togs ur det homogeniserade provet för analys (handhållen XRF, NAG, kemisk analys) samt att spara för eventuella kommande uppföljande försök.
- ✓ 250 g av delprovet siktades för XRF- och NAG-analys. 250 g av delprovet sparades.
- ✓ XRF-analys med tre mätningar på vardera fraktionen (0/0,063 mm, 0,063/1 mm och 1/4 mm) utfördes.
- ✓ NAG-test genomfördes på fraktionerna 0/0,063 mm, 0,063/1 mm och 1/4 mm.

Resultat från XRF analyser

I tabell 12 presenteras XRF-resultat från samlingsproven 0/8 och 0/32 mm. För varje delfraktion 0/0,063 mm och 0,063/1 mm genomfördes tre mätningar.

Tabell 12. Resultat från XRF analyser på samlingsproven 0/8 mm och 0/32 mm.

Kornstorlek	Prov ID	S (%)	Standardavvikelse
0.063 mm	krossfraktion 0/8	1.97	0.0705
0.063/1mm	krossfraktion 0/8	1.65	0.1051
1/4 mm	krossfraktion 0/8	1.82	0.3359
0.063 mm	krossfraktion 0/32	0.270	0.2105
0.063/1mm	krossfraktion 0/32	0.197	0.0604
1/4 mm	krossfraktion 0/32	0.121	0.0359

Resultat från NAG-analyser

I tabell 13 visas resultat från NAG-analyser utförda på samlingsproven 0/8 och 0/32 mm.

Tabell 13. Resultat av NAG analys (pH och volym av titrerad NaOH) på fraktionerna 0/8 mm och 0/32 mm. Provmängd 2,5 g.

Prov ID	Fraktion (mm)	S (%)	NAG-pH	Konduktivitet (μS/cm)	EP 1 (pH 4.5) ml NaOH	EP (pH 7) ml NaOH
Krossfraktion 0/8 mm	<0,063	1.97	2.6	1130	3.4	4.34
Krossfraktion 0/8 mm	0,063-1	1.63	2.9	530	1.66	2.29
Krossfraktion 0/32 mm från 0/150 mm	<0,063	0.27	3.3	370	0.47	1.37
Krossfraktion 0/32 mm från 0/150 mm	0,063-1	0.15	3	420	0.96	1.69

Beräkningar för dosering av alkalisk slurry/m³/ton krossprodukter baseras på svavelkoncentrationen i produkternas reaktiva finfraktion (0/1mm) samt dess förmåga att producera surhet. Uppgifterna erhöles från XRF- och NAG-analyser.

Beräkningarna av hur mycket kalkprodukt som behöver tillsättas utgår från oxidation av svavelkis och magnetkis och baseras på krossmaterialets totala innehåll av svavel. De analyser av bergmaterial som genomförts inom ramen för denna studie visar att innehållet av sulfidbildande metaller vid sidan av järn endast utgör någon eller några procent av substansmängden svavel. Vidare antas innehållet av sulfat i berg som inte exponerats för luft vara försumbart. Detta styrks också av de SEM-analyser som gjorts på ooxiderat material. Således antas att totalhalten av svavel representerar mängden svavelkis och magnetkis. I det fall bergmaterialet har varit exponerat för väder och vind under längre tid kan en del av totalsvavlet bestå av sulfat och följaktligen påverka doseringsberäkningarna.

Varje svavelatom i såväl svavelkis som magnetkis genererar 2H⁺-joner eller i kvantitativa termer 1 mol svavel genererar 1 mol svavelsyra. Även oxidation av magnetkis genererar 2 H⁺-joner per svavelatom.

Den huvudsakliga syraneutraliserande substansen i kalkprodukten är kalcit som vid reaktion med surhet bildar vätekarbonat och kolsyra.



Vilken den dominerande formen av dessa blir i slurryn beror av vattenlösningens pH. Vid 6,3 ≤ pH ≤ 10,3 utgör vätekarbonat den dominerande formen. Eftersom materialet står i kontakt med luft kan emellertid reaktionen drivas vidare genom att kolsyran sönderdelas till koldioxid och vatten.



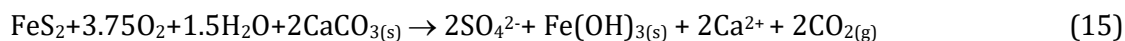
och den lösta koldioxiden kan avges till atmosfären:



Detta innebär att ytterligare kolsyra successivt kan bildas i vattenlösningen, vilket driver de kemiska jämvikterna mot höger. Således kan varje formelenhet av CaCO₃ antas ta upp 2 vätejoner samtidigt som en del av den tillförda alkalin återfinns som vätekarbonat i vattnet.



Summareaktion



Således neutraliseras den syra som bildas vid oxidation av en mol svavel i svavelkis av en mol CaCO₃.

Eftersom det inte är givet att reaktionshastigheterna för syrabildning och syraneutralisering är lika stora samt att syrabildning i reducerad omfattning även uppstår i fraktioner >1 mm tillsätts ett överskott av kalkprodukt i en sådan mängd att doseringen är minst tre gånger den mängd som krävs för att neutralisera den mängd syra som kan beräknas utifrån svavelinnehållet i finfraktion.

Vid laboratorietestet användes det specifika bergmaterialets analyserade svavelhalt för beräkning av dosering av alkalisk slurry. För neutralisering av 2 kg krossberg i sortering 0/8 mm användes 78 g kalkprodukt suspenderad i 1 000 ml avjoniserat vatten. Sortering 0/32 mm (2 kg) neutraliserades med 11 g kalkprodukt suspenderad i 1 000 ml avjoniserat vatten.

Genomförande av laboratorieförsök med alkalisk slurry

Slurry och bergkross 0/8 och 0/32 mm från det i föreliggande projekts ingående bergkrossmaterial blandades under ca 1 timme. Efter behandlingen silades eventuell överskottsvätska bort och sparades för ytterligare undersökningar.

Det fuktiga behandlade materialet placerades i plastsäck och sparades till kolonnförsök och vidare analys (SEM/EDS).

Varaktighetskontroll av neutraliserat krossmaterial

För att bedöma neutraliseringens tidsmässiga varaktighet utfördes ett accelererat varaktighetstest (0/8 mm) samt två parallella kolonnförsök (periodiserade) på material 0/8 mm och 0/32 mm.

Behandlade prov av krossmaterial (0/8 och 0/32 mm) utsattes för kontrollerade volymer av genomströmmande avjoniserat vatten (simulerat nederbördsvatten). Försökens mål var att: 1) studera varaktigheten av behandlingen i materialet (accelererat försök) och 2) bedöma behandlingens oxidationshämmande effekt på exponerade sulfidmineral (periodiserat försök). För att studera inre reaktionsförlopp och bildning av sekundära mineralfaser vid den tillämpade behandlingsmetoden användes kombination av XRD-, SEM/EDS- och polarisationsmikroskopiska undersökningar.

Genomförande och resultat av accelererat varaktighetsförsök

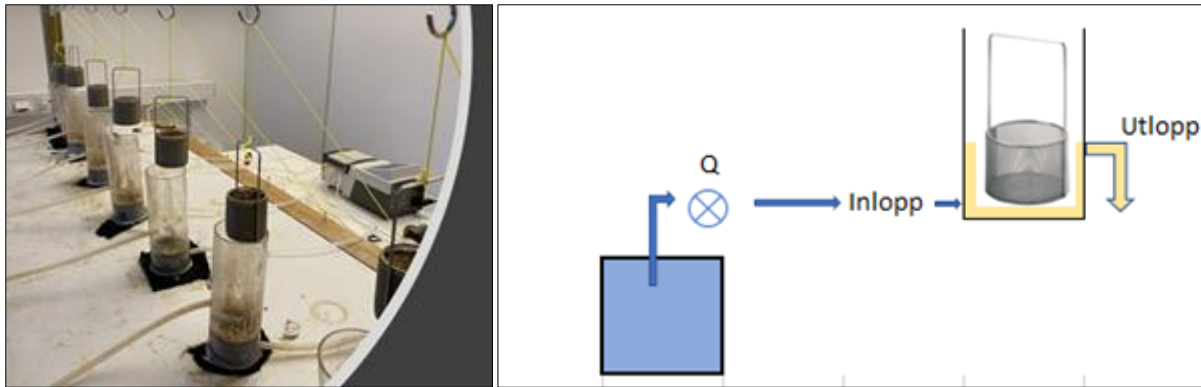
Laktestet simulerar förhållande mellan nederbördsvolym och perkolation av syresatt vatten i bergmassa. Metoden utgör en modifierad variant av SIS-CEN/TS 15864:2015 (Svenska Institutet för Standarder, 2016), som är en standard avsedd för testning av monolitiskt material. Vidare är metoden influerad av både kinetiskt test för syrabildning enligt ASTM standarden D5744 (version godkänd Sept. 1, 2018) och oxiderat laktest för testning av syrabildning hos sulfidjordar enligt Pousette (2007).

Metoden är baserad på cyklisk dosering med ökande doser av avjoniserat vatten (L) varvade med lufttorkningsperioder (oxidation). L/S kvoten (Liquid/Solid) beskriver mängden av perkolerande joniserat vatten genom det neutraliserade provets massa med efterföljande kontroll av pH och konduktivitet. Anläggningens design presenteras i figur 37.

Bergkross 0/8 mm med svavelhalt på 5 600 ppm behandlades med varierande doser av alkalisk slurry (tabell 14) och placerades i anläggningens behållare med bestämd volym. I försöket ingick både nollprov (icke behandlat prov) och blank (test av eventuell utlakning av metaller från metallkorgen).

Tabell 14. Dosering av alkalisk slurry i accelererat varaktighetsförsök.

Behållare	A1	A2	B1	B2	C	D	O	Blank
Dosering (g/dm ³)	28	28	40	40	80	60	0	Blank



Figur 37. Utrustning för accelererat varaktighetsförsök, foto och principskiss.

Försökets genomförande

Steg 1 - Mätning av bergmaterialprov i avjoniserat vatten med volym motsvarande $L/S=0,21$.

Behållaren med höjd 5 cm rymmer 240 gram bergmaterial. Provet tillförs 50 ml avjoniserat vatten.

Steg 2 - Provet lufttorkas i ca 16 h över natten.

Steg 3 - Torkat (oxiderat) prov lakas i avjoniserat vatten med volym motsvarande $L/S=0,21$ d.v.s 50 ml, upprepa som i steg 1.

Steg 4 - Provet lufttorkas i ca 16 h över natten.

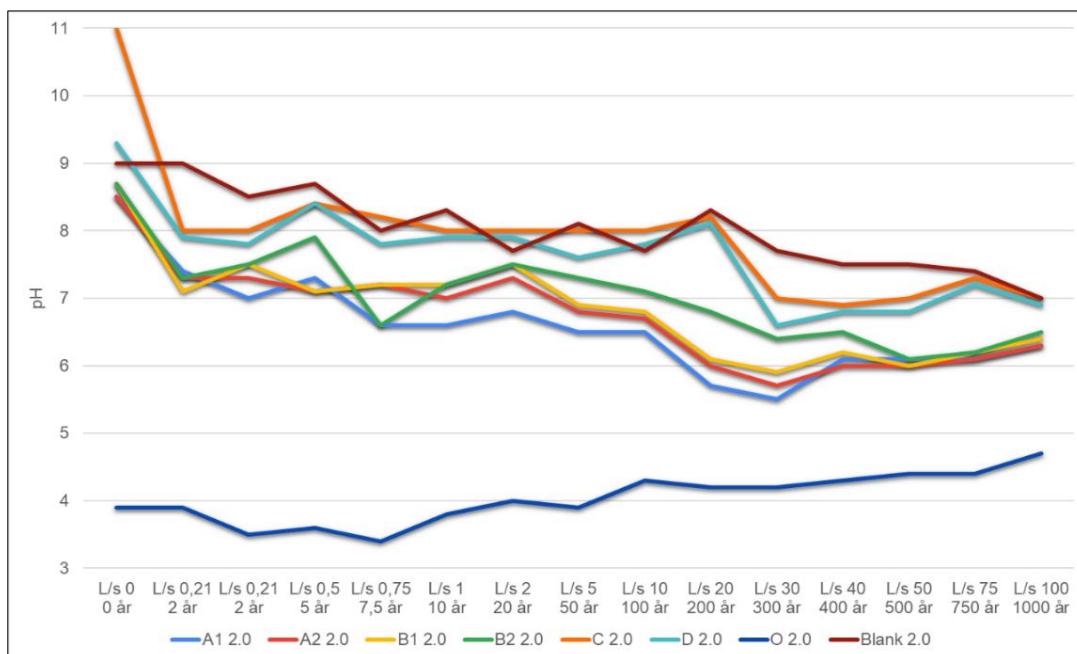
Steg 5 - Torkat (oxiderat) prov lakas i avjoniserat vatten med volym motsvarande $L/S=0,5$.

Dosering sker med laborierpump. 120 ml vatten tillsätts under 6 h med ett flöde på 0,33 ml/min.

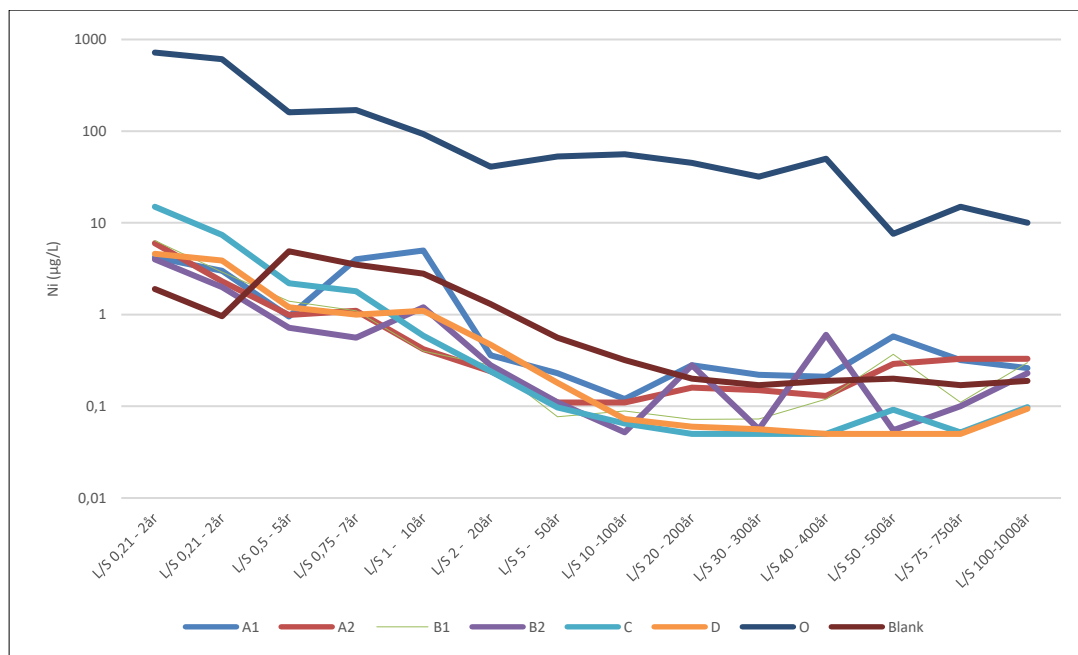
Steg 6 - Provet lufttorkas i ca 16 h över natten

Steg 7 - Lakcykler upprepas med ökande L/S -kvot till 100 (1000 årsnederbörder).

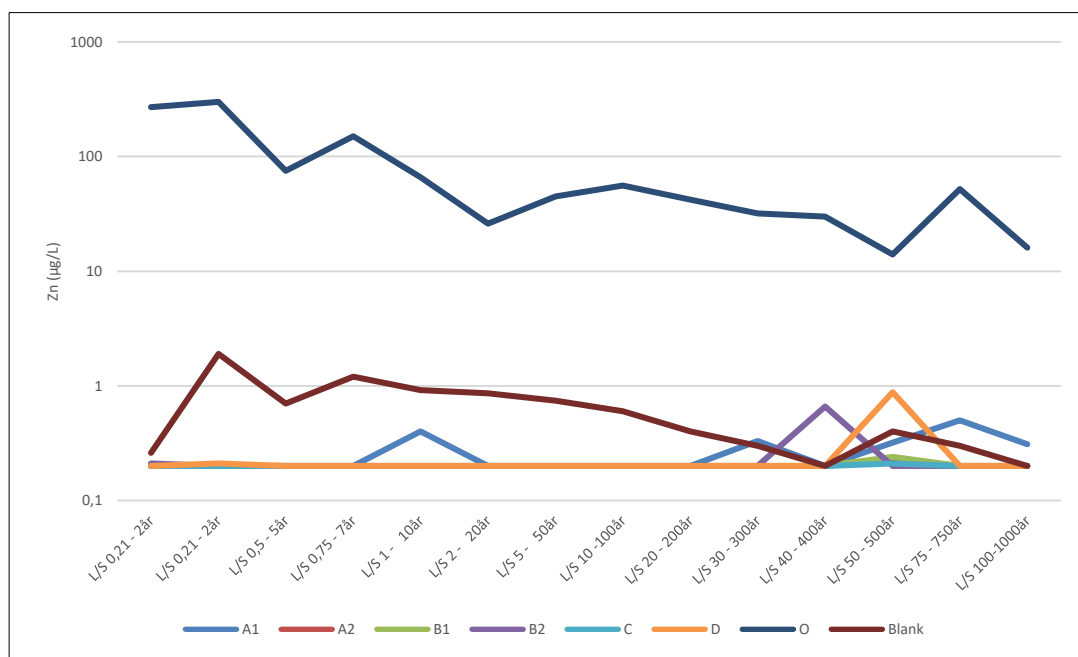
Resultat från det accelererade lakförsökets cykliska serier (0,21-100) presenteras i figur 38-41 och i tabell 15-16.



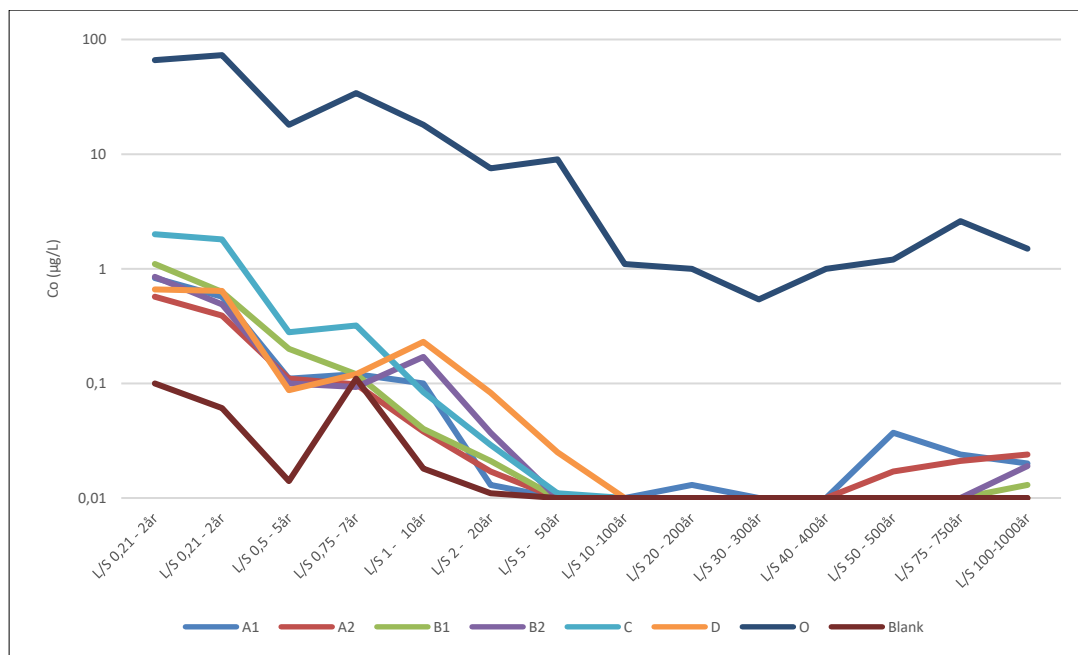
Figur 38. pH-status hos alkalineutraliserat krossmaterial i tidsperspektiv.



Figur 39. Ni-koncentration i simulerad långtidsperspektiv hos alkalineutraliserat krossmaterial jämfört med nollalternativ och blankprov.



Figur 40. Zn-koncentration i simulerad långtidsperspektiv hos alkalineutraliserat krossmaterial jämfört med nollalternativ och blankprov.



Figur 41. Co-koncentration i simulerad långtidsperspektiv hos alkalineutraliserat krossmaterial jämfört med icke behandlat kross med 0-alternativ och blankprov.

Tabell 15. Halter av chalkofila metaller och sulfat i lakvatten L/S 10.

TOTALHALTER	Enhet	A1	A2	B1	B2	C	D	O	Blank
Arsenik	µg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,042	<0,02	< 0,02
Barium	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	13	< 1
Bly	µg/l	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,019	<0,010
Kadmium	µg/l	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	0,019	<0,0040
Kobolt	µg/l	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	1,1	<0,010
Koppar	µg/l	0,058	<0,050	0,052	0,12	0,17	0,14	1,3	0,087
Nickel	µg/l	0,12	0,11	0,089	0,052	0,065	0,073	5,6	0,32
Vanadin	µg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	µg/l	< 0,2	< 0,2	0,22	< 0,2	< 0,2	< 0,2	5,6	0,6
Sulfat	µg/l	4800	3200	4500	5000	4700	16000	22000	<1000

Tabell 16. Halter av chalkofila metaller och sulfat i lakvatten L/S 100

TOTALHALTER	Enhet	A1	A2	B1	B2	C	D	O	Blank
Arsenik	µg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Barium	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,4	< 1
Bly	µg/l	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,013	<0,010
Kadmium	µg/l	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	0,006	<0,0040
Kobolt	µg/l	0,02	0,024	0,013	0,019	<0,010	<0,010	0,15	<0,010
Koppar	µg/l	0,081	<0,050	0,084	0,067	0,057	0,063	0,32	0,11
Nickel	µg/l	0,26	0,33	0,3	0,23	0,098	0,094	1	0,069
Vanadin	µg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Zink	µg/l	0,31	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1,6	0,034
Sulfat	µg/l	1300	< 1000	1200	1200	< 1000	3500	1800	< 1000

Resultaten i figur 38-41 och tabell 15-16 indikerar dels metodens användbarhet vid bestämning av neutraliseringsåtgärdens varaktighet, dels alkalineutraliseringens effektivitet när det gäller behandling av sulfidmineraliserade krossprodukter.

Genomförande och resultat av periodiserat kolonnförsök

Sulfidförande krossfraktioner 0/8 och 0/32 behandlades med beräknad dos av alkalisk slurry och testades i kolonnanläggning med avseende på varaktighet av neutraliseringsdosen (fas 1) samt varaktighet av oxidationsskyddande reaktionshölje (fas 2).

Fas 1

I denna fas behandlas provet med adekvata volymer av avjoniserat vatten (simulerar nederbördsvatten) med korta torrcykler. Detta p.g.a. att karbonatlösligheten är enbart beroende av pH. Resultat från pH och konduktivitets status kontrolleras kombinerad med Ca- och Mg-analys.

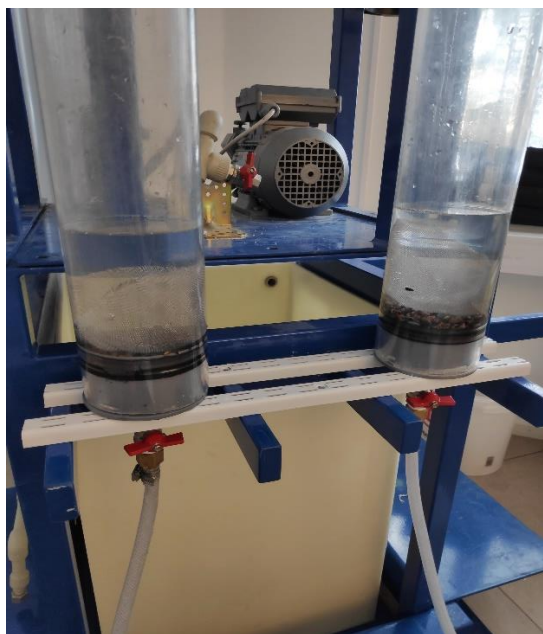
Fas 2

Fas två inleds när lakvattnets pH sjunker till ca 6,5 vilket betraktas allmänt som grundvattnets normala tillstånd i silikatberggrund/jordarter och när lösningen indikerar låga halter av Ca och Mg. Momentet består av varvade oxidations- (torra) och vattenmättnadscyklar åtföljda av pH, konduktivitets och metallanalyser.

Kolonnanläggningen presenteras i figur 42. Vardera kolonnen med 100 mm diameter fylldes med en bestämd volym av behandlad krossprodukt med representativ kornstorleksfördelning. I försöket användes krossprodukter 0/8 mm och 0/32 mm. Provet 0/8 provtogs från upplag som under några månader hade exponerats för väder och vind. Materialet var följaktligen delvis oxiderat. 0/32 mm framställdes från sortering 0/150 mm som även det varit exponerat för oxidation under en tid.

De behandlade krossmaterialen förvarades i öppna plastpåsar under tre månader fram till dess att de överfördes till var sin kolonn. Proven behandlades med årsnederbördadekvata volymer av avjoniserat vatten. Vattenbehandlingen växldes med en periodicitet av 3 alternativt 4 dygn. tidsbestämda torrcykler (fas 1 och fas 2). Varje cykel avslutades med att kolonnernas

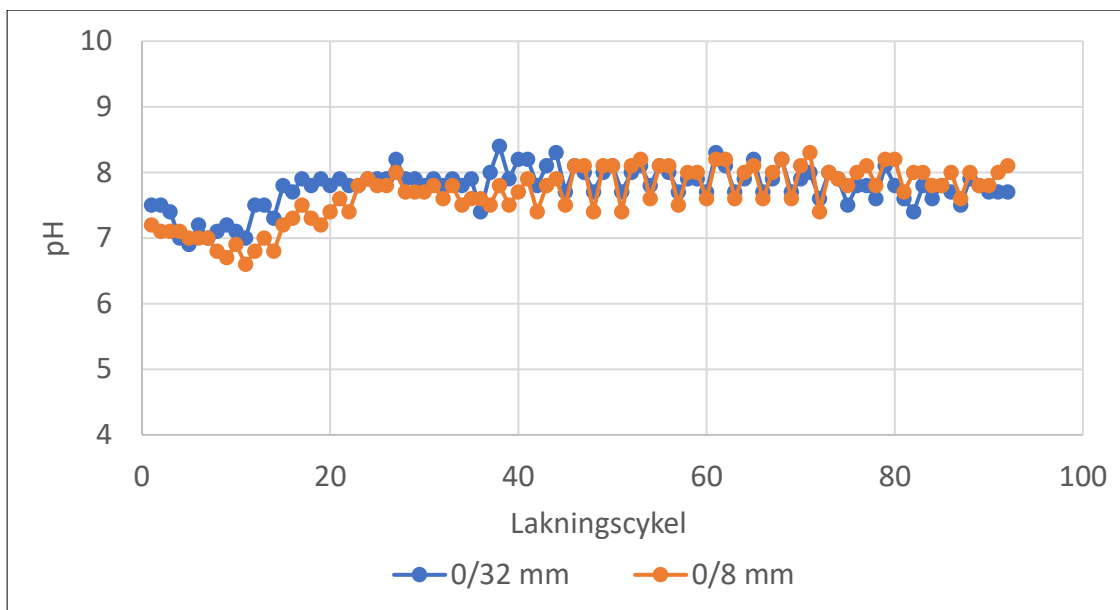
bottenventiler öppnades och lakvattnet samlades i provflaskor för mätning av pH och konduktivitet. Ett urval av proven har även analyserats med ICP-MS med avseende på innehåll av lösta grundämnen.



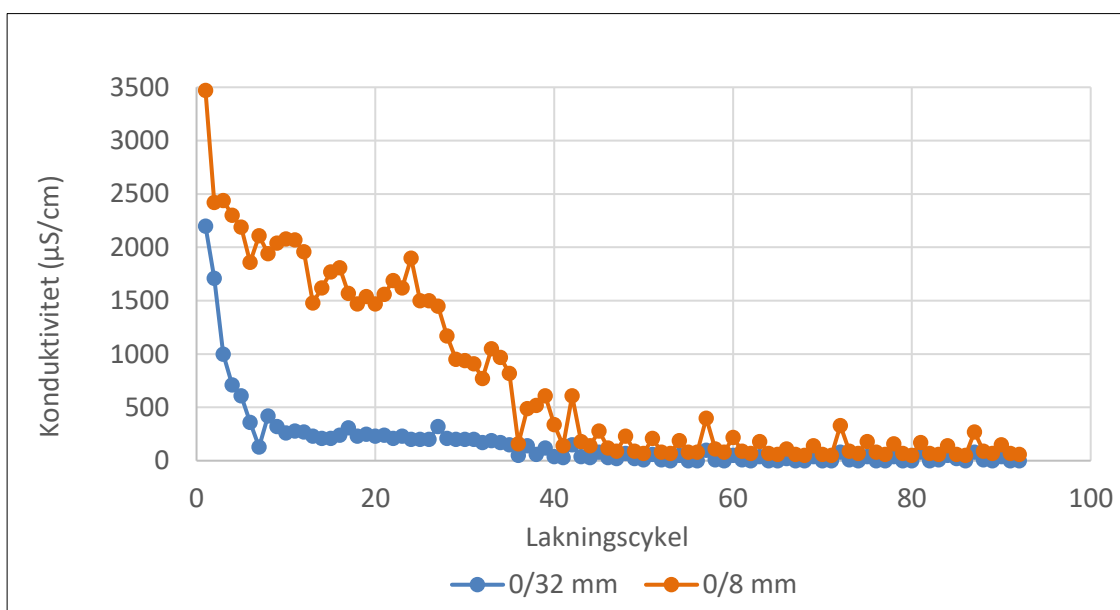
Figur 42. Anläggning för kolonnförsök.

Med hänsyn till att det aktuella försöket, med start i april 2021, är tidskrävande kan bara resultat från fas 1 redovisas i denna rapport. Från figur 43–44 framgår att efter en initial sänkning stabiliserades pH mellan 7,5 och 8 i båda fallen (ca 15 lakningscykler; 1,5 månad). pH i de initiala lakningscyklerna var upp till 0,5 pH-enheter lägre för sorteringen 0/8 mm än för 0/32 mm. Denna skillnad åtföljd av långsam stabilisering är sannolikt beroende på 0/1 mm fraktionens svavelhalt och dess volymandel i de testade krossprodukterna. Sorteringen 0/8 mm hade medelkoncentration av svavel i fraktionen 0/1 mm på 18 100 ppm och dess volym i krossprodukten var mellan 30-50 %, medan 0/32 mm visade motsvarande värden på 2 100 ppm svavel och 10-30 % volym. Konduktivitetskurvorna följer i stort pH-värdenas utvecklingsmönster.

Efter initial kraftig minskning sjunker konduktiviteten kontinuerligt hos 0/8 mm sorteringen medan den hos 0/32 mm stabiliserar sig på låg nivå motsvarande 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ efter kraftigt fall under de första 40 lakningscyklerna. Denna successiva minskning av konduktiviteten indikerar ursköljning av oxidationsprodukter som bildats under den period som följt efter inblandning av alkalisk slurry i krossprodukterna. Den låga konduktiviteten under perioden som löpt efter de ca 40 inledande cyklerna indikerar att sulfidoxidationen i kolonnerna under försöket är mycket låg.



Figur 43. Resultat från kolonnförsök med krossmaterial som behandlades med alkalisk slurry. Figuren visar pH i lakvatten.



Figur 44. Resultat från kolonnförsök med krossmaterial som behandlades med alkalisk slurry. Figuren visar konduktivitet i lakvatten.

SEM-EDS-analyser av oxiderade och neutraliserade prov

SEM-EDS-metoden tillämpades för att undersöka neutraliseringsprocessens princip och kinetik. Genom att analysera ursprungsmaterialet samt oxiderat och neutraliserat materials mineralogiska sammansättning med det neutraliserade materialets mineralogi erhålls bättre uppfattning om neutraliseringsreaktioner med sulfidmineral, deras verkningsgrad och varaktighet. Undersökningen utfördes vid Karls Universitet i Prag.

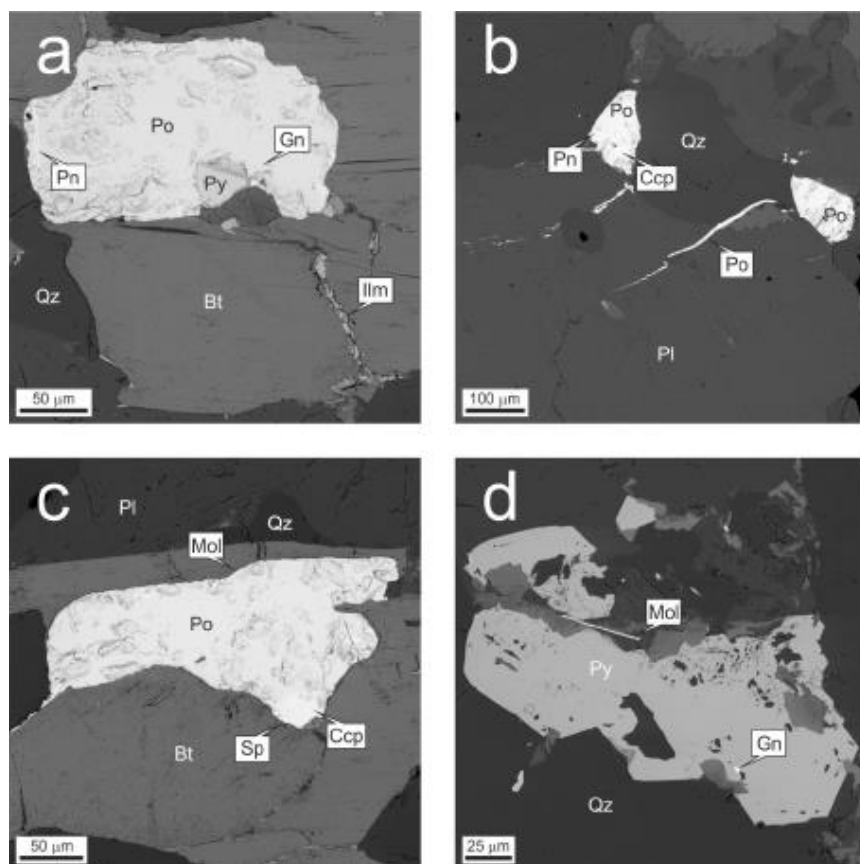
Med syfte att undersöka sulfidmineralens stratigrafi från ytan till deras inre användes optisk mikroskopi (OM) av polerade tunnslip. Kolbelagda polerade tunnslip undersöktes med SEM-EDS med fokus på moderbergartens oxiderade och neutraliserade partiklars karakteristik (avgränsning, sammansättning, inbördes kontakt m.m.).

SEM analyser på opåverkad, oxiderad och neutraliserad bergart

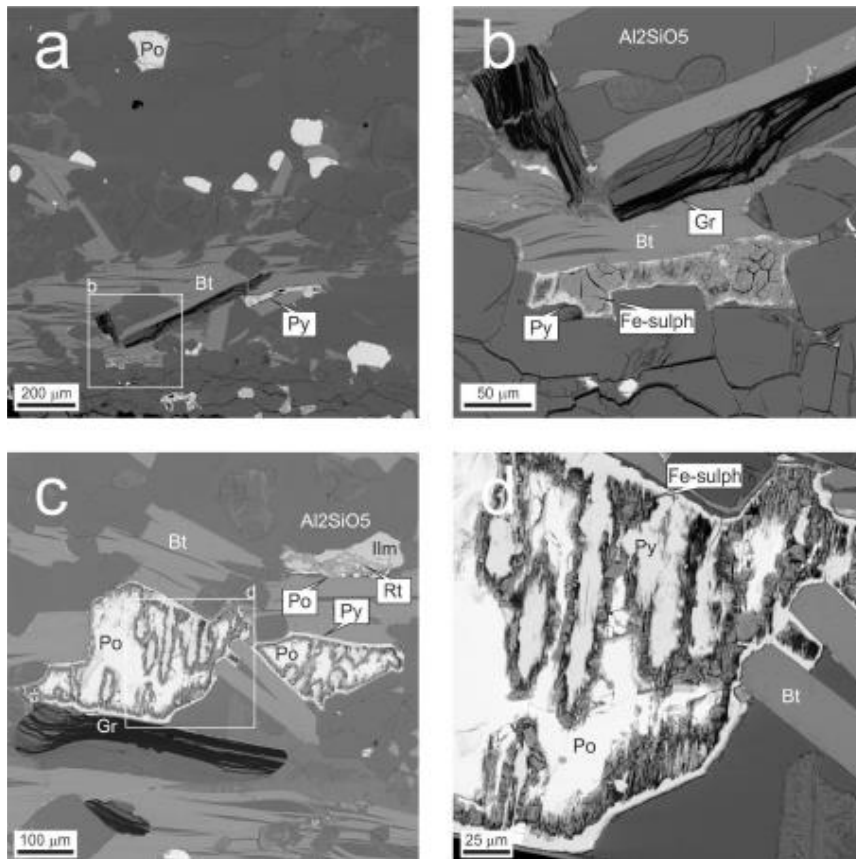
Primär, opåverkad bergart: 7 polerade prov undersöktes med SEM-EDS metoden med avseende på kvalitativt och semikvantitativt innehåll av sulfidmineral och omgivande silikatmineral i primärt opåverkat bergmaterial. Det undersökta bergkrossets svavelinnehåll domineras av magnetkis åtföljt av svavelkis. Övriga, i mindre mängd förekommande sulfider, är blyglans, zinkblände, kopparkis, pentlandit och molybdenit.

De dominerande bergartsbildande mineralen är kvarts, plagioklas, biotit, muskovit, andalusit-sillimanit och cordierit.

Undersökningens resultat visade att de bergartsbildande mineralens kornstorlek är ungefär en tiopotens större än sulfidernas. Sulfidmineral förekommer dels som fristående korn i bergmassan, dels som utfyllnad i bergartens mikrospricksystem (figur 45-46).



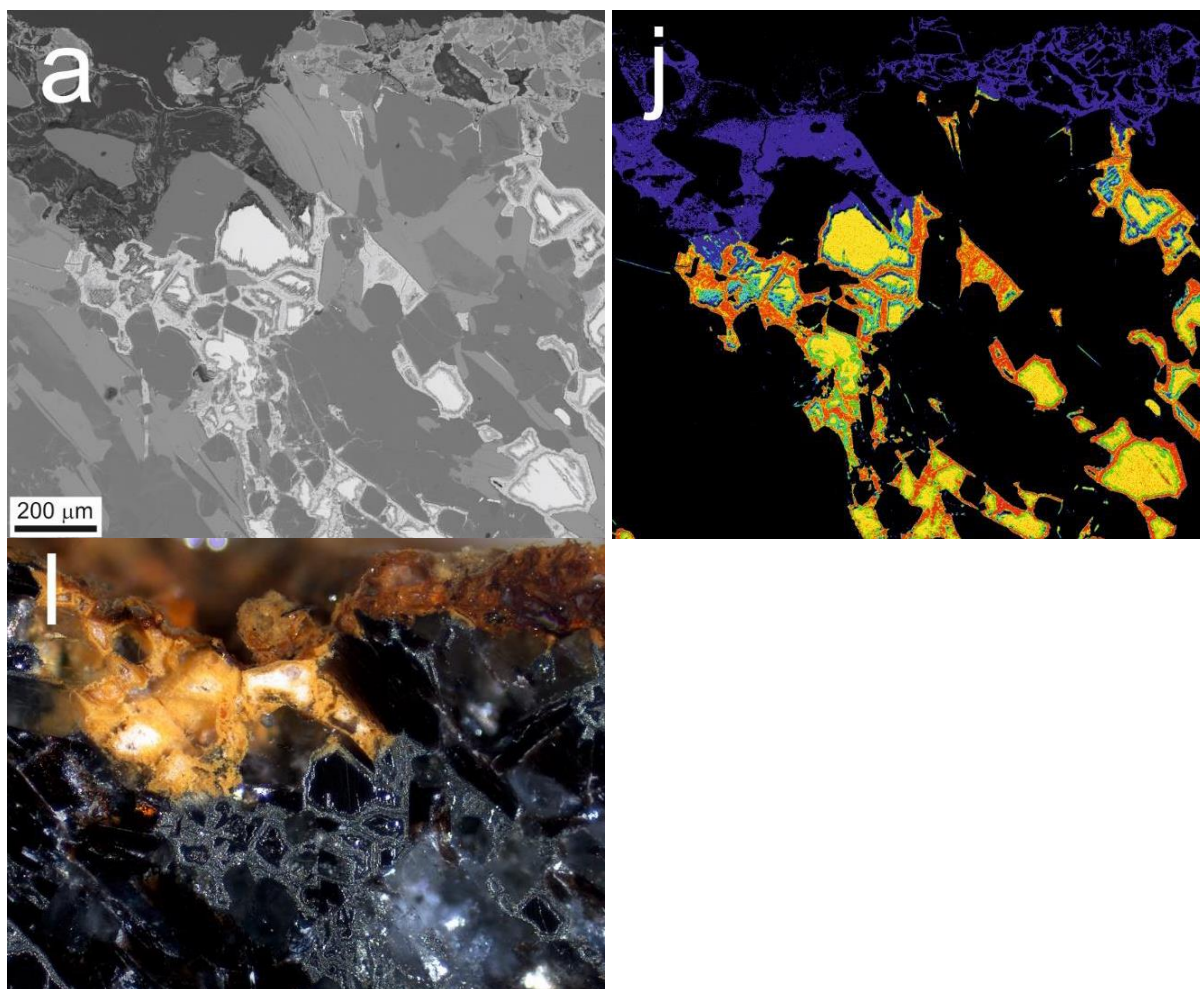
Figur 45. SEM-EDS/BSE-bilder av dominerande sulfider (Po=magnetkis, Py=svavelkis) associerade med underordnade sulfider (Pn=pentlandit, Gn=blyglans, Ccp=kopparkis, Sp=zinkblände, Mol=molybdenit). Malmmineralen är associerade med biotit (Bt), plagioklas (Pl) och kvarts (Qz).



Figur. 46. SEM-EDS/BSE mikrobilder dokumenterar primär omvandling av dominerande sulfidmineral, magnetkis (Po) svavelkis (Py). Bilderna a och b visar till sulfat omvandlade svavelkiskristaller. Primär, delvis omvandling av magnetkis och svavelkis demonstreras i bilderna c och d.

Oxiderade prov: Av 39 undersökta fragment i fraktionen 8/16 mm innehöll bara några få sulfidmineral, vilket bekräftar mineraliseringens heterogenitet. Prov D12 och D11 valdes som typiska, men också som kontraherande exemplar. Prov D12 består av de bergartsbildande silikatmineralen kvarts, biotit, muskovit, sillimanit och underordnat plagioklas. Sulfidmineral representeras av magnetkis och svavelkis. Sulfidmineral visar karaktäristisk omvandling till järnsulfater efter oxidation (figur 47).

Oxidationen gör sig gällande i form av ett tämligen brett reaktionsskikt sannolikt bestående av kryptokristallina järnsulfater och alun.

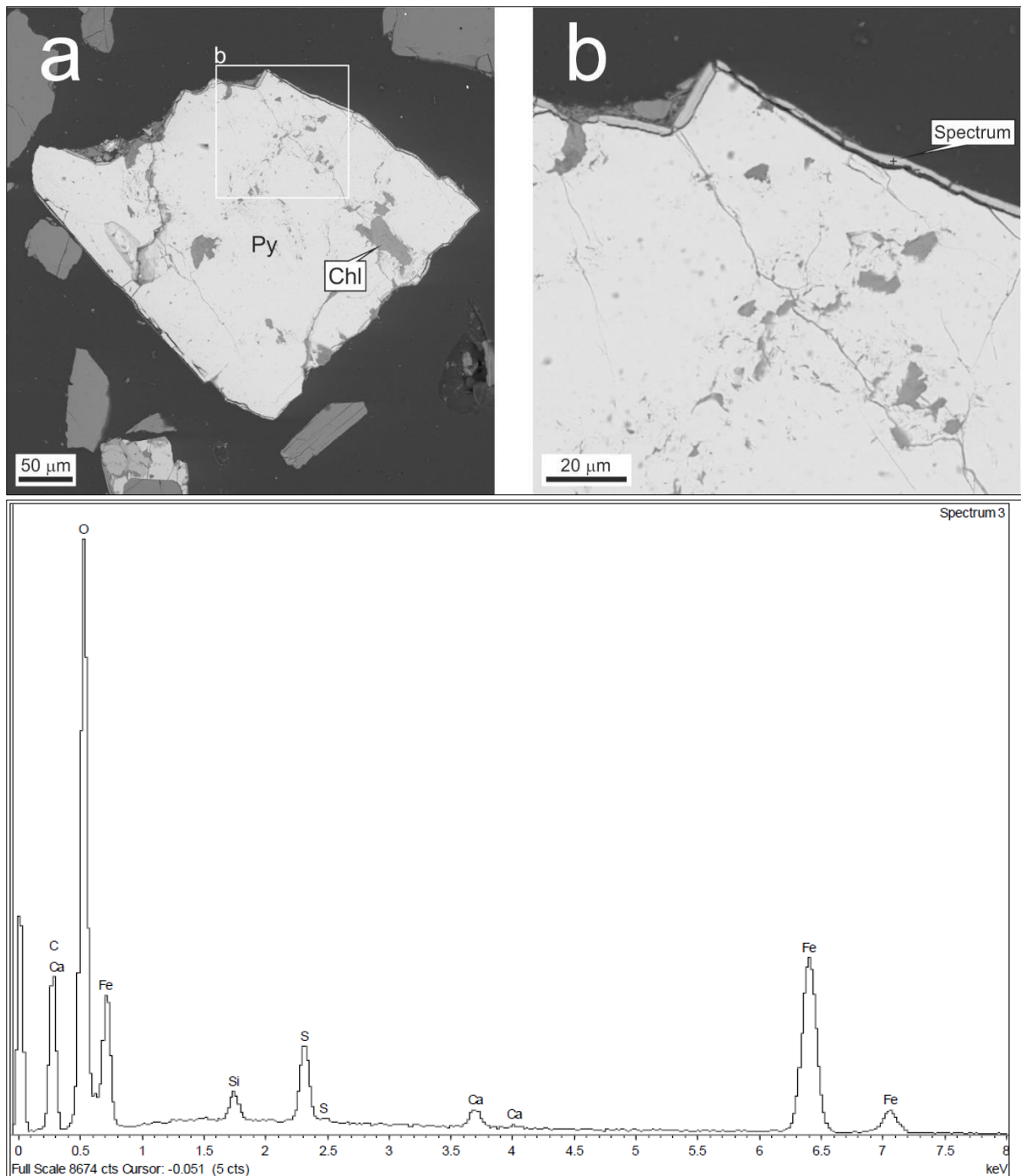


Figur. 47. Bild a: SEM-EDS mikrofoto med sulfider (vita) omgivna av Fe-sulfatskikt (grå). Bild j: samma bild som a med S-koncentration (gul, grön, röd). Bild l: optisk mikroskopi, sulfid (vit) Fe-sulfat mm (ljusbrun).

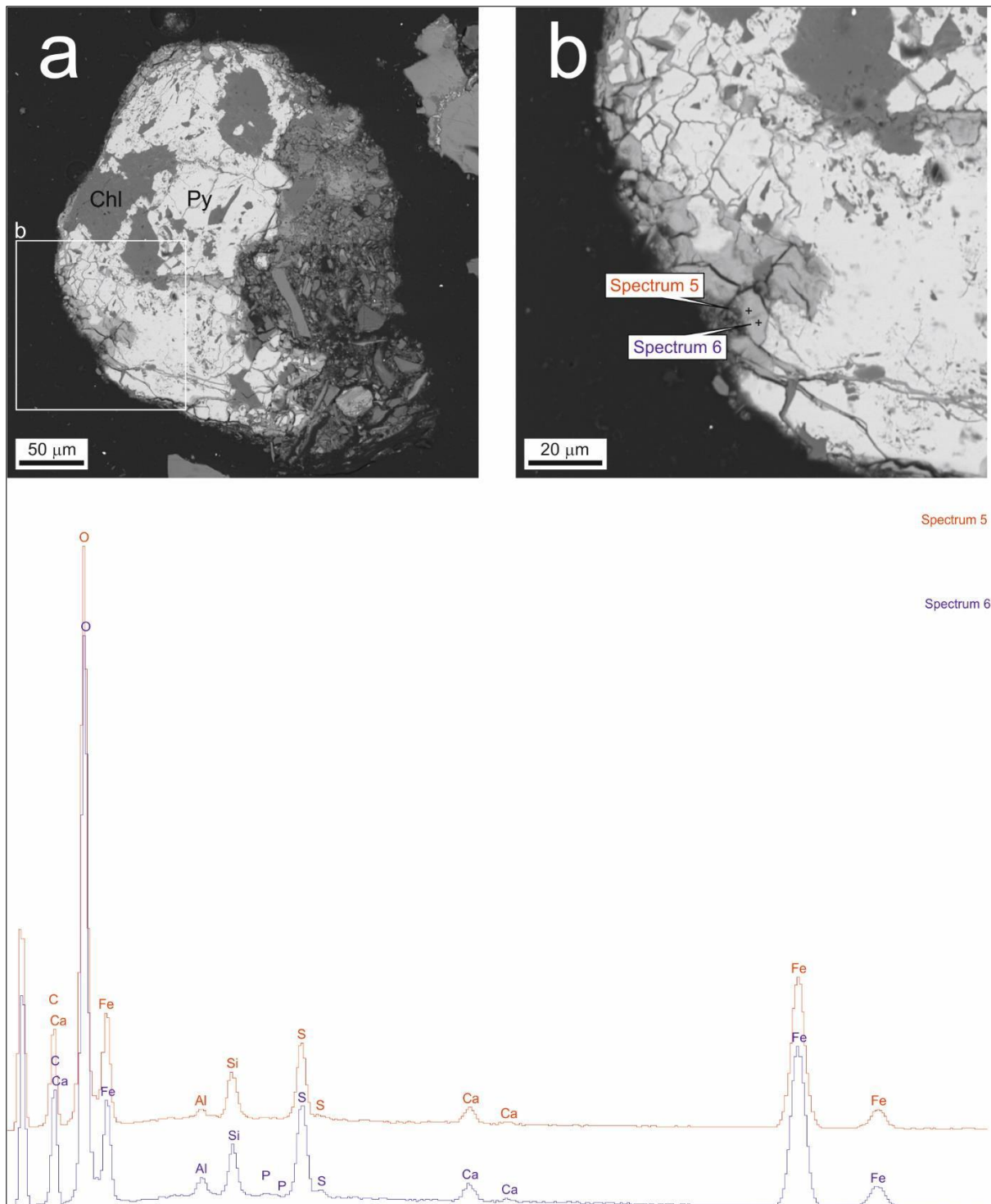
Undersökning av neutraliserade prov

Utvalda fraktioner (0,063/1 mm och 1/4 mm) från neutraliserade sorteringar 0/8 och 0/32 mm undersöktes med SEM/EDS/BSA metoden. Från 49 st. SEM/EDS undersökta partiklar valdes typiska exempel i syfte att demonstrera eventuell bildning av skikt (coating) bestående av sekundära reaktionsmineral på sulfidmineral belägna vid partiklarnas ytor. Undersökningens resultat visade att övervägande del av undersökta sulfider var täckta av några få mikrometer till några tiotals mikrometer, mestadels amorfa, beläggningar. Grundämnesanalyser med SEM/EDS/BSE indikerade Fe och S tillsammans med Si, Al, Ca, och P som höljenas huvudelement. Närvaron av Si, Al och Ca indikerar ökad omvandling av silikatmineral i samband med behandlingens tämligen höga pH.

I figur 48-49 visas förekomst av beläggningens grundämnessammansättning i både bild och i grafiska diagram.



Figur 48. SEM-/EDS/BSE-/bild och diagram dokumenterar av vittringen inte påverkad svavelkiskorn (Py) med inklusion av klorit (Chl), omsluten av 1-2 μm tjockt amorft skikt bestående av Fe, S, Si, och Ca.



Figur 49. SEM-EDS/-BSE bild och diagram dokumenterar fragmenterad och delvis omvandlad svavelkis (Py) med inslag av klorit (Chl) och sekundärt bildat yttäckande skikt av varierande tjocklek. Den amorfa hinna består av Fe, S, Ca, Al, P och Si.

Undersökningens resultat bekräftade bildning av sulfidmineraltäckande skikt i samband med neutralisering av sulfidmineraliserat krossmaterial. Frågan om oxidationsskyddande skiktens mineralogiska sammansättning och funktion behöver dock utredas vidare.

4. SAMMANFATTNING AV REKOMMENDERADE UNDERSÖKNINGS-, ANALYS- OCH KLASSIFICERINGSMETODER SAMT FÖRSLAG TILL BEHANDLINGSÅTGÄRDER

I kapitlet sammanfattas resultat från ingående delprojekt och deras tillämpning vid framtagning av rekommenderad strategi för hantering av sulfidförande konstruktionsmaterial.

4.1 Inledning

De litteraturstudier som har genomförts pekar på att nuvarande metoder för undersökningar, klassning och efterbehandling av sulfidförande bergmaterial huvudsakligen har utvecklats och tillämpats av gruvindustrin och är därför anpassade till dess förutsättningar och teknologiska och miljömässiga mål. Vid förekomst av liknande problematik i samband med produktion av konstruktionsmaterial är det nära till hands att överta redan existerande och av gruvindustrin använda undersöknings-, analys- och klassningsmetoder för att lösa konstruktionsbranschens teknologiska och miljöproblem vid hantering av sulfidförande bergkrossprodukter.

Det finns många dokumenterade exempel på att krossberg som är undersökt och bedömt som inert har orsakat betydande miljöskador genom utsläpp av surt, metallförande yt- och grundvatten. Orsaken kan med all sannolikhet vara att hantering av konstruktionsmaterial skiljer sig starkt från gruvindustrins. Medan gruvindustrin deponerar och behandlar sulfidmineraliserat gråberg (storfragmenterat sprängberg) på gruvområdet och hanterar eventuella utsläpp genom behandling av utströmmande lakvatten krossas sulfidförande konstruktionsbyggmaterial i olika produkter, vanligtvis med betydande andel av finfraktion med hög reaktivitet. Kort tid efter krossningen används krossprodukterna till olika byggändamål, d.v.s. bergmaterialet sprids ofta över stora arealer (vägbyggnation, utfyllnad m.m.). Av denna anledning är direkt behandling av källmaterialet av stor betydelse för att undvika fortsatt areell utläggning av sulfidförande bergmaterial med spridning av försurat lakvatten och miljöfarliga metaller till följd.

Projektets syfte var att utveckla ett relevant och pålitligt system för undersökning, provtagning, analys och klassificering av sulfidmineraliserade bergmaterial. Resultaten från varje delprojekt har stor betydelse för den slutliga klassificeringen.

Systemets metodik är anpassad till de i aktuella projektets uppnådda grundresultaten:

1. Vid krossning anrikas sulfidmineral i krossprodukternas finfraktion 0/1 m.m.
2. Bergmaterialets reaktivitet ökar med minskande kornstorlek p.g.a. ökande specifik yta med minskande partikeldiameter.
3. Sulfidmineralisering är vanligtvis ojämnt fördelad både i vertikal och areell utbredning i berggrunden. Detta försvårar representativ provtagning och klassificering.
4. Resultat som redovisas i punkt 1, 2 och 3 är ofta orsaken till att bergmaterial med allmänt tillämpade testmetoder har klassificerats som inerta, men som i stället har förorsakat negativ miljöpåverkan genom utsläpp av surt och metallförande grund- och markvatten.

4.1.1 Undersöknings-, provtagnings-, analys- och klassificeringsmetoder

Gruvindustrins långa tidshorisonter för planering och etablering av gruvor och därmed även planering av hur avfallet ska hanteras ger tämligen stort tidsutrymme för undersökningar och testning av behandlingsåtgärder. Projektering för produktion av bergmaterial med ursprung i varierande källor (täkter, sprängberg, bergmaterial i väglinjen m.m.) sker oftast under betydligt mer tidspressade förhållanden, vilket ställer krav på följande:

- ✓ Snabb, effektiv och representativ undersökning och provtagning.
- ✓ Relevanta, snabba och utslagsgivande analysmetoder.
- ✓ Fungerande klassificeringssystem baserat på teoretiska, experimentella och fullskaliga testresultat.
- ✓ Snabb och effektiv reaktion mellan krossmateriallets sulfider och använt neutraliseringsmedel.
- ✓ Enkel teknisk applikation vid neutralisering av redan utlagd krossprodukt eller i samband med bergmateriallets behandling under krossningen.
- ✓ Säker och varaktig neutralisering av krossproduktens reaktiva finfraktion.

4.1.2 Generella resultat tillämpade i alla provtagnings-, analys- och åtgärdsmetoder

Projektets delmoment är baserade på följande generellt gällande resultat:

- ✓ Frilagda, reaktiva sulfidmineral anrikas i krossmateriallets finfraktion 0/1 mm. Fraktionen bestämmer bergproduktens eventuella miljöpåverkan.
- ✓ Borrkaxets kornstorlek korresponderar mot krossfraktionens finfraktion.
- ✓ Bestämning av krossmateriallets svavelhalt (XRF), aciditet (surhet, NAG) och klassificering av krossmaterialts reaktivitet är baserade på fraktionen 0/1 mm då dessa mätningar är statistiskt säkrade.
- ✓ Bergmateriallets sulfidreaktivitet minskar med ökande partikelstorlek.

4.2 Undersöknings- och provtagningsmetodik

Med utgångspunkt från projektresultaten sammanfattas rekommendationer för undersökning, provtagning och provberedning i nedanstående punkter.

- ✓ Den regionala studien i kombination med en platsspecifik undersökning ska ligga till grund för vidare platsbesök och fältbesiktning.
- ✓ Fältbesiktning och inledande provtagning av ytberg genomförs av en malm-/berggrundsgeolog eller person med motsvarande kompetens och erfarenhet. Proven analyseras i första hand med hjälp av binokulär- och polarisationsmikroskopi. Vid fältbesiktningen undersöks även terrängförhållanden och tillgänglighet för ytterligare provtagning. Rekommendationerna gäller såväl fast berg som sprängt berg, bergmaterial i upplag och utlagda massor.
- ✓ Provtagning genom kaxborrning och jord-bergsondering rekommenderas främst för provtagning av fast berg och sprängsten. Dels är metoden ekonomiskt gynnsam, dels är den flexibel och kan nyttjas i samband med geotekniska undersökningar. Provtagningsförfarandet kräver ingen neddelning i fält och ingen efterföljande krossning krävs för vidare analyser. Borrkaxborrning kan även användas för provtagning av bergmaterialprodukter i upplag och redan utlagda massor.
- ✓ En provtagningsplan framställs med utgångspunkt i resultaten från den inledande undersökningen samt efterföljande fältbesiktning och preliminära petrografiska analyser.

Provtagningsplanens utformning beror på i vilken form det potentiellt sulfidförande bergmaterialet förekommer och på närområdets förutsättningar för ytterligare provtagning.

- ✓ Provtagning ska medge spårbarhet för varje prov, d.v.s. provtagningspunktens läge ska definieras och proven ska märkas tydligt med ett spårbart system som tål nödvändig hantering, väta och transport.
- ✓ Provberedning genomförs i enlighet med figur 9.

4.3 Analyismetoder

Med syfte att uppfylla krav på snabba och effektiva analysmetoder för bedömning av bergmaterialets reaktivitet utfördes litteraturstudier och laboratorieförsök av de allmänt tillämpade analysmetoderna. Analysmetoderna indelades utifrån metodtyp för bestämning av svavelhalt och metallkaraktärisering samt oxidationsreaktivitet.

4.3.1 Bestämning av svavelhalt och metallkaraktärisering

I denna analysgrupp ingår ICP-analys och handhållen XRF. Med utgångspunkt från de nämnda metodernas kapacitet, snabbhet, reproducerbarhet, flexibilitet och kostnad rekommenderar utredningen XRF som lämplig analysmetod. XRF-analys på finfraktion (0/1 mm) ger möjlighet att på en begränsad tid genomföra ett stort antal analyser med god reproducerbarhet, vilket är en fördel speciellt med tanke på att haltvariationerna i berg kan vara mycket stora inom ett begränsat område.

4.3.2 Test av oxidationsreaktivitet

För analys av bergmaterialets oxidationsreaktivitet som testas på krossprodukten och borrhaxens finfraktion valdes och rekommenderas NAG-metoden som mest lämpad för detta ändamål. Metodval baserade sig på metodens snabba sulfidoxidation och därigenom snabb mätning av aciditet, enkelt genomförande, god repeterbarhet och tämligen låga kostnadsläge. NAG-test bör tillämpas på provens finfraktion 0/1 mm, medan säkerheten avtar med stigande partikelstorlek.

4.3.3 Analysmetoder tillämpade vid klassificering av bergmaterialens sulfidreaktivitet

Förslag på klassificering av bergmaterialets reaktivitet med avseende på sulfidoxidation utgår från resultat från NAG-försök på ett antal krossmaterial (finfraktion 0/1 mm) med olika totalhalt av svavel som har bestämts genom XRF-analys. NAG-försöken har genomförts i Envix laboratorium. I korthet består NAG-försök av forcerad oxidation av provets sulfidinnehållande mineral med hjälp av 15 % väteperoxid följt av destruktion av ev. återstående väteperoxid genom uppvärmning. Efter en tillsats av avjoniserat vatten för att kompensera för det vatten som avdunstat under försöken mäts pH (NAG-pH) och en syrabastitrering (0,1 mol/L NaOH) genomförs på de lakvätskor som har ett pH lägre än 4,5. Titreringen sker i två steg, först till pH 4,5 och direkt därefter till pH 7,0. I det fall NAG-pH överstiger 4,5 bedöms bergmaterialet inte vara syrabildande. Den nettosyrabildande potentialen hos de material vars lakvätskor efter oxidation ligger under pH 4,5 kan beräknas utifrån den tillsats av natriumhydroxid som sker vid titrering till pH 7,0.

Det finns ett tydligt samband mellan provens totalsvavelhalt och tillsatt mängd natriumhydroxid i titreringen. Extrapolation av den rätta linje som de i denna studie erhållna resultaten av NAG-testens titreringar till ekvivalenspunkten pH 7,0 visar på en nettosyrabildning vid svavelhalter överstigande ca 600 ppm.

4.4 Klassificering av sulfidförande bergmaterial

4.4.1 Bakgrund

Med hänsyn till sulfidmineraliseringarnas heterogenitet är klassificeringens resultat beroende av följande faktorer:

- ✓ Provtagning ska baseras på en provtagningsplan som säkerställer att provtagningen är representativ för den bergvolym som kommer att bearbetas. Som provtagningsmetod rekommenderas borrhaxborrning.
- ✓ Enligt undersökningens resultat ska bedömning av konstruktions-materials potentiella förmåga att orsaka försurning baseras på analys av borrhax eller krossprodukts finfraktion 0/1 mm.
- ✓ För att beakta bergmaterials heterogenitet bör varje prov analyseras minst tre gånger (triplikat) med byte av material mellan analyserna. Analyserna utförs med XRF alternativt ICP-MS. Medelvärde och standardavvikelse för varje prov beräknas. Om standardavvikelsen är större än 20 % av medelvärdet bör ytterligare analyser göras för att ge ett bättre statistiskt underlag.
- ✓ Klassificering av konstruktionsmaterial ska baseras på medelvärden av finfraktionens (0/1 mm) totalsvavelhalt (XRF, alternativt ICP-MS) och potentiell försurningsförmåga bestämd med NAG.
- ✓ Klassificering av bergmaterialets sulfidreaktivitet är baserad på sambandet mellan svavelhalt och försurningsreaktivitet.
- ✓ Reaktivitet hos krossmaterial med kornstorlek >1 mm regleras enligt resultat i (tabell 4) då rekommenderat svavelvärde för inert bergmaterial hos fraktionen 0/1 mm modifieras med i tabellen angivna procentsatser.

4.4.2 Föreslagen klassificering

Utifrån resultat från de NAG-testundersökningar föreslås följande klassificering av bergmaterial till konstruktionsändamål baserat på analys av finfraktion (0/1 mm) med XRF alternativt ICP-MS:

<500 ppm svavel

Bergmaterialet är *icke försurande*. Ytterligare åtgärder erfordras inte.

≥500 ppm svavel

Bergmaterialet är *potentiellt försurande*. Risk för att materialet ska orsaka försurning föreligger. Fördjupad undersökning för bedömning av materialets användbarhet krävs. Material som har klassificeras som potentiellt försurande bör genomgå NAG-test för att närmare undersöka materialets nettosyrabildande förmåga och eventuellt behov av behandling innan användning. Om NAG-pH visar <4,5 kan behandling erfordras.

NAG-test på material med höga svavelhalter (>7 000-10 000 ppm) bör genomföras med sekventiell NAG för att säkerställa att allt svavel oxideras.

I en samlad bedömning av försurningsrisk och eventuella behov av behandling är det dock inte tillräckligt att enbart utgå från krossmaterialets innehåll av syrabildande och eventuella syraneutraliserande mineral. Därutöver finns en rad kvarstående aspekter som också måste beaktas, exempelvis: Var i terrängen ska materialet användas? Hur stor volym? Hur ska materialet användas? Vilka storleksfraktioner ska användas? Hydrologiska förhållanden o.s.v. Sådana överväganden ligger utanför ramen för denna utredning att belysa.

4.5 Neutralisering av sulfidförande bergkrossmaterial

4.5.1 Inledning

Möjlighet att använda sulfidförande bergmaterial till konstruktionsändamål är av stor betydelse med avseende på nationalekonomiska aspekter samt ur hållbarhets- och miljösynpunkter. Behovet av konstruktionsmaterial uppskattas till 80-100 miljoner ton per år. Det är av stor betydelse för hushållning av naturresurser att möjliggöra användning/återvinning av överskottsmassor från infrastrukturprojekt och därmed nyttiggöra alla material så långt det är tekniskt möjligt, ekonomiskt rimligt och ekologiskt försvarbart.

Resultat från det aktuella projektet indikerar att sulfidmineraliserad berggrund kan påträffas inom en tredjedel av Sveriges berggrund. Från det perspektivet ter sig tillämpning av effektiva och varaktiga neutraliseringsmetoder av krossmaterial som en nödvändig åtgärd.

4.5.2 Resultat och slutsatser

Delpjektets resultat, slutsatser och rekommendationer är baserade på ingående litteraturstudier, laborativa försök, fullskaliga åtgärder och projektdeltagarnas erfarenhet i frågan.

Kort sammanfattning

Resultat från litteraturstudierna pekar på följande aspekter:

- ✓ De generellt använda metoderna för behandling av sulfidförande berg är huvudsakligen utvecklade och rekommenderade av gruvindustrin och inriktade på efterbehandling av gruvavfall. Dessa metoder fokuserar på behandling av miljöeffekter (t.ex. rening av utströmmande surt och metal kontaminerat vatten) samt efterbehandling av sandmagasin, gråbergsupplag och industriområden genom täckning. De är svåra att tillämpa vid produktion och hantering av krossmaterial avsett för byggande av vägar, järnvägar och som utfyllnadsmaterial. Korta hanteringstider, stor areell spridning kombinerat med sulfidernas snabba reaktivitet kräver att neutralisering riktas direkt mot källan d.v.s. krossmaterialet.
- ✓ Skillnaden i reaktionshastighet mellan sulfidoxidation och silikatvittring/-upplösning begränsar tillförlitligheten hos bergmaterialets självläkande förmåga.
- ✓ Teoretiskt beräknade löslighetsdiagram för sulfidrelevanta metaller visar på behov av behandling i alkalisk miljö.
- ✓ Teoretiska och laborativa studier att högreaktiva sulfidmineral anrikas i fraktionen 0/1 mm vid krossningsförfarande. Deras reaktivitet minskar dock med ökande partikelstorlek. Denna kunskap har stor betydelse vid dosering av neutralisationsmedel, vid klassificering av sulfidförande bergmaterial och vid hantering av grovkrossat berg (tabell 4). Produktion och hantering av konstruktionsbergmaterial kräver snabba, effektiva och varaktiga behandlingsmetoder av sulfidmineraliserade krossprodukter.

Genomfört neutraliseringsförsök

Mot bakgrund av erfarenheter från tidigare genomförda efterbehandlingsprojekt av sulfidmalmsgruvor planerades och utfördes projektets laboratieförsök gällande behandling av sulfidförande krossmaterial.

Grundläggande förutsättningar

Fraktionen 0/1 mm från två krossprodukter 0/8 mm och 0/32 mm med ursprung i sulfidförande bergområde testades med avseende på totalsvavelhalt (XRF) och syraproducerande förmåga (NAG). Finfraktionens totalhalter av svavel bestämdes till 18 500 ppm och andel av finfraktion i provet till ca 40 mass% i 0/8 mm-produkten respektive 2 100 ppm och ca 20 mass% hos sortering 0/32 mm.

Val av metod och neutraliseringsmedel

Med hänsyn till tidigare erfarenheter från framgångsrika behandlingar av dagbrottsgruvor valdes direkt behandling av krossmaterialet med alkalisk slurry som behandlingsmetod. Dosering baserades på provens innehåll av totalsvavel hos den reaktiva fraktionen 0/1mm och dess andel i mass%.

Testning av åtgärdens effektivitet och varaktighet

Laboratorieförsökets effektivitet och varaktighet provades med accelererat varaktighetsförsök och periodiserat kolonnförsök. För undersökningar av reaktionsprocesser och bildning av oxidationsskyddande sekundära mineral tillämpades kombination av XRD, SEM-EDS och polarisationsmikroskopi. Resultaten indikerar varaktig pH-höjning och metallreduktion under långt tidsperspektiv.

4.6 Rekommendationer i sammanfattning

4.6.1 Undersökning och provtagning

- ✓ Den regionala studien i kombination med en platsspecifik undersökning ska ligga till grund för vidare platsbesök och fältbesiktning.
- ✓ Fältbesiktning och inledande provtagning av ytberg genomförs och proven analyseras i första hand med hjälp av binokulär- och polarisationsmikroskopi.
- ✓ Provtagning genom kaxborrning och jord-bergsondering rekommenderas främst för provtagning av fast berg och sprängsten. Provtagningsförfarandet kräver ingen neddelning i fält och ingen efterföljande krossning krävs för vidare analyser. Borrkaxborrning kan även användas för provtagning av grovkorniga bergmaterialprodukter i upplag och redan utlagda massor.
- ✓ En provtagningsplan framställs med utgångspunkt i resultaten från den inledande undersökningen samt efterföljande fältbesiktning och preliminära petrografiska analyser.
- ✓ Provtagning ska medge spårbarhet för varje prov och provberedning genomförs i enlighet med figur 9.

4.6.2 Fraktioner och partikelstorlek

Undersökning av sulfidkoncentration i krossmaterialets fraktioner och deras reaktivitet pekar på att sulfidanrikning av finkorniga och därmed reaktiva partiklar sker i fraktionen 0/1 mm. Reaktiviteten avtar med ökande partikelstorlek (tabell 4). Av denna anledning bör val av analysmetoder, klassificering av sulfidförande bergmaterial, beräkningar av syrapotential och sulfidneutraliserade åtgärder i första hand fokusera på finfraktion 0/1 mm. Syrabildande egenskaper hos grövre fraktioner bör bedömas efter fallande reaktivitet.

4.6.3 Analysmetoder

För kemisk karakterisering rekommenderas analys med röntgenfluorescens (XRF) på finfraktion 0/1 mm; minst tre analyser på varje prov. XRF är en metod som möjliggör ett stort antal analyser till låg kostnad och ger omedelbart resultatsvar. Därigenom kan den utmaning som ligger i en ofta kraftigt heterogen fördelning av sulfidmineral i berggrunden adresseras.

Geokemisk analys av bergmaterials nettosyrabildande förmåga utförs lämpligen med NAG-test (Net Acid Generation).

4.6.4 Klassificering

Klassificering av bergmaterial bör baseras på analys av finfraktion (0/1 mm) med XRF alternativt ICP-MS.

<500 ppm svavel

Bergmaterialet är *icke försurande*. Ytterligare åtgärder erfordras inte.

≥500 ppm svavel

Bergmaterialet är *potentiellt försurande*. Risk för att materialet ska orsaka försurning föreligger. Fördjupad undersökning för bedömning av materialets användbarhet krävs. Material som har klassificeras som potentiellt försurande bör genomgå NAG-test för att närmare undersöka materialets nettosyrabildande förmåga och eventuellt behov av behandling innan användning. Om NAG-pH visar <4,5 kan behandling erfordras.

NAG-test på material med höga svavelhalter (>7 000-10 000 ppm) bör genomföras med sekventiell NAG för att säkerställa att allt svavel oxideras.

I en samlad bedömning av försurningsrisk och eventuella behov av behandling är det dock inte tillräckligt att enbart utgå från krossmaterialets innehåll av syrabildande och eventuella syraneutraliserande mineral. Därutöver finns en rad kvarstående aspekter som också måste beaktas, exempelvis: Var i terrängen ska materialet användas? Hur stor volym? Hur ska materialet användas? Vilka storleksfraktioner ska användas? Hydrologiska förhållanden o.s.v. Sådana överväganden ligger utanför ramen för denna utredning att belysa.

4.6.5 Behandlingsmetoder

Med hänsyn till krossmaterialets korta hanteringstider, stor areell spridning kombinerat med sulfidernas snabba reaktivitet bör neutralisering riktas direkt mot källan. För behandling av krossmaterial med fokus på neutralisering av sulfidanrikad finfraktion (0/1 mm) rekommenderas slurrymetoden med beräknad reducerad dosering för grövre fraktioner. Enligt laboratorieförsökets resultat sker metodens inverkan i två steg: 1) bildning av oxidationsskyddande (coating) svårlösliga sekundära mineral vid inledande högt pH orsakat av lågt innehåll av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och 2) långvarig pH-reglering av genomströmmande nederbördsvatten genom karbonatbuffring.

4.6.6 Varaktighetstester

Med syfte att kontrollera slurrymetodens varaktighet rekommenderas två laktester:

1. Accelererat lakförsök som är en modifierad variant av SIS-CEN/TS 15864:2015. Metoden är baserad på cyklisk dosering med ökande doser av avjoniserat vatten (L) varvade med lufttorkningsperioder (oxidation). L/S kvoten beskriver mängden av perkolerande joniserat

vatten genom provets massa. Försökets resultat ger tämligen snabb information om provets pH och konduktivitetsstatus under långa tidsperspektiv.

2. Periodiserat kolonnförsök, vars syfte dels är att bedöma neutraliseringsdosens varaktighet, dels att utvärdera reaktionens oxidationshämmande verkan genom bildning av sekundära mineral på ytan av sulfidmineralpartiklar. Under första perioden mäts verkan av karbonatneutralisering vid tillsats av bestämda volymer avjoniserat vatten (nederbördspåverkan) tills pH uppnår nivåer vanliga för naturligt grundvatten. Vid period två växlas längre oxidationsperioder med dosering av avjoniserat vatten åtföljda av pH- och konduktivitetmätningar. Denna metod är mer tidskrävande.

5 REFERENSER

Alakangas, L., Andersson, A., Mueller, S. (2013) Neutralization/prevention of acid rock drainage using mixtures of alkaline by-products and sulfidic mine wastes. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20:7907–7916.

AMIRA International (2002) *ARD Test Handbook Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage*. AMIRA International Limited, Melbourne, Australien.

Bastos, R.O., Melquiade. s, F.L., Biasi, G.E.V. (2012) Correction for the effect of soil moisture on in situ XRF analysis using low-energy background. *X-Ray Spectrom.*, 41, 304-307.

Becker m.fl., (2015) A mineralogical approach to evaluating laboratory scale acid rock drainage characterisation tests. *Minerals Engineering* 80, 33–36.

Donovan, J.J.; J. Frazier; M. Daly; E. Werner; P.F. Ziemkiewicz; C. Black, (2000) Experimental Injection of Alkaline Lime Slurry for In-Situ Remediation of an Acidic Surface-Mine Aquifer, *Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, 20-26 May 2000, Denver, CO* Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, CO. ISBN: 0-87335-182-7. Vol 2, p 1001-1016.

Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide, The International Network for Acid Prevention.
www.gardguide.com

Höglund L O, Herbert R (Editors), Lövgren L, Öhlander B, Neretnieks I, Moreno L, Malmström M, Elander P, Lindvall M and Lindström B (2004) *MiMi (Mitigation of the Environmental Impact from Mining Waste) - Performance Assessment Main Report*, MiMi 2003:3, ISSN 1403-9478, ISBN 91-89350-27-8.

Jambor, J.L. J.E. Dutrizac, L.A. Groat, M. Raudsepp. (2002) Static tests of neutralization potentials of silicate and aluminosilicate minerals. *Environmental Geology* 43:1–1.

Karlsson, M., Lindgren, J. (2006) WinSGW, a User Interface for SolGasWater.
<http://www.winsgw.se>

Karlsson T., Räisänen M. L., Lehtonen M., Alakangas L. (2018) Comparison of static and mineralogical ARD prediction methods in the Nordic environment. *Environmental Monitoring & Assessment*, ISSN 0167-6369, E-ISSN 1573-2959, Vol. 190, nr 12, artikel-id 719, 2018

Kilbride, C., Poole, J., Hutchings, T.R. (2006) A comparison of Cu, Pb, As, Cd, Zn, Fe, Ni and Mn determined by acid extraction/ICPeOES and ex situ field portable X-ray fluorescence analyses. *Environmental Pollution* 143, 16-23.

Lasaga, A.C., J.M., Soler, J. Ganor, T.E., Burch, K,L,Nagy. (1994) Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 58, 2361-2386.

Lindgren (2020) *Utvärdering av predikteringsmetoder för sulfidförande berg*. Examensarbete. Luleå tekniska universitet.

Lindsay, M. Moncur, M., Bain, J., Jambor, J., Ptacek, C., Blowes, D. (2015) Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*.
10.1016/j.apgeochem.2015.01.009.

Lundqvist, J., Lundqvist, T., Lindström, M., Calner, M. & Sivhed, U. (2011) Sveriges geologi från urtid till nutid. Tredje upplagan, Studentlitteratur AB, Lund, 628 s.

Maest, A., Nordstrom, D.K. (2017) A geochemical examination of humidity cell tests. *Applied Geochemistry*, 81, 109-131.

Matthies, R., Bowell J., Williams K., P. (2011) Geochemical assessment of gold mine tailings proposed for marine tailings disposal. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 11, 41-50.

Miskovsky, K., (1985) The Baltic Shield relief and its development. *Fennia* 163:2, pp 353-358. Helsing.

Morin, K.A. & Hutt, N.M. (1999) Internet Case Study #10: Comparison of NAG Results to ABA Results for the Prediction of Acidic Drainage. Minesite Drainage Assessment Group (MDAG). http://www.mdag.com/case_studies/cs1-99.html

Oelkers, E.H. J. Declercq, G., D. Saldia, D. S., R. Gislason, J., Schott. (2018) Olivine dissolution rates: A critical review. *Chemical Geology*, 500, 1-19.

Palandri, J.L., Kharaka, Y.K., (2004) A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application in geochemical modeling. In: U.S. Geological Survey, Open File Report 2004-1068.

Parbhakar-Fox, A., Lottermoser, B.G., (2015) A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering* 82:107-124.

Poussette, K. (2007) Råd och rekommendationer för hantering av sulfidjordsmassor, Teknisk rapport Luleå tekniska Universitet - LTU rapport 2007:13.

Price, W.A. (2009) Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Report 1.20.1.

Rimstidt, J., Brantley, S., Olsen, A. (2012) Systematic review of forsterite dissolution rate data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 99. 159-178.

Rouillon M., Taylor, M.P. (2016) Can field portable X-rayfluorescence (pXRF) produce high quality data for application in environmental contamination research? *Environmental Pollution* 214, 255-264.

Räisänen, Marja & Kauppila, Päivi & Timo, Myöhänen. (2010) Suitability of static tests for acid rock drainage assessment of mine waste rock. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 82. 10.17741/bgsf/82.2.003.

Sapsford D.J., Bowell R.J., Dey M., Williams, C., Williams K.P. (2008) A Comparison of Kinetic NAG tests with Static and Humidity Cell Tests for the Prediction of ARD. *Proceedings Mine Water and the Environment*.

Sapsford D.J., Bowell R.J., Dey M., Williams K.P. (2009) Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. *Minerals Engineering*, 22, 25-36.

Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R., & Smith, R.M. (1978) Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 45268. EPA-600/2-78-054, 47-50.

St-Arnault, M., B. Vriens, R. Blaskovich, (2019) Geochemical and mineralogical assessment of reactivity in a full-scale heterogeneous waste-rock pile. *Minerals Engineering* 145(106089). DOI: 10.1016/j.mineng. 106089

Stenvall M. (2002) *Bedömning av neutraliseringsförmågan i sulfidhaltiga gruvavfall*. Åbo Akademi.

Stewart, W. A., Miller, S. D., Smart, R. (2006) Advances in Acid Rock Drainage (ARD) Characterisation of Mine Wastes. Paper presenterat på the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis MO. Publiserat av the American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 3134 Montavesta Road, Lexington, KY 40502.

Svenska Institutet för Standarder (1997) "Ballast – Generella egenskaper – Del 1: Metoder för provtagning", SS-EN 932-1, European Committee for Standardization, Bryssel, 25 pp.

Svenska Institutet för Standarder (1999). "Ballast – Generella egenskaper – Del 2: Metoder för neddelning av laboratorieprov", SS-EN 932-2, European Committee for Standardization, Bryssel, 16 pp.

Svenska Institutet för Standarder (2012). "Ballast – Geometriska egenskaper – Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning – Siktning", SS-EN 933-1:2012, European Committee for Standardization, Bryssel, 28 pp.

Svenska Institutet för Standarder (2016) "Karaktärisering av avfall - Test av grundläggande lakegenskaper - Dynamisk laktest för monoliter med kontinuerligt utbyte av lakvätska vid testförhållanden relevanta för ett specificerat scenario", SIS-CEN/TS 15864:2015. European Committee for Standardization, Bryssel, 25 pp.

Taylor, J. Pape, S. Murphy, N. (2005) A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD) Fifth Australian Workshop on Acid Mine Drainage 29-31 August 2005 Fremantle, Western Australia.

Trafikverket (2015) Trafikverkets handbok för hantering av sulfidförande bergarter. Trafikverket. ISBN 978-91-7467-713-3.

Wills B.A., Finch J.A. (2016) Wills' Mineral Processing Technology 8th Ed., Butterworth-Heinemann.

Wu, C-M., Tsai, H-T., Yang, K-H., Wen, J-C. (2012) How Reliable is X-Ray Fluorescence (XRF) Measurement for Different Metals in Soil Contamination? *Environmental Forensics*, 13, 110–121.