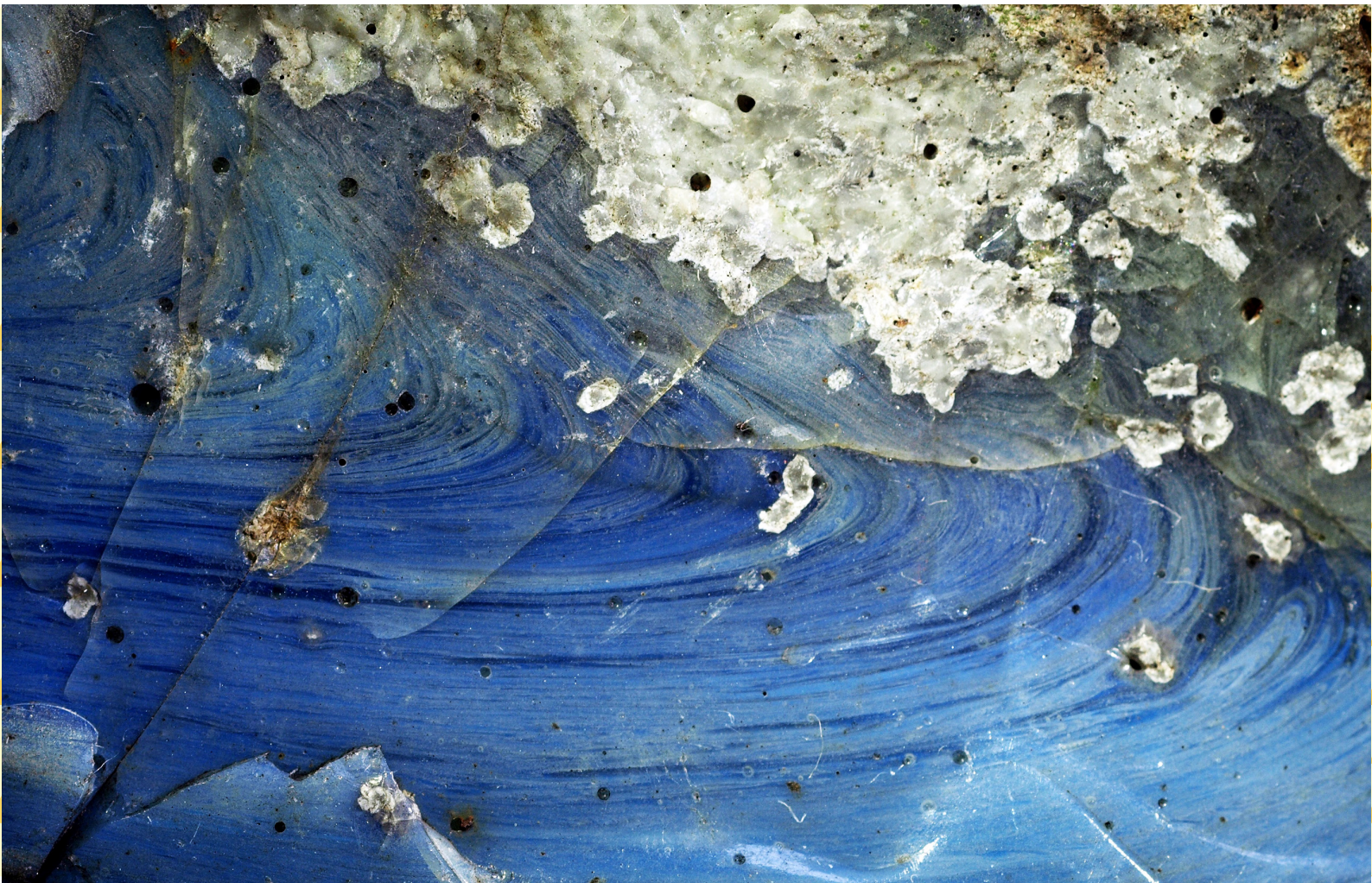


Pilotstudie

# Kritiska och strategiska metaller i historiska slagger



Erik Jonsson

[www.sgu.se](http://www.sgu.se)

SGU-rapport 2025:13

Författare: Erik Jonsson  
Granskad av: Alexander Lewerentz  
Ansvarig enhetschef: Ildikó Antal Lundin  
Redaktör: Lina Rönnåsen

Omslagsbild: Flödesstrukturer i en blå, glasig järnslag från Skilå övre hytta, Riddarhyttan. Slaggerna från denna hytta är anrikade på sällsynta jordartsmetaller. Bildbredd ca 3,5 cm.  
Fotograf: Erik Jonsson

December 2025

**Sveriges geologiska undersökning**

Box 670, 751 28 Uppsala  
tel: 018-17 90 00  
e-post: [sgu@sgu.se](mailto:sgu@sgu.se)  
[www.sgu.se](http://www.sgu.se)



# Innehåll

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Sammanfattning .....                                      | 4  |
| Inledning och bakgrund .....                              | 5  |
| Slagg – diversifierade avfall från malmprocessering ..... | 5  |
| Provtagning .....                                         | 9  |
| Riddarhytteområdet .....                                  | 10 |
| Riddarhyttans kopparverk .....                            | 11 |
| Lienshyttan .....                                         | 12 |
| Skilå övre hytta .....                                    | 12 |
| Falun .....                                               | 13 |
| Provberedning och analyser .....                          | 14 |
| Resultat .....                                            | 15 |
| Riddarhyttanområdet .....                                 | 15 |
| Riddarhyttans kopparverk .....                            | 15 |
| Lienshyttan .....                                         | 23 |
| Skilå övre hytta .....                                    | 25 |
| Falun .....                                               | 27 |
| Falu gruva och de centrala områdena .....                 | 27 |
| Korsgårdenområdet .....                                   | 32 |
| Sammanfattning och diskussion .....                       | 34 |
| Rekommendationer för fortsatta undersökningar .....       | 39 |
| Referenser .....                                          | 40 |

# Sammanfattning

Denna rapport redovisar resultat och tolkningar från en pilotstudie inriktad på att undersöka potentialen för kritiska och strategiska metaller i historiska hyttslaggar i Sverige. Den första fasen av projektet genomfördes inom ramen för ett regeringsuppdrag som SGU fick 2021 och avrapporterade i februari 2023. Uppdraget var inriktat mot gruvrelaterade avfall eller så kallade ”sekundära resurser”. Då valdes två skilda huvudområden ut för provtagning; Riddarhyttan i de västra delarna av centrala Bergslagen och Falun i norra Bergslagen. Därefter fördjupades den analytiska metodiken för att närmare karakterisera slaggerna, deras dominerande faser och innehåll av olika grundämnen i både glas och kristallina föreningar.

Undersökningarna av det provtagna materialet visar tydligt att våra historiska hyttslaggar kan ha potential för utvinning av vissa kritiska metaller. I de här undersökta förekomsterna handlar det främst om kobolt och sällsynta jordartsmetaller, möjligen kombinerat med icke-kritiska högvärdesmetaller (guld, silver) och en strategiskt klassad basmetall som koppar. Kopparslaggerna från Riddarhyttan uppvisade också förhöjda koncentrationer av bland annat vismut, volfram och i mindre utsträckning indium (ej klassad som EU-kritisk i den senaste listan från 2023), medan Faluslaggerna uppvisade modesta förhöjningar av volfram.

Över lag sammanfaller de uppmätta förhöjningarna av ett flertal kritiska och strategiska metaller med vad som är karakteristiskt för många av malmerna, mest specifikt så för de polymetalliska järn- och kopparmineraliseringarna i Riddarhytteområdet. Det är viktigt att observera att representativiteten för hela slaggvolymererna är låg med så pass få analyserade prov per lokal eller delområde. Detta beror på projektets ekonomiska och tidsmässiga ramar liksom dess karaktär av pilotstudie. Det kan dock ändå konstateras att utfallet var lyckat och att flera intressanta förhöjningar, i vissa fall markant höga halter, av kritiska och strategiska metaller kunnat påvisas i de undersökta slaggerna.

Huruvida utvinning (eller ”återutvinning”) av metaller ur hyttslaggar kan genomföras med någon ekonomisk potential är en helt annan fråga som måste utvärderas och baseras på ett flertal tekniska och ekonomiska parametrar och beräkningar. Av dem är de eventuella totala tillgängliga tonnagen med kända och relevanta genomsnittshalter som kan behandlas med en rimlig processmetodik rimligen de mest centrala. Vilka specifika faser som agerar värdar för relevanta metaller och hur de senare är bundna i dem är också nyckelfrågor för en eventuell extraktion av dem. Den relativt diversifierade ”mineralogi” som uppvisas i ett flertal av de här undersökta metallrika slaggerna kombinerat med ofta komplexa och småskaliga texturer utgör uppenbara utmaningar. Problem med detektion av låga halter av relevanta metaller (t.ex. sällsynta jordartsmetaller) i såväl kristallina faser som glas gör också att det vid eventuella fortsatta undersökningar av slaggar rekommenderas att komplettera med ytterligare analysmetoder utöver de som använts för denna studie.



# Inledning och bakgrund

Kritiska metaller och mineral är de dominerande materialen bland dem som vi inom EU idag kallar för ”kritiska råmaterial” (eng. *Critical Raw Materials*, CRM). Klassificeringen bygger på två parametrar: materialens sammanvägda tillgångsrisk, det vill säga risken för att vi ska drabbas av störningar i tillgången till dem, och deras totala ekonomiska betydelse för europeisk industri (se Blengini m.fl. 2020, och referenser däri). I den senaste klassifikationen från 2023 har även några i grunden icke-kritiska metaller, koppar och nickel, tillsammans med flertalet kritiska råmaterial också inlemmats under benämningen ”strategiska”, i och med deras centrala roll för utvalda teknikområden som elektrifiering och försvar (Grohol m.fl. 2023).

Idag produceras huvuddelen av de kritiska råmaterialen genom primär gruvbrytning. Endast för en mindre delmängd av dem är återvinning en viktig källa för industrins behov. Kompletterande återvinning av exempelvis gruvavfall av olika slag kan potentiellt fungera för vissa metaller i vissa typer av förekomster och under vissa omständigheter. Av de olika typer av sådant avfall som existerar i gruv- och hyttområden världen över så är vissa typer av slagger bland de mera intressanta kandidaterna för framtida metallproduktion (se t.ex. Lottermoser 2011, Ettler med flera 2022, samt referenser i dem).

Den här rapporten redovisar ett pilotprojekt inriktat på att ta fram information om potentialen för förekomst av kritiska och strategiska metaller i historiska hyttslagger och deras karaktär i Sverige. Det genomfördes till en första, initial del inom ramen för ett regeringsuppdrag inriktat mot gruvrelaterade avfall eller ”sekundära resurser” som SGU fick 2021 och som avrapporterades i februari 2023 (SGU:s diarie-nr: 311-781/2021; SGU RR 2023:1; se också Lewerentz m.fl. 2023). På grund av inte minst tidsbegränsningar så gjordes undersökningarna av slagger med fokus på några utvalda förekomster i Bergslagen i södra Mellansverige. Urvalet baserades på

- kännedom om vilka typer av malmer som bearbetats i aktuella hyttor
- vilka geologiska processer med tillhörande potential för koncentration av vissa metaller som legat bakom bildningen av dessa malmer
- indikativa resultat från tidigare studier (se till exempel Jonsson 2020).

Ytterligare en parameter i urvalsprocessen var att åtminstone en del av slaggansamlingarna skulle utgöra förhållandevis omfattande volymer. Resultaten som producerades och redovisades i rapporten för regeringsuppdraget var av summarisk natur och begränsade till resultat från kemiska bulkanalyser av det provtagna materialet (se Jonsson m.fl. 2023). Därför tillkom det inför den här rapporten arbete med bakgrund tillsammans med mera detaljerade och kompletterande undersökningar, omfattande nya analyser med olika metoder, observationer och tolkningar. Fullständiga geokemiska analysdata från studien finns tillgängliga i SGU:s litogeokemiska databas. En del av resultaten presenterades också av Jonsson (2024).

## Slagg – diversifierade avfall från malmprocessering

Med termen ”slagg” (plural: slagger) menas normalt restprodukter från pyrometallurgisk processering av olika metallrika geologiska material – malmer. Det vill säga förhyttning av olika material rika på ett eller flera malmmineral i syfte att extrahera en eller flera metaller ur dem. Vanligen är i synnerhet *historiska* slagger relativt heterogena material som ofta domineras av glas, då de stelnat genom en snabb avkylning av en silikatdominerad smälta som separerats från metallrika dito under hyttprocessen. De kan således innehålla stora volymer av glas med varierande kemisk sammansättning, men också varierande andel kristaller, singulära eller i olika former av aggregat, av främst silikat-, sulfid- och oxid-”mineral”. (Vetenskapligt korrekt så rör det sig mestadels om specifika minerals antropogena/syntetiska ekvivalenter; för att strikt sett vara ett mineral krävs att fasen i fråga ska ha

bildats av en geologisk process; se till exempel Nickel 1995). Slaggerna kan även innehålla inneslutningar av relikta sulfider och andra primära mineral (från den ursprungliga malmen) samt icke-separerade, framreducerade metaller och icke-reagerade slaggbildare. Framför allt äldre (historiska) slaggar kan ofta innehålla olika rester av bränslen från hyttprocessen, exempelvis kol och koks (figurerna 1 och 2). I mikroskala ses ofta en blandning av kristaller och glas samt ofta karakteristiska luftbubblor (figur 3); de sistnämnda också vanligen väl synliga utan förstoring. Rundade inneslutna luftbubblor av olika storlek är typiska för snabbt avkylda glasiga smältor, vilka alltså stelnat mycket hastigt under normala atmosfärsförhållanden.

Moderna slaggar, särskilt sådana från järn- och stålindustrin, är som regel mycket mera homogena sett både till sammansättning och övrig karaktär. Moderna eller recenta slaggar har också i gemen lägre halter av metaller, då metoderna utvecklats till att bli mera effektiva än under historisk tid.



**Figur 1.** Exempel på större ansamling av metalliskt järn som hamnat i slaggen. Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 2.** Exempel på en heterogen, sannolikt mycket gammal slagg med rundade gasblåsor (ursprungliga "luftbubblor") av olika storlekar samt rikliga och grova inneslutningar av framför allt (trä-)kol som rester från förhytningsprocessen. Förekomsten av lokala rostkoncentrationer visar på närvaro av inneslutningar av metall och/eller järnrika, lättvittrade metallsulfider. Gamla Berget, Falun. Snusdosa som skala: diameter 7 cm. Foto: Erik Jonsson.





**Figur 3.** Bild av tunnslip från slagprov från Falun i genomfallande planpolariserat ljus; bildbredd ca 3 mm. Bilden visar en grundmassa dominerad av euhedra till subhedra kristaller av en ljusgrön till lätt bruntonad fayalitartad (järn-magnesiumsilikat) fas med en grundmassa (till dels dominerande, exempelvis i högra kanten av bilden) av mörkt eller svart glas. En del mera kantiga eller cirkelrunda svarta inneslutningar är sulfider och metallfaser. I de större glasansamlingarna uppträder också rundade bubblor (ursprungligen tomma), vilka nu är vita, fyllda med epoxy med, i sin tur, mindre luftbubblor i. Foto: Erik Jonsson.

Då hyttor för metallframställning ur olika malmtyper funnits spridda över stora delar av landet, inte minst i och i anslutning till malmprovinsen Bergslagen i södra Mellansverige, så finns också rikliga rester av sådana avfallsmaterial i dessa områden. Större ansamlingar (volym) av slag brukar benämnas ”slagghvarp”. Detta begrepp ska inte blandas samman med termen ”varp”, som är en beteckning för brutet sidoberg/ofyndigt berg eller malm med för låga halter. Varp har avskilts från den ekonomiskt brytbara malmen vid alla gruvor i alla tider, normalt förekommande i form av ”varphögar”.

Redan tidigt nyttjades de mera homogena slagghmältorna från främst olika hyttor för järnframställning till att gjuta större och mindre kantiga byggstenar eller block av för konstruktion av byggnader (”slagghegel”). Detta finns det många exempel på i och kring våra historiska hytt- och gruvområden (figur 4). Sådana, vanligen glasiga slaggher (se till exempel omslagsbilden till denna rapport), benämndes traditionellt ”sinnersten” i Bergslagen (ibland skrivet ”sintersten” eller ”sindersten”). Gröna och blå sådana har ibland kallats för ”bergslagssten”.





**Figur 4.** Exempel på historisk byggnad av gjutna, mörka slaggblock – så kallat "slaggtegel" – invid Stora Stöten, Falu koppargruva, Falun. Bågarna över fönstren och taket med mera utgörs dock av normalt tegel. Foto: Erik Jonsson.



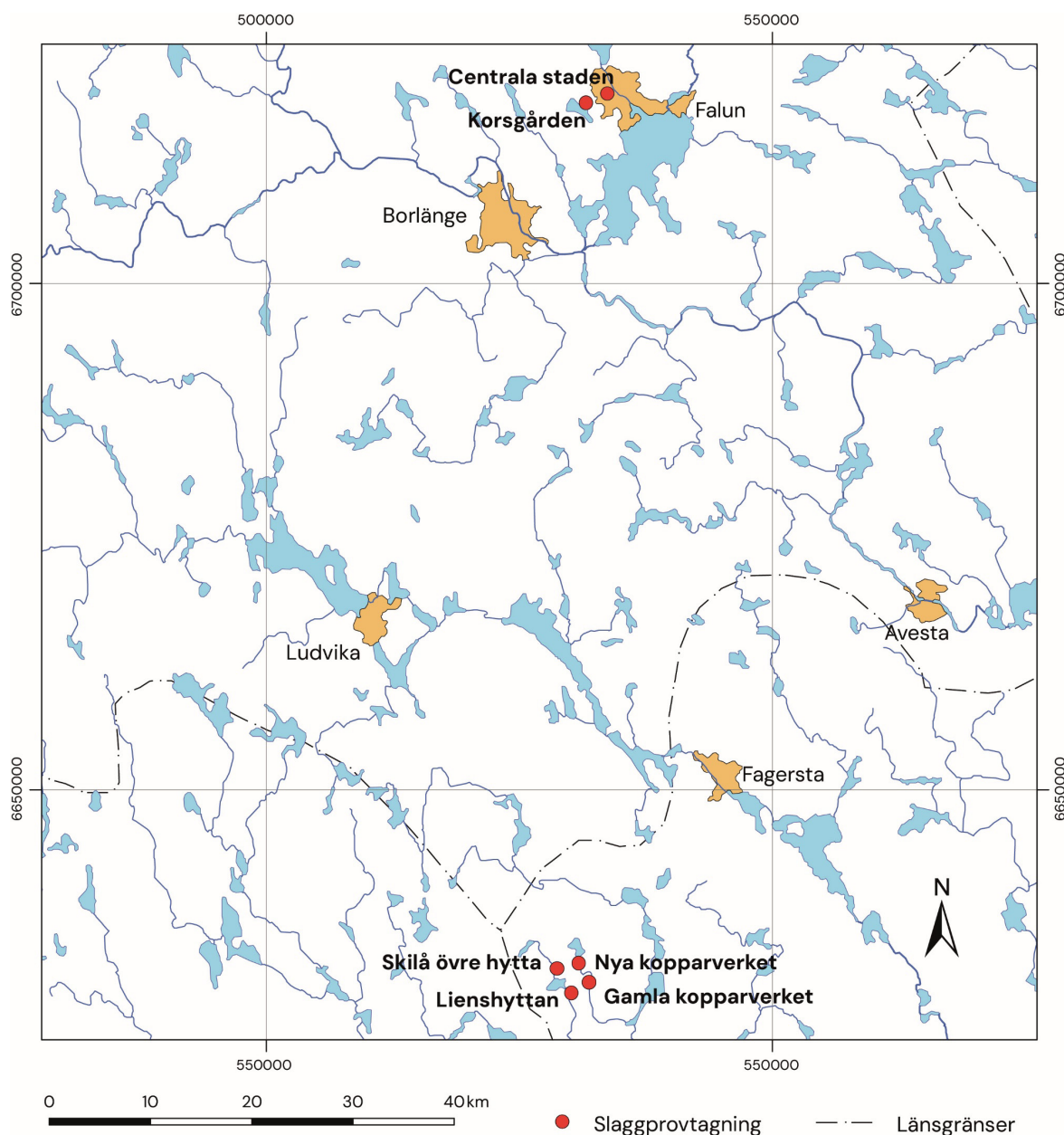
Idag nyttjas över 80 procent av den nyproducerade slaggen från svensk järn- och stålindustri i olika tillämpningar, varav den största delen tas tillvara direkt av den producerande industrin, enligt Jernkontoret (2025). Andra viktiga användningsområden för moderna slaggar i Sverige är som komponenter i deponikonstruktioner och vägmateriäl. Återanvändning av pyrometallurgiska slaggar från sulfidmalmsförhyttning kan vara svårare, inte minst på grund av de varierande halterna av, och värdfaserna för, olika tungmetaller. Detta gäller i synnerhet för historiska slaggmateriäl, men det hänger i varje enskilt fall på karaktären av den specifika slaggen (och därmed på både den ursprungliga mineraliseringens egenskaper och på den eller de processer som malmen senare behandlats med fram till bildandet av slaggen). Användningsområden idag omfattar framför allt tillverkning av cement och betong, nyttjande som fyllnadsmassa, ballast och aggregatmateriäl, som abrasiva materiäl inklusive blästermateriäl, samt med varierande grad av potential, möjlig ytterligare utvinning av metaller (se till exempel Lottermoser 2011 för en bred representation av möjliga användningsområden för olika typer av restprodukter från gruv- och hyttverksamhet). Till exempel så nyttjas moderna kopparslaggar i form av s.k. järnsand (med handelsnamnet ”järnsilikat”) från Bolidens Rönnskärswerk bland annat som vägfyllnadsmateriäl. Boliden själva skriver exempelvis att ”Järnsanden har goda egenskaper för markisolering och dränering...” (Boliden 2025). Eftersom denna slagggprodukt fortfarande kan innehålla en hel del (tung-) metaller som koppar, liksom andra potentiellt problematiska grundämnen, så föreligger dock relativt skarpa rekommendationer om användning på avstånd från vattentäkter och brunnar samt avhållsamhet från nyttjande i sura eller potentiellt syrabildande (exempelvis sulfidförande) miljöer generellt. Över lag har också relativt omfattande undersökningar och forskning genomförts under senare decennier för att bättre identifiera potentialen för användning av olika slagggprodukter i olika tillämpningar som de som nämnts ovan och detta arbete är fortlöpande. I de allra flesta fall har slaggmateriälen undersökts för användningsområden som generellt motsvarar industrimineral (se ovan samt Lottermoser 2011).

Historiska hyttslaggar verkar däremot över lag ha studerats endast mycket sparsamt i modernare tid, om man beaktar Sverige och svenska förekomster. Liksom i fallet med järnsanden som nämns ovan, och i de flesta fall än mer så, kan historiska sulfidmalmslaggar vara förknippade med risk för lakning och påföljande mobilisering av ett flertal metaller och halvmetaller med associerade miljö- och hälsorisker, exempelvis genom kontaminering av vatten i olika typer av flöden och recipienter (se t.ex. Parsons m.fl. 2001). Vissa detaljundersökningar av historiska slaggar, främst från järnframställning, har också genomförts under senare år med fokus på arkeologiska frågeställningar (huvudsakligen vid Geoarkeologiskt laboratorium i Uppsala, sedermera Arkeologerna, under Statens historiska museer, SHM). Historiskt sett har också vissa studier gjorts av svenska slaggar, men i till synes begränsad utsträckning (se t.ex. Vogt 1884), liksom av slagg, råmetall och besläktade materiäl ur arkeologiska eller arkeometallurgiska perspektiv (se t.ex. Forshell 1992). Föreliggande studie innebär därför en möjlig startpunkt för att, inte minst, utvärdera potentialen i historiska svenska hyttslaggar för (åter-)utvinning av olika metaller.

## Provtagning

Inom ramen för det befintliga projektet valdes två skilda huvudområden ut för provtagning, Riddarhyttan i västra centrala Bergslagen samt Falun i norra Bergslagen (figur 5). Båda områdena utmärks av en mycket lång historia av gruvbrytning, men med lite olika fokus över tid vad gäller vilka specifika metaller och typer av malmer som brutits. Denna variation över tid är inte minst tydlig i Riddarhyttan. Områdena har dock flera gemensamma nämnare varav de två viktigaste är att

1. de geologiska och framför allt metallogenetiska förutsättningarna för relevanta halter av (olika) kritiska metaller i de malmer som nyttjats för framställning av metall i hyttorna bedömts vara goda
2. hyttorna i alla fall till dels producerat relativt stora mängder slagg över längre tid.



**Figur 5.** Kartutsnitt över västra centrala till nordvästra Bergslagen visande de provtagna slaggllokaler med Riddarhytteområdet i söder (Västmanland) och Faluområdet (Dalarna) i norr. Koordinatnät Sweref 99. Från Jonsson m.fl. 2023.

## Riddarhytteområdet

Riddarhyttan ligger ca 26 km sydväst om Fagersta i Västmanlands län (Sweref 6630181/530466; figur 5). Vid Riddarhyttan har på ett flertal platser brytning liksom pyrometallurgisk framställning av koppar ur sulfidmalm och järn ur olika järnoxidmalmer, genomförts under perioder sedan åtminstone 1500-talet. Ett resultat av hyttprocesserna är relativt stora mängder kvarvarande slagg (slagghvarp). Att kobolt förekommer associerat med främst kopparsulfidmineraliseringarna i området är väl bekant sedan Georg Brandts upptäckt av kobolt i malm härifrån (Brandt 1735, 1760) och de har tidigare också bearbetats sporadiskt på denna metall (Carlborg 1923, Tegengren 1924). Inte sällan uppträder också anrikningar av sällsynta jordartsmetaller delvis tillsammans med kobolt-koppar-mineraliseringarna och Riddarhyttan, specifikt i fallet med gruvorna vid Nya Bastnäs-fältet, utgör också upptäcktslokalen för både cerium och lantan samt ett antal av deras värdmineral (se t.ex. Andersson 2004, Jonsson m. fl. 2019, Jonsson 2020, Jonsson & Högdahl 2023, Söderhielm m.fl. 2023, och referenser däri).



## Riddarhyttans kopparverk

Från 1616 uppbyggdes en kopparhytta, det så kallade Gamla kopparverket (ibland även refererat till som ”Gamla hyttorna”), och förhyttning genomfördes där åtminstone till sent 1700-tal (Sweref 6633000/530794; figurerna 5, 6). Därefter uppfördes under det tidiga 1800-talet en ny anläggning, det så kallade Nya kopparverket, som togs i bruk från 1819 (Sweref 6631009/531930; figurerna 5, 7). Här bedrevs kopparproduktion fram till 1873 (Carlborg 1923; Tegengren 1924).

Under den långa tid som kopparhyttorna var i bruk användes kopparmalm från ett flertal olika gruvor i området. Slaggerna har en viss variation i utseende, och provtagningen genomfördes för att i någon utsträckning försöka avspeglar denna variabilitet.



**Figur 6.** Större yta av plan slaggvarp vid den södra delen av slaggområdet vid Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 7.** Omfattande slaggvarpar och andra industriella lämningar vid Nya kopparverket, Riddarhyttan. Foto: Erik Jonsson.



## Lienshyttan

Lienshyttan ligger också vid Riddarhyttan i Västmanlands län (Sweref 6630166/530101; figur 5). I Lienshyttan har förhyttning av malm sannolikt gjorts sedan 1500-talet. Modernare pyrometallurgisk framställning av järn ur järnoxidmalm gjordes här från omkring 1847 fram till 1959 (se t. ex. Skyllberg 1997), vilket resulterat i större ansamlingar av exponerad slagg (slagggvarp). Även om slaggerna här till synes domineras av gröna, glasiga dito (se till exempel figur 8) finns en viss variation i utseende och provtagningen har genomförts för att försöka belysa denna variabilitet.

## Skilå övre hytta

Skilå övre hytta ligger vid Källfallet, strax nordväst om Riddarhyttan i Västmanlands län (Sweref 6632355/528745; figur 5). Här har pyrometallurgisk framställning av järn ur järnoxidmalm gjorts mellan 1653 och 1802 (se t. ex. Skyllberg 1997), vilket resulterat i ansamlingar av idag mestadels (kraftigt) övervuxen slagg (slagggvarp).

Bäcka, Skärsjö och Bastnäs gruvor ska över tid ha levererat järnmalm hit. Även om slaggerna här till synes domineras av gröna och blå, ofta glasiga dito (se omslagsbilden till denna rapport samt figur 9) finnes en viss variation i utseende och provtagningen har genomförts för att belysa denna variabilitet.



**Figur 8.** En finkornig typ av grön, glasig slagg i Lienshyttan. Snusdosa som skala, 7 cm i diameter. Foto: Erik Jonsson.





**Figur 9.** Olika typer av mestadels glasig slagg, från mörkt grå till grön med rikliga gasblåsor respektive relativt tät och ljusblå till nästan vit (höger om hammarskaftet) i den övervuxna slaggvarpen vid Skilå övre hytta. Foto: Erik Jonsson.

## Falun

Falun ligger i den norra delen av malmprovinsen Bergslagen, i Dalarnas län (figur 5). I stadens södra del ligger Falu koppargruva (Sweref 6718321/533554), vilken började brytas på kopparrik malm omkring 400–800 e.Kr. och var i varierande form av storskalig drift från åtminstone 1100-talet (Tegengren 1924, Eriksson & Qvarfort 1996) till dess nedläggning 1992. Falukoppar har historiskt använts till en mängd olika produkter (se t.ex. Forshell 1992, samt referenser däri) och Falu gruva var under lång tid en stor kopparproducent också på internationell skala.

Då kopparmalmen mestadels processerades (förhyttades) i närheten av gruvan har pyrometallurgisk framställning av koppar ur sulfidmalm gjorts här i någon form mer eller mindre kontinuerligt sedan åtminstone 800 till 1100 år tillbaka och ett resultat av detta är mycket stora mängder slagg (slaggvarp) i olika delområden (se t. ex. Tegengren 1924, Lindroth 1955). Sannolikt är idag också stora slaggvolymen övertäckta av annat material. I samband med detta projekt provtogs flera olika områden med ansamlingar av slagg (figur 5), men mycket återstår för att få en mera komplett bild av Faluslaggernas karaktär.

Eftersom Faluslaggerna är geografiskt utspridda beskrivs resultaten av analyserna av slaggar från området kring Falu gruva och centrala Falun (figurerna 5, 10, 11) separerat från slaggar i Korsgårdensområdet (figur 5). I gruvområdet och ”centrala Falun” provtogs varpar specifikt i områdena kring Hyttgårdsparken (figur 10), Gamla Berget (figur 2), samt kring Stora Stöten (figur 11). Delområdet Korsgården är det som är mest distinkt geografiskt separerat från Falu gruva och omfattar den slaggvarp som återfinns öster om Korsgården (Sweref 6717765/531668), dryga 3 km sydväst om stadens centrum. Alla slaggområdena uppvisar uppenbara variationer i utseende och provtagningen har genomförts för att försöka representera detta.





**Figur 10.** Mycket stora volymer hyttslaggar har ansamlats i och kring Falun genom århundraden av gruvbrytning och associerad förhyttning av de brutna kopparmalmerna. Här ett omfattande område med djup slagghvarp i området kring Hyttgårdsparken, väst-sydväst om centrala Falun. Hoppbacken vid Lugnet syns längst till vänster i bakgrunden. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 11.** Slaggernas karaktär och kornstorlek kan variera avsevärt. Här ett block med tydliga flytvalkar, gasblåsor/-hålrum och andra strukturer som vittnar om ursprunget som smälta och dess snabba avkylning. Området kring Stora Stöten, Falun. Foto: Erik Jonsson.

## Provberedning och analyser

Provberedning av insamlat material för bulkgeokemisk analys genomfördes av ALS Scandinavia i Örebro, Piteå, varefter kemiska analyser gjordes i ALS Minerals laboratorium på Irland. Flertalet huvud- och spårelement analyserades med masspektrometri enligt två metoder: metaborat-uppslutning och syrauppslutning (så kallad ”fyra syror” för bas- och ädelmetaller samt kungsvatten för spårämnen). Kol och svavel analyserades med infrarödspektroskopi. Ytterligare information om analysmetoderna finns på ALS hemsida (ALS 2025). Detaljerade kemiska analysdata finns tillgängliga i SGU:s litogeokemiska databas. Merparten av de diagram (kemiska plottar) som presenteras här har framställts med hjälp av programvaran GCDkit (Janousek m.fl. 2006).



Utvalda prover preparerades i form av polerade tunnslip av GeoPreparáty, s.r.o. i Slovakien. Urvalet fokuserade på de prover som uppvisat högst halter av ett urval kritiska metaller samt på att uppnå en viss täckning av uppenbart utseendemässigt skilda typer av slag.

Tunnslipen har i sin tur undersökts och karakteriserats i mera detalj medelst polarisationsmikroskopi (i genom- och påfallande polariserat ljus) och svepelektronmikroskopi med s.k. *back-scatter*-detektor samt energidispersiv mikrokemisk *in situ*-analys (SEM, BSE samt EDS) vid Institutionen för geovetenskaper på Uppsala universitet. Proven bestod av polerade tunnslip som innan analys hade belagts med kol medelst en s.k. *sputter*. SEM-instrumentet som användes för denna studie var av fältemissionstyp, ett Zeiss SUPRA 35VP med en RBSR BSE-detektor och EDS-detektor EDAX modell SDD Apollo X. Accelerationsspänningen var 20kV och arbetsavståndet 8,5mm.

En selektion av prov (delvis överlappande med föregående) valdes också ut för provberedning till pulver och påföljande röntgendiffraktometrisk analys (XRD, efter engelskans *X-Ray Diffraction*) vid SGU:s laboratorium i Uppsala. Röntgenanalyserna utfördes med en Siemens D5000 teta-teta-diffraktometer (Bragg-Brentano-geometri), med kopparstrålning ( $\text{CuK}\alpha$ ) och grafitmonokromator under 40 kV spänning och 40 mA strömstyrka. Diffraktometerråfiler upptogs inom 2-tetaintervall 2–65° på icke-orienterade pulverpreparat. Analyserna har utförts med fast provhållare, 1° divergensspalt, 2 mm ”antiscatter”-spalt samt 0,6 mm mottagarspalt. Behandling av rådata inklusive filtrering och tolkning genomfördes med Siemens/Brukers programvarupaket EVA.

## Resultat

### Riddarhyttanområdet

#### Riddarhyttans kopparverk

Slaggerna från Gamla respektive Nya kopparverket i Riddarhyttan provtogs och analyserades bulkgeokemiskt i form av totalt 12 prov. En mindre delmängd av dem valdes sedan ut för preparering och påföljande mera detaljerade mineralogiska-mineralkemiska undersökningar och analyser baserat inte minst på resultaten från de kemiska bulkanalyserna.

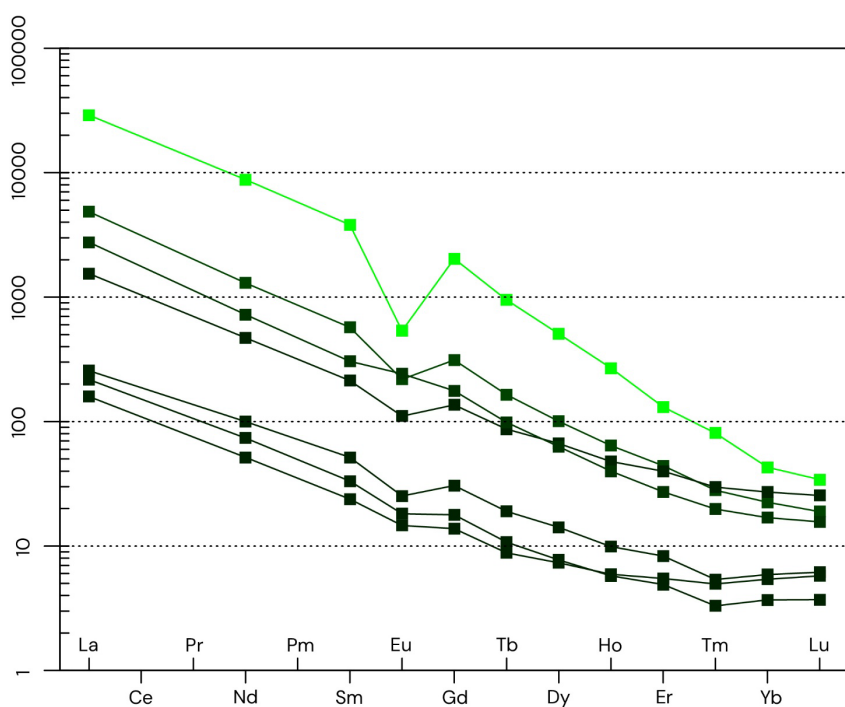
Analyserna visar förhöjda medelhalter av, för Gamla kopparverket (7 prov), framför allt kobolt (medelhalt 1 385 ppm, maxhalt 3 960 ppm Co) och sällsynta jordartsmetaller (REE, efter engelskans *rare earth elements*). Dessa avrapporteras främst som sammanslagna elementhalter i ppm;  $\text{REE}_{\text{tot}}$ , d.v.s. lantaniderna tillsammans med Y; medelhalt >4 500 ppm, maxhalt >23 000 ppm  $\text{REE}_{\text{tot}}$ . Därutöver föreligger signifikanta halter av järn (medelhalt 47 % Fe) och koppar (medelhalt 2 % Cu); det är värt att notera att de verkliga totala REE-halterna i vissa fall torde vara avsevärt högre då halterna av flera enskilda sällsynta jordartsmetaller har passerat den övre gränsen för vad som är maximalt analyserbart med aktuell metodik. Också vismut uppvisar förhöjda halter (medelhalt ca 40 ppm, maxhalt 140 ppm Bi) och en modest förhöjning av indium kan noteras (medelhalt 6,9 ppm, maxhalt dryga 12 ppm In) liksom volfram (medelhalt 101 ppm W). Halterna av ädelmetallerna guld och silver är också förhöjda (Au medelhalt 0,44 ppm, maxhalt 1,65 ppm; Ag medelhalt 7,5 ppm, maxhalt 28 ppm).

I fallet med slaggerna från Nya kopparverket (5 prov) är de i ännu högre grad anrikade på kobolt (medelhalt 3 275 ppm, maxhalt 5 640 ppm Co), utöver järn (medelhalt 47 % Fe) och koppar (medelhalt 2,2 % Cu). Sällsynta jordartsmetaller är mera måttligt förhöjda i dessa prov med en medelhalt på 465 ppm och en maxhalt på dryga 800 ppm  $\text{REE}_{\text{tot}}$ . Silver är något förhöjd (medelhalt 5 ppm Ag), medan vismut, volfram och indium är modest till knappt förhöjda i dessa slagger (medelhalter 3 ppm Bi, 16 ppm W, 2,5 ppm In).

Observationer baserade på optiska och elektronoptiska undersökningar och analyser kombinerat med resultat från röntgendiffraktionsanalys av proven från kopparverksslaggerna vid Riddarhyttan (och fortsättningsvis från de andra lokalerna) presenteras i mera detalj nedan. Det har varit uppenbart svårt att med aktuell metodik säkert identifiera de viktigaste värdfaserna för de kritiska metaller som visat kraftiga förhöjningar i de bulkkemiska analyserna på grund av uppenbart relativt låga halter i de individuella värdfaserna. För en eventuell fortsättning bör man tillämpa med metoder som laserablations-ICP-analys (LA-ICP-MS) och/eller liknande, företrädesvis sådan med möjlighet till kartering ("mapping") av fördelningen av enskilda element (metaller) i mikroskala.

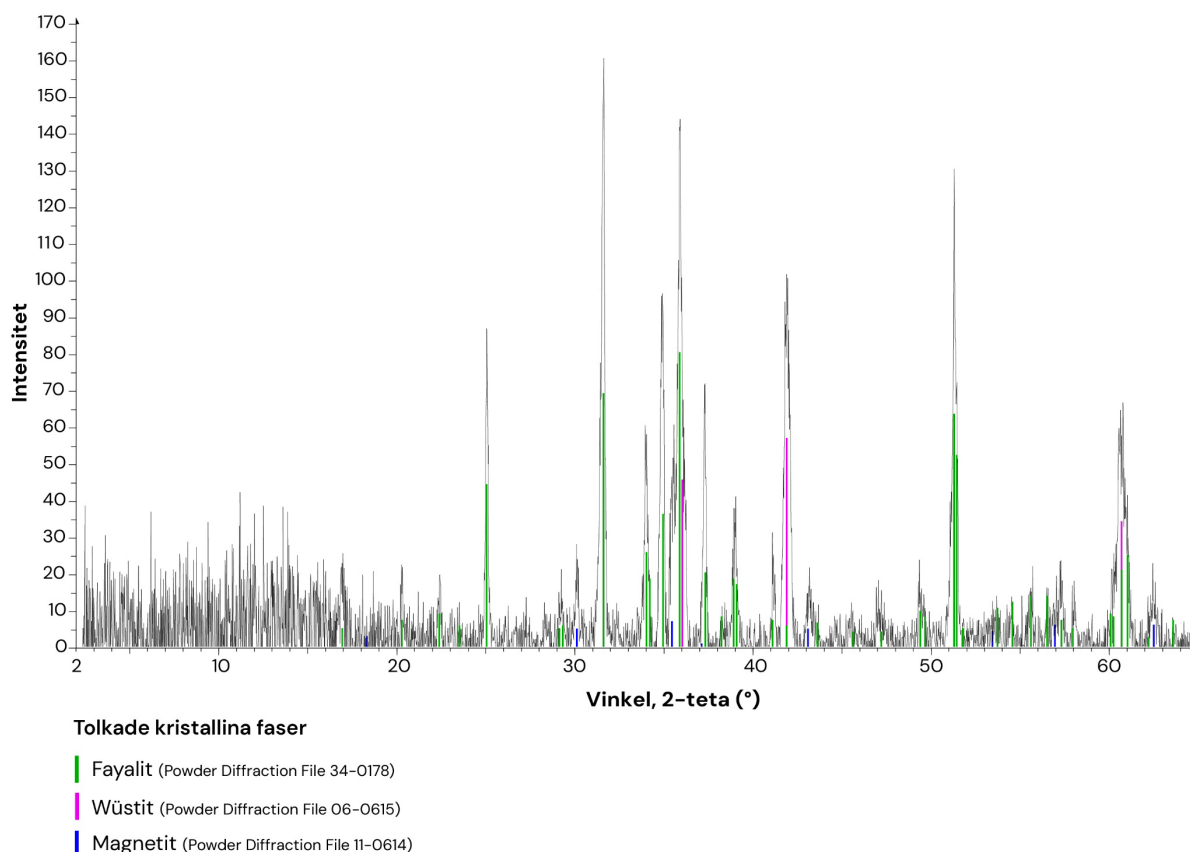
Ett slaggsprov från Gamla kopparverket är specifikt intressant då det uppvisade de högsta REE-halterna av alla analyserade prov i denna studie, över 23 000 ppm REE<sub>tot</sub>, en totalhalt som alltså torde vara avsevärt högre i verkligheten (om inte flera av de individuella sällsynta jordartsmetallerna haft för höga halter för den aktuella analysmetoden och man därför bara får ut en överskriden "minimihalt"). Provet utgörs av ett blandprov med både glasiga och flytstrukturerade och mera tydligt "kristallina" slaggar. Det är alltså det prov som representerar de högsta uppmätta halterna av REE bland de plottade proven från Gamla kopparverket och har också en något brantare profil än övriga från den södra delen av området (figur 12).

Pulverröntgendiffraktionsanalys av en del av provet (figur 13) uppvisar främst karakteristiska toppar för en fas motsvarande fayalit, alltså en ekvivalent till en järndominerad olivin (ideal formel  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), tillsammans med järnoxider motsvarande wüstit (kubisk  $\text{FeO}$ ) och magnetit (kubisk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Närvaron av en wüstitekvivalent fas visar att systemet varit synnerligen reducerat (se t.ex. det klassiska arbetet av Schenck & Dingmann 1927) och ser man till intensitetsproportionerna mellan topparna för de två järnoxiderna torde den senare dominera ordentligt över magnetit i provet. Dessutom torde dessa oxider, i synnerhet wüstitfasen, vara rikligt förekommande i relation till den dominerande silikatfasen (fayalitfasen), vilket också indikeras av relativa intensitetsdata i diffraktogrammet. En relativt kraftig bred intensitetsförhöjning vid låga 2-tetavinklar (ej synlig förutom relik förhöjd brusnivå i figuren, då denna filtrerats) visar på en signifikant andel dåligt till icke-kristallint material, vilket är mer än rimligt.



**Figur 12.** Kondritnormaliserade spindeldiagram för REE i slaggsprov från Gamla Kopparverket, Riddarhyttan. Alla prov utom ett uppvisar svaga till tydliga negativa europiumanomalier och markant tillflackad profil med LREE > HREE. Notera att haltdata för cerium och praseodym saknas i plotten då dessa i flera fall var högre än maxgränsen för analysmetoden. Prometiumhalter uppmäts normalt sett aldrig på grund av dess sällsynthet så därför saknas också halter för den senare i detta och alla övriga diagram av denna typ. Den grönmarkerade REE-profilen är från provet med >23 000 ppm totala REE från den södra delen av slaggsvarparna. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt.





**Figur 13.** Tolkat filtererat diffraktogram (svart kurva) för slaggsprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Tolkade kristallina faser domineras av "fayalit", alltså en fas motsvarande en Fe-rik eller Fe-dominerad olivin, samt järnoxider motsvarande analoger till magnetit och wüstit. Den uppenbara skogen av svaga och otydliga toppar eller intensitetsförhöjningar vid låga 2-tetavinklar (vänstra delen av diffraktogrammet) utgör rester av en massiv förhöjning som filterats bort och som har sitt ursprung i dåligt och icke kristallint material i det analyserade provet.

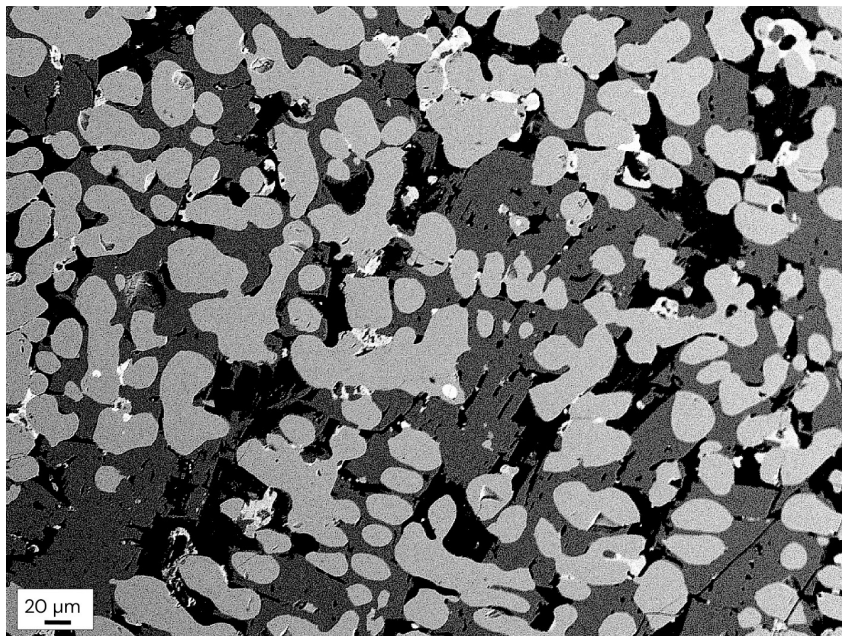
Optiska och elektronoptiska (polarisationsmikroskopi i genom- och påfallande ljus) samt SEM med BSE-detektor och EDS-analys visar att slaggmaterialet är genomgripande rikt på avrundade droppar till mera dendritiska aggregat av en grå, isotrop opakfas. Denna fas motsvarar wüstit-magnetit ( $\text{FeO-Fe}_3\text{O}_4$ ) i en grundmassa av euhedra till subhedra (till närmast anhedra) kristaller av en fayalitartad fas (ideal formel  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) och ett relativt mörkt glas. Sulfider är däremot mest sparsamt förekommande som små anhedra korn och ofta flerfasiga aggregat, interstitiellt till järnoxidfasen (se figurerna 14 och 15). Fayalitfasen innehåller också något kalcium, aluminium och magnesium, utöver nödvändiga järn, kisel och syre. Någon analyspunkt visar också på en mindre halt av mangan. I vissa analyser ses otydliga och svaga elementtoppar som indikerar närvaron av cerium ( $\pm$  andra LREE).

Den rikligt förekommande järnoxiden är svår att passa ihop kemiskt i relation till ovan nämnda faser påvisade med röntgendiffraktion. Den dominerande järnoxidfasen är således enligt EDS-analyserna i princip konstant icke-stökiometrisk i relation till ideala formler för såväl wüstit som magnetit och innehåller förutom järn och syre också sparsamma andelar av Si + Al (under 1 viktsprocent av endera).

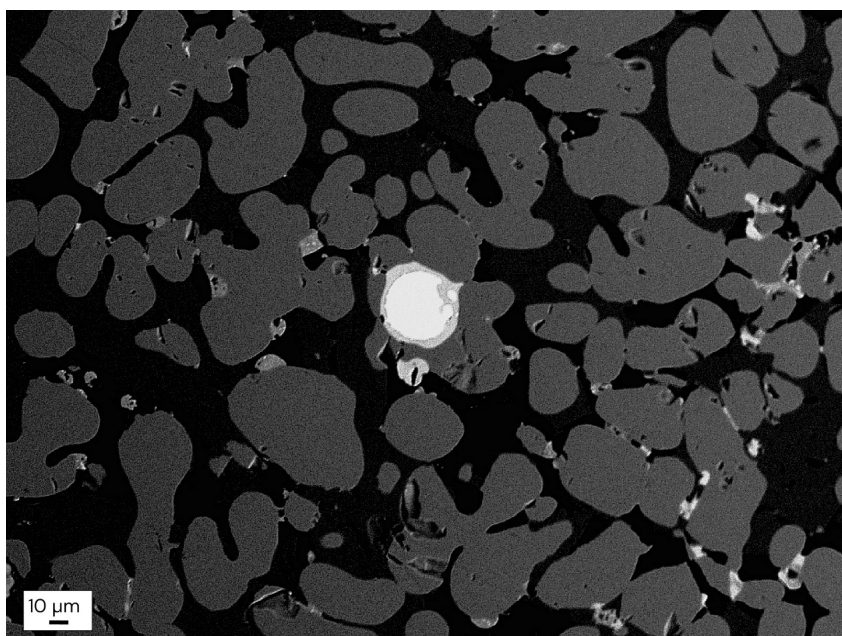
Den vanligaste sulfiden uppvisar optiska egenskaper liknande magnetkis, men utan dess relativt tydliga optiska anisotropi, och motsvarar järnsulfidsammansättningar med Fe:S nära 1:1, med andra ord närmast en troilitliknande fas. Koppar-järn-sulfider förekommer likaså, samt metallisk koppar, ofta med viss halt av järn, ibland också svavel. I något fall har också små inneslutningar av nära rent metalliskt järn också observerats. En spridd Cu-Fe-sulfidfas uppvisar stökiometrier kring ca  $\text{Cu}_3\text{Fe}_2\text{S}_4$  vilket inte motsvarar något känt och vetenskapligt accepterat mineral (men som bland annat erinrar om vissa Cu-Fe-sulfider påvisade från de komplexa Cu-Ni-PGE-malmerna i Talnakhgruvan,

Ryssland; cf. Mindat 2025). I enstaka mera kopparrika Cu-Fe-sulfider har också förekomsten av kobolt påvisats, om än med svaga elementtoppar motsvarande halter omkring några tiondels viktsprocent.

Glasfasen har en komplex sammansättning och innehåller som huvudkomponenter Al, Si, K, Fe och Ca, med mindre andel Na och S, samt indikationer på små mängder av Ce ( $\pm$ LREE) och Cu, varierande mellan analyspunkterna. Järnhalterna i glaset varierar mycket, från ett fåtal/tiotal till över 40 viktsprocent.



**Figur 14.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med s.k. *back-scatter*-detektor (SEM-BSE) av slaggprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Utsnittet domineras av rundade till dendritiska kristaller och kristallaggregat av järnoxidfas(er) vilka är mellangrå i denna BSE-inställning. Den svarta till mörkgrå grundmassan utgörs av mestadels subhedrala kristaller av en fayalitisk fas (mörkgrå) samt glas (svart). Vitt i bilden är sulfider och i mindre utsträckning metallinneslutningar, främst av koppar. Foto: Erik Jonsson.

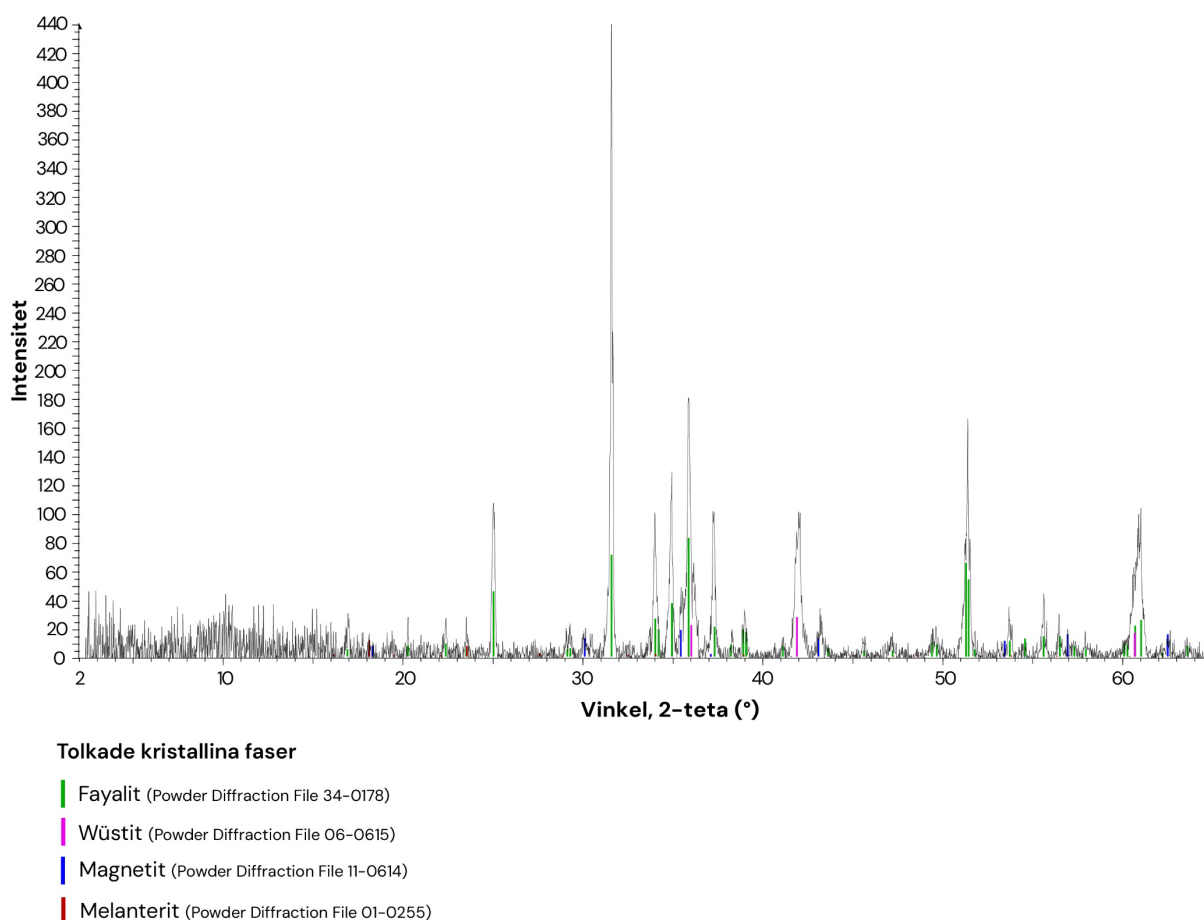


**Figur 15.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med BSE-detektor av slaggprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Järnoxidfaserna (motsvarande wüstit, magnetit) har här justerats ned (jämför med figur 14) till en låg intensitet och kontrast och är här mörkgrå, för att kunna visa zoneringen i en rundad, ljusgrå till vit droppe (ungefär i centrum av bilden). Kärnan (vit) består av metallisk koppar med måttliga halter av järn och svavel, medan bården (ljusgrå) utgörs av en koppar-järnsulfid. Den svarta grundmassan utgörs av glas samt kristaller av en fayalitfas. Notera att en viss förskjutning i gråskalan löper från vänster (mörkare) till höger (ljusare) i bilden, på grund av den aktuella inställningen av svepelektronmikroskopet. Foto: Erik Jonsson.



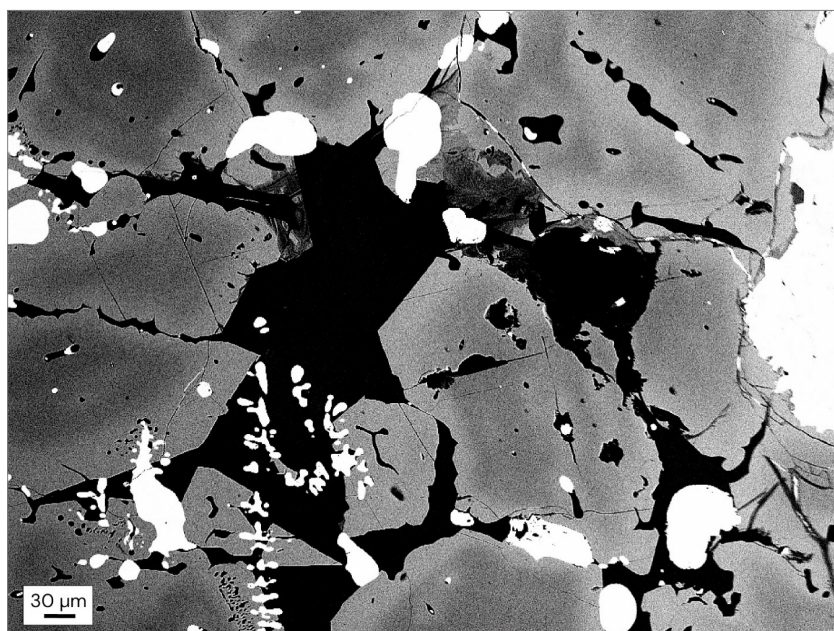
De högsta halterna av kobolt i analyserna av slagger från Gamla kopparverket utgjordes av ett prov som gav knappa 4 000 ppm Co. Röntgendiffraktionsanalys av material från det provet (figur 16) uppvisar liksom det föregående provet karakteristiska toppar för en fas motsvarande fayalitisk olivin tillsammans med järnoxider motsvarande wüstit och magnetit. Närvarande glas syntes endast som en bullformad intensitetsförhöjning innan filtrering (om än mindre uttalad än i föregående prov). Även i detta fall indikeras dominans av wüstiten över magnetiten, men båda med lägre totala intensiteter än fayalitfasen. Här finns också få och relativt svaga (samt delvis överlappande) toppar som kan motsvara en melanteritartad fas. Det senare är alltså en vattenhaltig järnsulfat (ideal formel  $\text{Fe}^{2+}(\text{H}_2\text{O})_6\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), vilket indikerar en sen oxidation under låg temperatur av materialet.

Optiska och elektronoptiska undersökningar bekräftar att slaggen är rik på grövre, oftast euhedrala till subhedrala kristaller av en fayalitisk silikatfas samt innehåller markant rikligt av sulfider tillsammans med silikatfasen. Provet innehåller mindre volymer av järnoxider än föregående prov, samt glas. Det är, baserat på texturella relationer, tämligen entydigt att sulfid- och metallfaser existerat i mindre utsträckning under fayalitfasens kristallisation, medan merparten av dem kristalliserat efter silikaten, men före glasets stelnande (se figur 17, 18). Att detta prov uppvisade de högsta kobolthalterna kan tentativt men högst sannolikt kopplas till dess jämförelsevis stora andel ingående sulfidfaser.

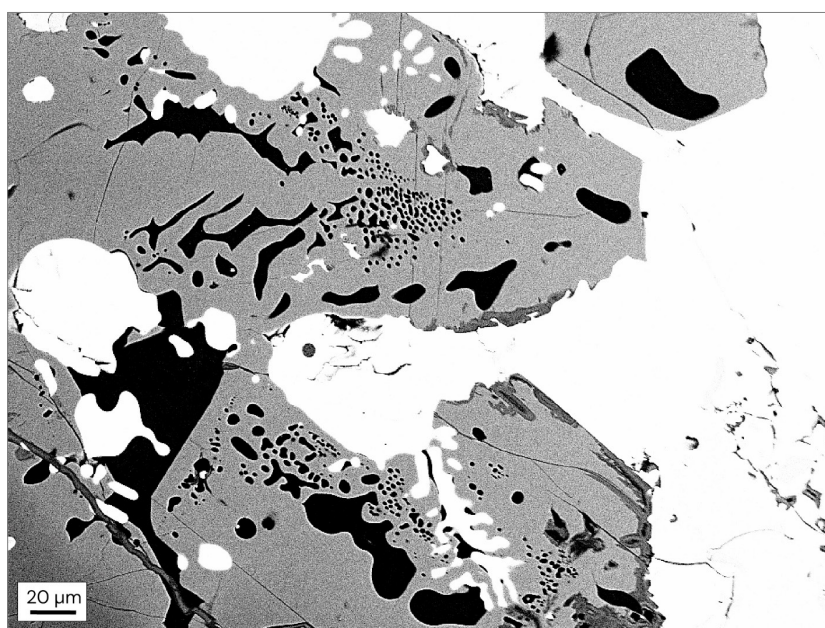


**Figur 16.** Tolkat filtrerat diffraktogram (svart kurva) av slaggsprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Tolkade kristallina faser domineras av "fayalit", alltså en silikatfas motsvarande en Fe-rik olivin, järnoxider motsvarande analoger till magnetit och wüstit, samt en sekundärt bildad fas, sannolikt motsvarande den hydrerade järnsulfaten melanterit.

Fayalitfasen är som noterat relativt grovkristallin och tenderar ofta att uppvisa partiell kristallmorfologi, men också en relativt distinkt kemisk zonering som är uppenbar i BSE-avbildning (figur 17). Zoneringen är till synes baserad på skillnader i framför allt järnhalt, med en inverterad relation vad gäller Mg-halterna, i mindre utsträckning möjligen också Zn-halt. De mörkare kärnorna är alltså betydligt mera järnfattiga och magnesiumrika (motsvarande en större forsteritkomponent i en normal olivin), medan de ljusare ytterzonerna är mera järnrika och därmed fattigare på Mg (motsvarande en större fayalitkomponent i en normal olivin), samt också något högre i Zn och Mn.



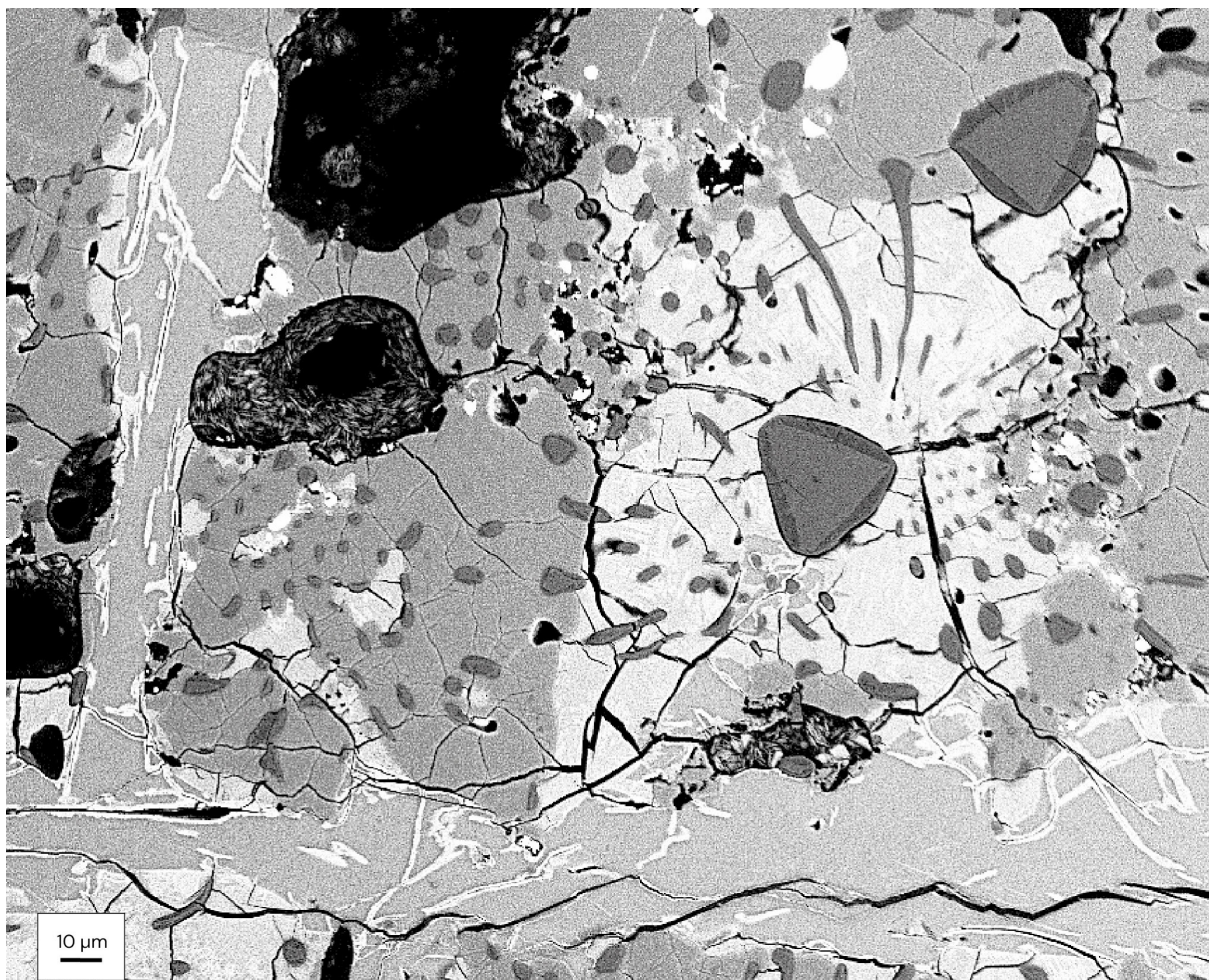
**Figur 17.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med BSE-detektor av slaggsprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Här syns relativt grovkristallina, euhedra till subhedrala zonerade kristaller av fayalitfasen (mellangrå, men varierande p.g.a. kemiska variationer som ger zoneringen; typiskt som mörkare kärnor och ljusare ytterzoner) i en svart grundmassa dominerad av glas. De vita rundade inneslutningarna och dendritiska aggregaten utgörs av sulfider och i mindre utsträckning metalliska faser som koppar. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 18.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med BSE-detektor av slaggsprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Kontrasten justerad för att visa den fayalitartade fasen vilket gör sulfider och metalliska faser vita. De mellangrå grovkristallina kristallerna av den här något Ca-Zn-förande fayalitartade fasen omsluter främst svarta rundade droppliknande till mask- eller linsformade inneslutningar av glas, men också sulfider (vita), vilka åtminstone till dels verkar ha kristalliserat senare än glaset. Sulfiderna utgörs här av, som i det närmast dendritliknande aggregatet något till höger om centrum nederst i bilden, av en järn-zinksulfid, här med  $\text{Zn} > \text{Fe}$  till nära 1:1 med en zinkblände- eller wurtzitstökiometri.



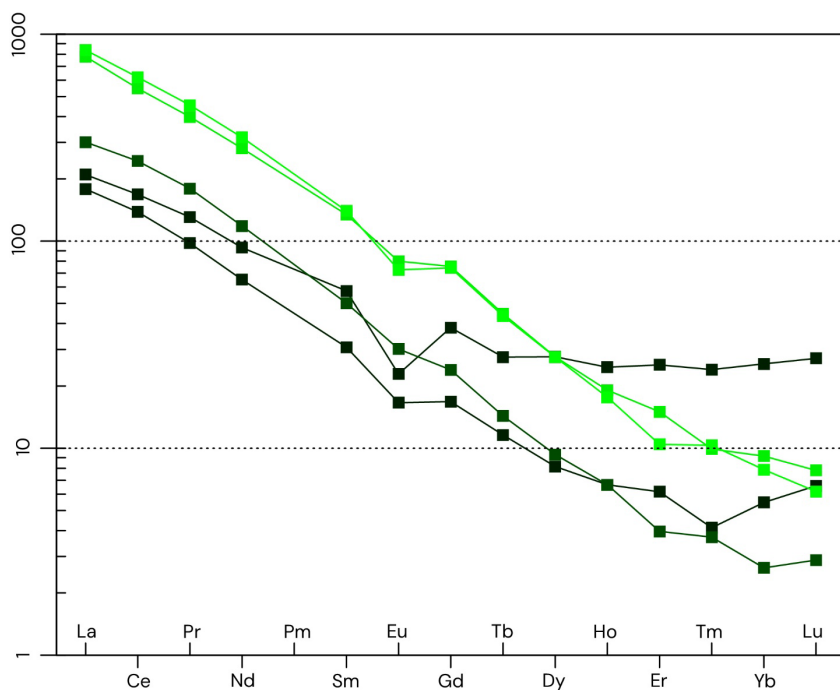
Sulfid- och oxidfaser uppträder delvis i mer eller mindre komplexa sammanväxningar, inklusive så kallade myrmekiter, ofta med maskliknande aggregat av järnoxider i sulfidmatrix (se figur 19). Den typen av texturer är karakteristiska för bland annat mycket snabb avkylning av smältor (se till exempel Stevens m.fl. 2005, samt referenser däri). Sulfiderna omfattar som tidigare Cu-Fe- och Fe-sulfider, men här också Zn-Fe-, Cu-Fe-Zn-sulfider. Det är noterbart att de Zn-Fe-rika sulfiderna ofta uppvisar (Fe+Zn):S nära 1:1, men inte sällan Fe>Zn eller Fe:Zn nära 1:1, till skillnad mot vad man kunde förvänta sig hos en zinkbländeliknande fas. I detta prov har också mindre mängder av en bly sulfid påvisats. Metalliska faser domineras av koppar, ofta som tydliga avblandade droppar. Järnoxiderna är även i detta prov mestadels icke-stökiometriska, men också sådana med Fe:O-förhållanden mycket nära 1:1, alltså liknande wüstit.



**Figur 19.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med BSE-detektor från slaggprov från Gamla kopparverket, Riddarhyttan. Grundmassan består främst av metallsulfider i olika, mer eller mindre komplexa sammanväxningar med andra faser. De tydligt triangulära mörkgrå och zonerade kristallerna utgörs av icke-stökiometriska järnoxider (både triangulära kärnor och något mera rundade, mörkare bårder/ytterzoner) liksom de mörkgrå, maskliknande myrmekiterna. De triangulära ytterzonerna har Fe:O nära 1:1 och är alltså nära wüstitiska sammansättningar. Den ljusa/vita fasen som den nedre av dessa kristaller sitter i är en icke-stökiometrisk eller okänd Cu-Fe-sulfid och uppvisar också än ljusare avblandningar på nära sub-mikroskala (kan endast anas i bilden). Omslutande den senare uppträder en järnsulfid med Fe:S mycket nära 1:1, alltså motsvarande troilit eller mackinawit. Den ljusare mellangrå fasen i bildens nederkant är en järn-zinksulfid med Fe>Zn, sannolikt utan naturlig ekvivalent. Helt svarta områden är mestadels hål i provytan. Foto: Erik Jonsson.

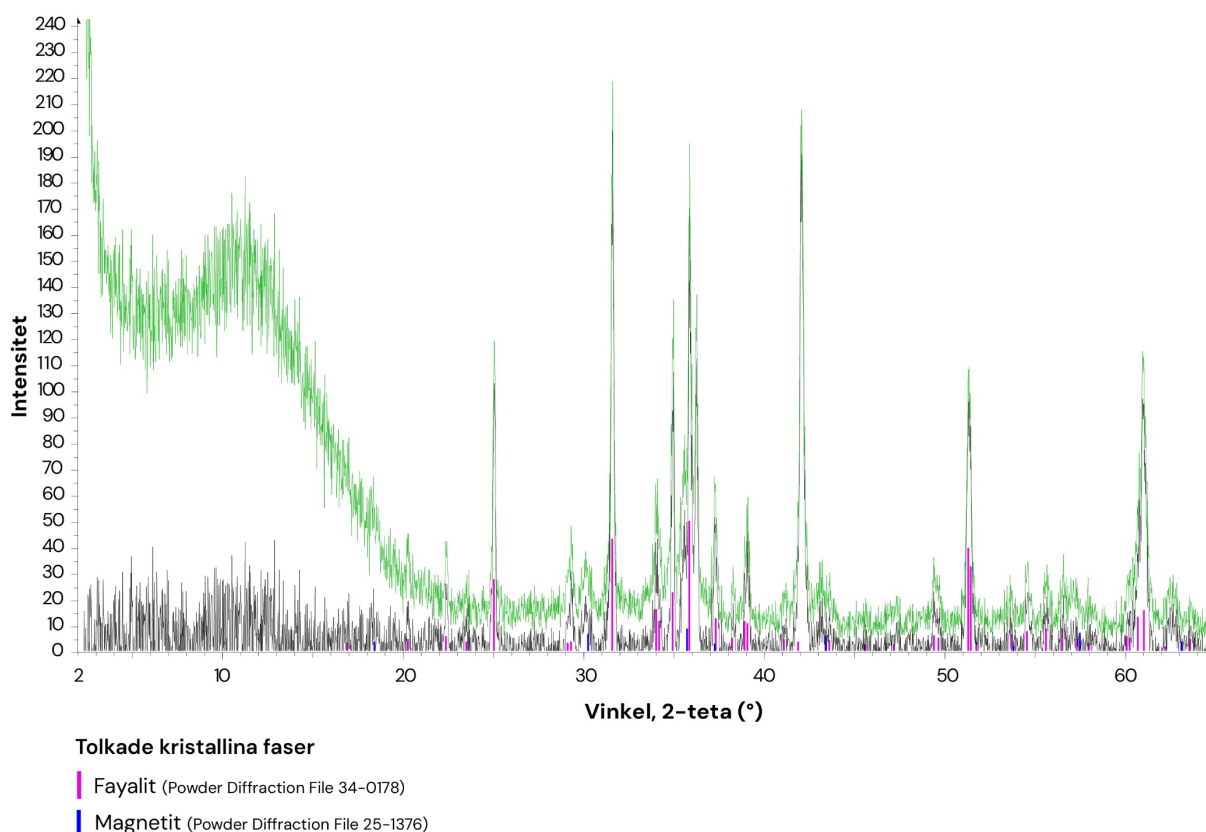
Proven från Nya kopparverket uppvisar markant lägre halter totala REE än de från Gamla kopparverket. De har också lite mera variabel karaktär på fördelningen av individuella REE (figur 20). Ett prov sticker inte minst ut med sina något förhöjda HREE, som tulium, ytterbium och lutetium, vilka är flera gånger högre än i andra analyserade prov. Kobolthalterna är dock alltså än högre i slaggerna från Nya kopparverket.

Ett slaggsprov från Nya kopparverket underkastades röntgendiffraktometrisk analys. I det tolkade, något brusiga diffraktogrammet (figur 21) framgår endast två huvudfaser med tydliga toppar; en fayalitartad fas samt en oxid av spinelltyp motsvarande magnetit. Här ligger också den ofiltrerade rådatakurvan inlagd (i grön färg), vilken visar en omfattande och bred puckel eller intensitetshöjning vid låga 2-tetavinklar (vilken som synes mestadels har filtrerats bort i det tolkade diffraktogrammet; svart kurva), vilket indikerar en större andel glas och dåligt kristallina faser. Mikroskopi av provet visade ett tydligt släktskap med föregående prov med grundmassa dominerad av glas och fayalitisk olivinfas, med metaller främst representerade av järnoxider (magnetitliknande) samt sulfidaggregat och metall droppar.



**Figur 20.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slaggsprov från Nya kopparverket, Riddarhyttan. Alla prov utom ett uppvisar svaga till tydliga negativa europiumanomalier och varierande profiler vad gäller LREE:HREE. De två grönmärkerade analysprofilerna uppvisar markant förhöjda totala REE jämfört med övriga prov från denna hytta, men alla totala REE-halter är mycket lägre än proven från exempelvis Gamla kopparverket. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta total REE-halt i grönt.



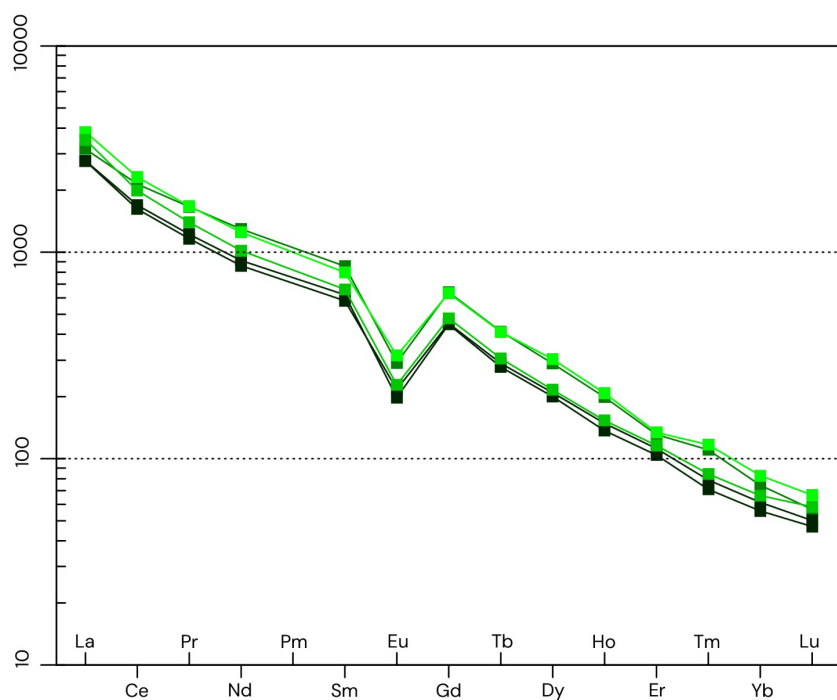


**Figur 21.** Tolkat filtrerat diffraktogram (svart kurva) tillsammans med obehandlad råkurva (grön) för slaggsprov från Nya kopparverket, Riddarhyttan. Tolkade kristallina faser domineras av "fayalit", alltså en fas motsvarande en Fe-rik olivin, samt "magnetit". Notera den breda och höga "amorfpuckeln" vid låga 2-tetavinklar i det gröna, ofiltrerade diffraktogrammet, vilken indikerar en signifikant andel av glas och dåligt kristallina faser.

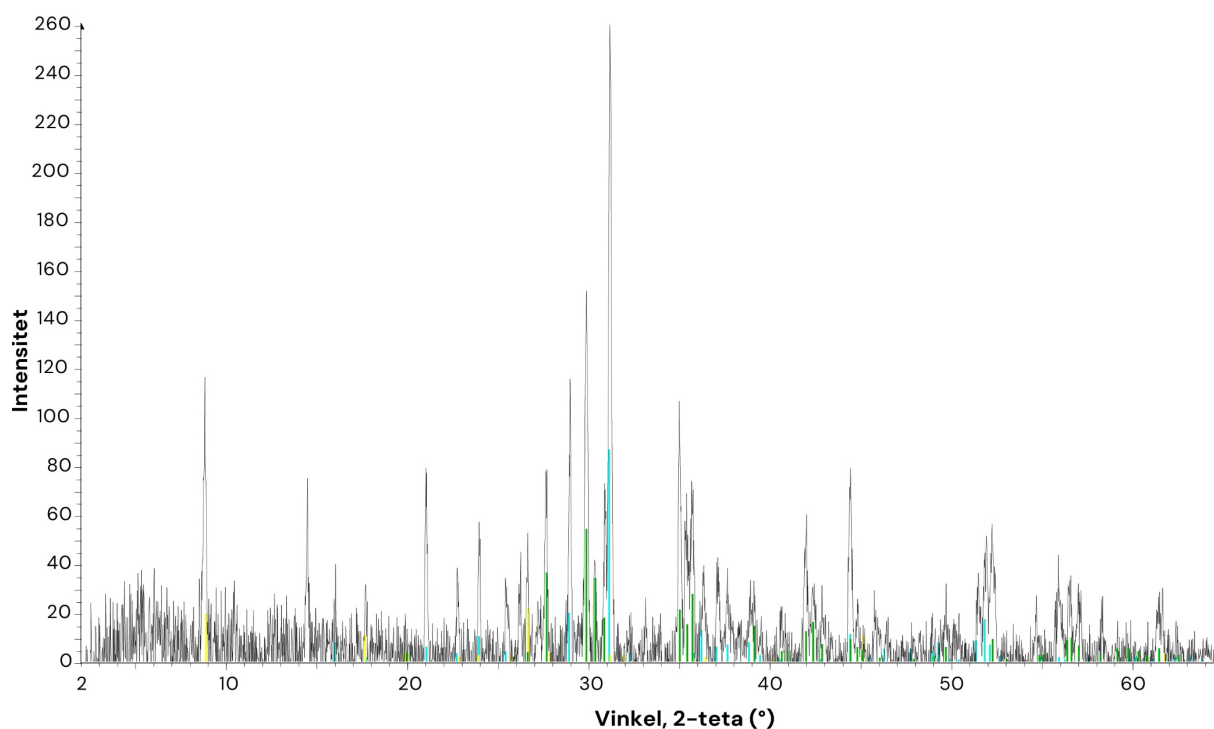
## Lienshyttan

Slaggerna från Lienshyttan provtogs i form av totalt 5 prov, mestadels glasiga, för vilka analyser påvisar kraftigt förhöjda halter av sällsynta jordartsmetaller; medelhalt 3 087 ppm och maxhalt 3 662 ppm REE<sub>tot</sub>, utöver järn (medelhalt 4,7 % Fe). En mindre delmängd av dem valdes ut för preparering och påföljande mera detaljerade mineralogiska-mineralkemiska undersökningar och analyser baserat på resultaten från de kemiska bulkanalyserna. Slaggernas REE-profiler är konsekvent likartade med markerade negativa europiumanomalier och i likhet med flertalet andra prov markant anrikade på LREE i förhållande till HREE (figur 22).

Baserat på kemiska analyser kombinerat med resultat från röntgendiffraktionsanalys kan man konstatera att dessa glasrika slaggar också innehåller silikatfaser, vilka också uppträder som dendritiska till bågformiga kristallaggregat i glasmassan. Den slagg från Lienshyttan som studerats i polerat tunnslip medelst polarisationsmikroskopi uppvisar en ganska homogen karaktär med kristaller av sagda silikatfaser tillsammans med glas och enstaka, spridda små rundade inneslutningar (infångade droppar) av metalliskt järn, alltså rester av den järnsmälta som till sin huvuddel separerades under processen. En pyroxenartad fas tillsammans med en åkermanitartad fas representerar urskiljbara kristallina faser i det tolkade röntgendiffraktogrammet tillsammans med en 10 Å-fas, möjligen en glimmerartad skistsilikat (figur 23). Kalcium-magnesiumsilikatet åkermanit, Ca<sub>2</sub>Mg[Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>], beskrevs ursprungligen från svenska slaggar och döptes efter den svenske metallurgen Anders Richard Åkerman (Vogt 1884; idag hade inte en slaggsfas blivit accepterad som ett nytt mineral, då det är en antropogen produkt; jämför Nickel 1995).



**Figur 22.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slaggsprov från Lienshyttan, Riddarhyttan. Proven, vilka har relativt kraftigt förhöjda totala REE-halter, är dock avsevärt lägre än de högsta halterna i slaggen från Gamla kopparverket. De uppvisar mycket likartade profiler med tydliga negativa europiumanomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondrit-normalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt.



#### Tolkade kristallina faser

- Augit, aluminiumhaltig (Powder Diffraction File 41-1483)
- Åkermanit (Powder Diffraction File 35-0592)
- Illit (Powder Diffraction File 26-0911)

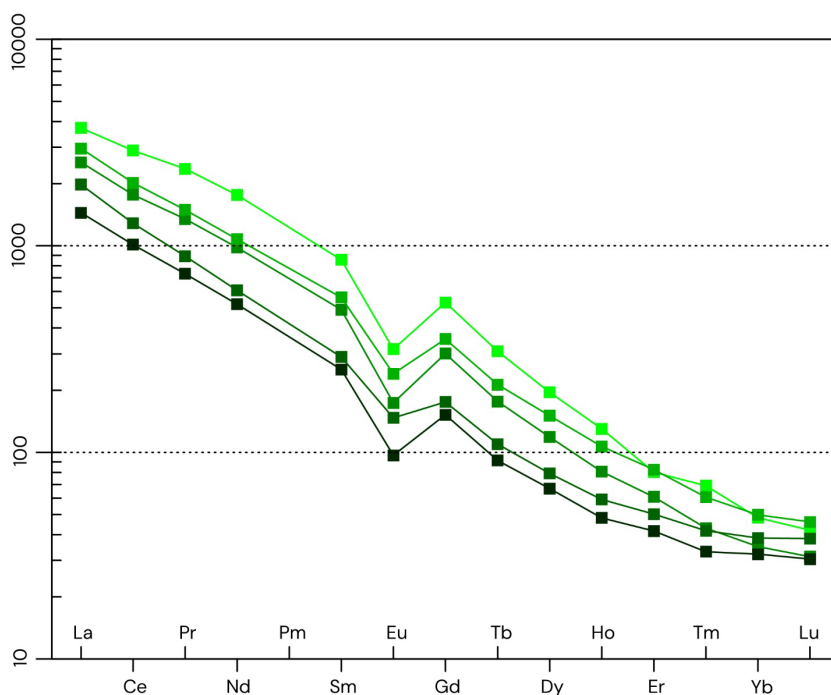
**Figur 23.** Tolkat filtrerat diffraktogram för slaggsprov från Lienshyttan, Riddarhyttan. Tolkade kristallina faser domineras av en pyroxenartad silikatfas ("augit, aluminiumhaltig" i teckenförklaringen) samt en åkermanitlik fas, tillsammans med en förmodad skiktasilikat av 10 Å-typ, utöver en stor andel glas. Bulkemisk analys av detta mixprov av ljus slag visade på en total REE-halt om knappa 2 700 ppm REE.



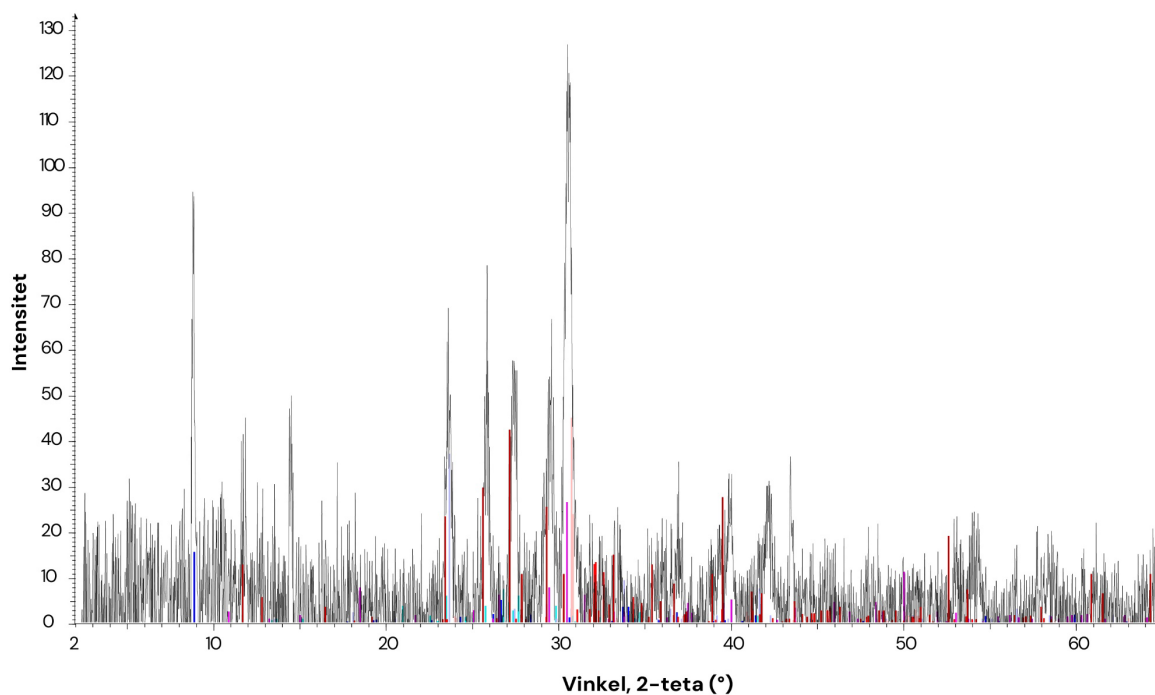
## Skilå övre hytta

Slaggena från Skilå övre hytta provtogs i form av totalt 5 prov, mestadels glasiga, för vilka analyser påvisar kraftigt förhöjda halter av sällsynta jordartsmetaller; medelhalt 2 531 ppm och maxhalt 4 072 ppm REE<sub>tot</sub>. En mindre delmängd valdes sedan ut för preparering och påföljande mera detaljerade mineralogiska-mineralkemiska undersökningar och analyser baserat på resultaten från de kemiska bulkanalyserna. Slaggernas REE-profiler är liksom i fallet med Lienshyttans glasiga järnslaggar konsekvent likartade med markerade negativa europiumanomalier och i likhet med föregående prov markant anrikade på LREE i förhållande till HREE (figur 24).

Slaggena domineras av glasiga material med en del kristallina faser som synes av röntgen-diffraktogrammet (figur 25). Glaset innehåller i sin tur lokala koncentrationer av dendritiska eller fjäderliknande kristaller av främst kalciumsilikatfaser samt sparsamma och små, rundade droppliknande inneslutningar av främst metalliskt järn (figur 26). Den senare fasen innehåller mindre mängder av bland annat kalcium och fosfor. Baserat på EDS-analyser kan aggregaten av kalciumsilikater (figur 27) också innehålla mindre mängder av magnesium, järn och mangan, sannolikt alla substituerande för kalcium. Motsvarande faser torde vara Mg-Mn-Fe-förande så kallad "alit" (idealiskt Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>), larnit (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), wollastonit (CaSiO<sub>3</sub>) samt en i princip singular topp motsvarande det sulfatförande Ca-Al-silikatet yeelimit. Av dessa ligger wollastonitens referenstoppar systematiskt nära eller delvis överlappande med observerade toppar i diffraktogrammet, och en strukturellt wollastonitliknande fas är en rimlig tolkning. Hillebrandit (Ca<sub>2</sub>(SiO<sub>3</sub>)(OH)<sub>2</sub>), det hydrerade kalciumsilikat som också indikerats i XRD-analysen, passar inte in stökiometriskt på kristaller som undersökts med SEM-EDS. Ytterligare en annan kalciumsilikatfas har påvisats, med en stökiometri som närmar sig det sällsynta mineralet nekoit (Ca<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>15</sub> · 7H<sub>2</sub>O). Över lag är de mera finkristallina aggregaten svåra att analysera säkert, då man inte sällan har dålig kontroll över den totala analysvolymen, inklusive eventuella glasandelar som förekommer i och mellan individuella mikro- till nanokristaller. En otydlig indikation om låg halt av LREE/Ce observerades i något enstaka fall hos silikaterna.



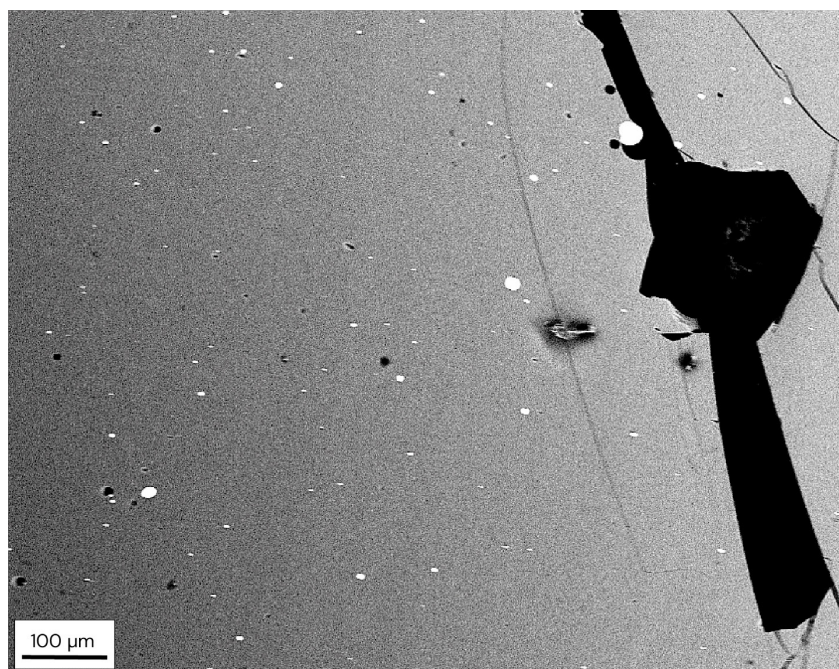
**Figur 24.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slagpprov från Skilå övre hytta, Riddarhyttan. Proven, vilka har relativt kraftigt förhöjda totala REE-halter, är dock avsevärt lägre än de högsta halterna i de föregående beskrivna kopparslaggen från Riddarhyttan. Järnslaggen från Skilå uppvisar mycket likartade profiler med tydliga negativa europiumanomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondrit-normalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i (ljus) grönt.



#### Tolkade kristallina faser

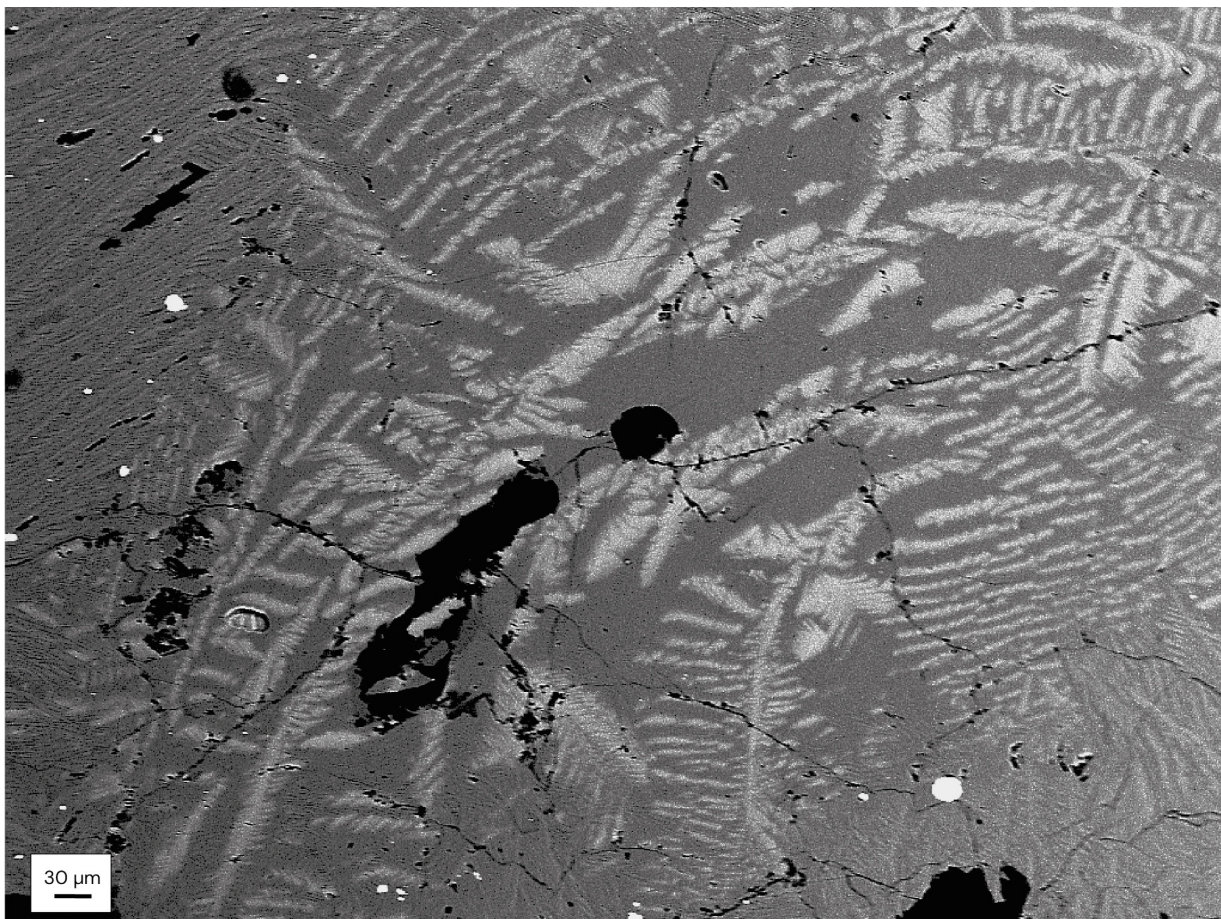
|                                             |                                                |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Dolomit (Powder Diffraction File 34-0517)   | Ankerit (Powder Diffraction File 41-0586)      |
| Sanidin (Powder Diffraction File 10-0353)   | Hillebrandit (Powder Diffraction File 42-0538) |
| Yeelimite (Powder Diffraction File 33-0256) | Larnit (Powder Diffraction File 33-0302)       |
| Biotit (Powder Diffraction File 42-1414)    | Wollastonit (Powder Diffraction File 27-1056)  |

**Figur 25.** Filtrat men brusigt diffraktogram från del av slaggprov från Skilå övre hytta, Riddarhyttan. Tolkade kristallina faser domineras av silikatfaser (nära wollastonit, Ca-Al-silikat; starkaste toppen överensstämmer med kalciumsilikatet hillebrandit; en topp motsvarar starkaste toppen hos yeelimite), alternativt magnesium-(järn)-karbonat motsvarande dolomit/ankerit, överlappande med föregående, samt en fyllsilikatliknande 10 Å-topp (biotit i teckenförklaringen). Notera att provet innehöll en stor andel glas. Inlagda referenstoppar för ett flertal mineral innebär inte att motsvarande faser är säkerställda som förekommande i det analyserade provet.



**Figur 26.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med BSE-detektor av ett glasigt slaggprov från Skilå övre hytta, Riddarhyttan. Här syns små runda inneslutningar av mestadels metalliskt järn i en mörkgrå till grå grundmassa dominerad av glas. Glasets relativt spröda natur och mussliga brott visas tydligt med de sprickor samt plockade hål som syns i högra kanten av bilden. Foto: Erik Jonsson.





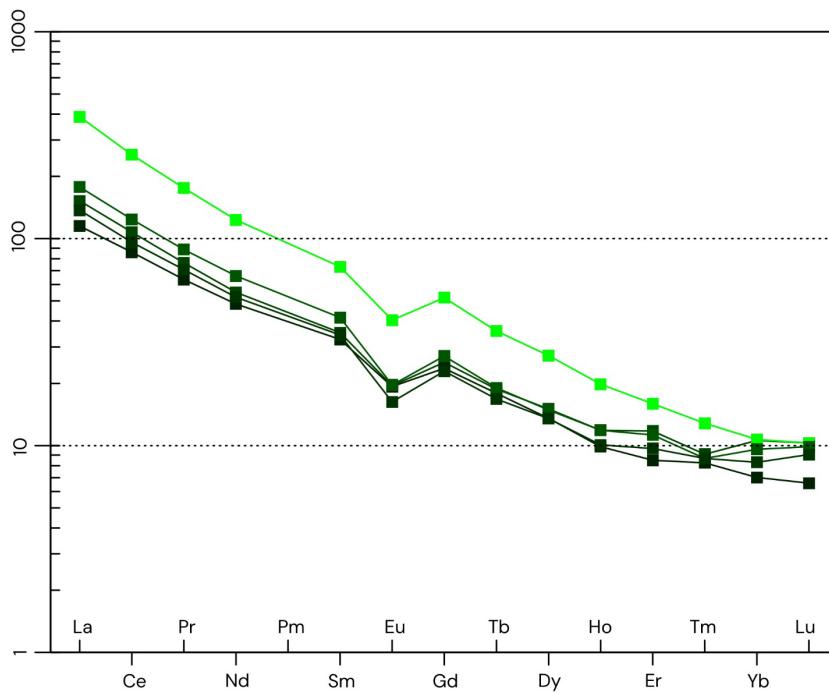
**Figur 27.** Högkontrastbild i svepelektronmikroskop med BSE-detektor av slaggprov från Skilå övre hytta, Riddarhyttan. Dendritiska och delvis mjukt plastiskt deformerade aggregat av kalciumsilikatfas i ljusgrått till nära vitt. Den senare motsvarar sammansättningar av typen alit-larnit. Lokalt syns också små runda, vita inneslutningar av mestadels metalliskt järn. Den mörkgrå till grå grundmassan är dominerad av glas. Svarta partier är huvudsakligen hål. Foto: Erik Jonsson.

## Falun

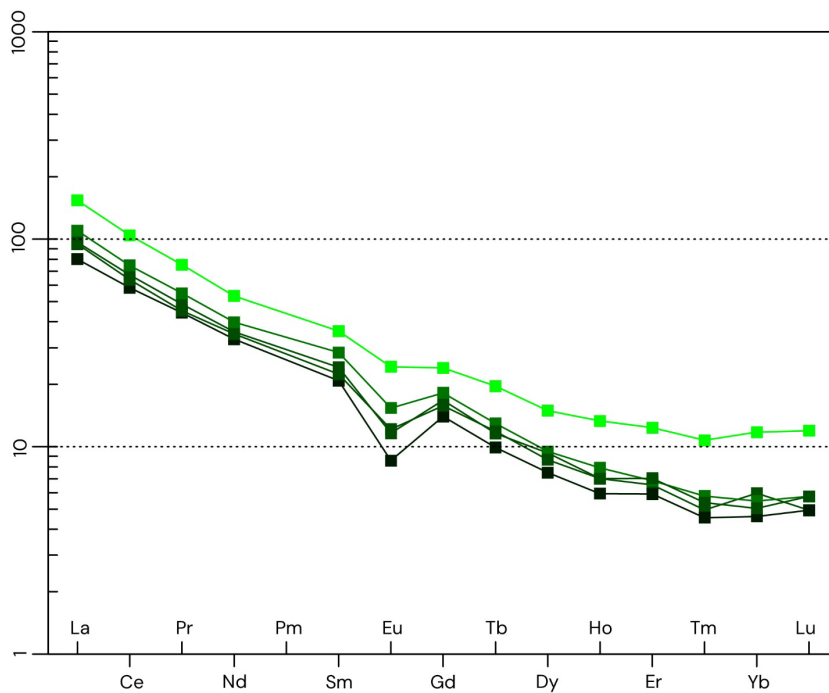
### Falu gruva och de centrala områdena

Totalt 13 prov togs i material från slaggerna i områdena kring Falu gruva med omnejd samt ”centrala Falun”, i området kring Hyttgårdsparken. Dessa slaggområden torde representera den absolut största volymen av hyttslaggar i Falutrakten. Analyser av dessa prov påvisade förhöjda halter av kobolt (medelhalt 88 ppm, maxhalt 226 ppm Co) och volfram (medelhalt 155 ppm, maxhalt 329 ppm W), utöver järn (medelhalt 37 % Fe) och basmetaller som koppar (medelhalt 0,9 % Cu) och zink (medelhalt 1,9 % Zn). Det är i sammanhanget värt att notera att både råkoppar och tidigt tillverkade föremål av Falukoppar i vissa fall också rapporterats ha förhöjda kobolthalter (Forshell 1992).

De sällsynta jordartsmetallerna är endast mycket måttligt förhöjda (medelhalt 145 ppm och maxhalt 378 ppm REE<sub>tot</sub>) med karakteristiska och likartade profiler (se figurerna 28, 29, 30), medan andra kritiska metaller som antimon och vismut endast uppvisar mycket modesta förhöjningar.

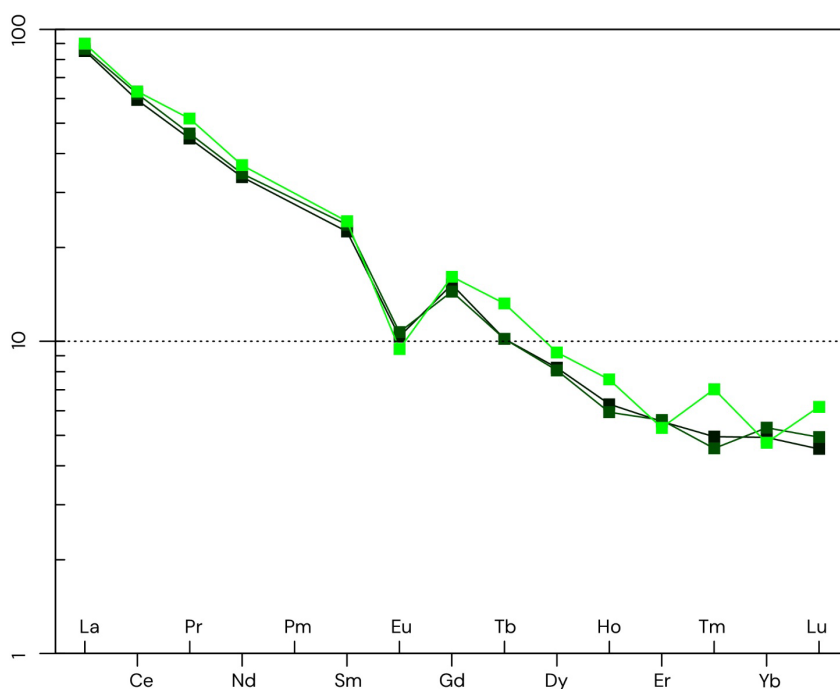


**Figur 28.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slagprov från områdena vid Hyttgårdsparken, Falun. Proven har endast måttligt förhöjda totala REE-halter. De uppvisar tämligen likartade profiler med tydliga negativa europium-anomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt.



**Figur 29.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slagprov från områdena kring Stora Stöten, Falun. Proven har endast svagt förhöjda totala REE-halter. De uppvisar mestadels mycket likartade profiler med tydliga negativa europiumanomalier i fyra av fem prov och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt (och den minst tydliga negativa Eu-anomalin).



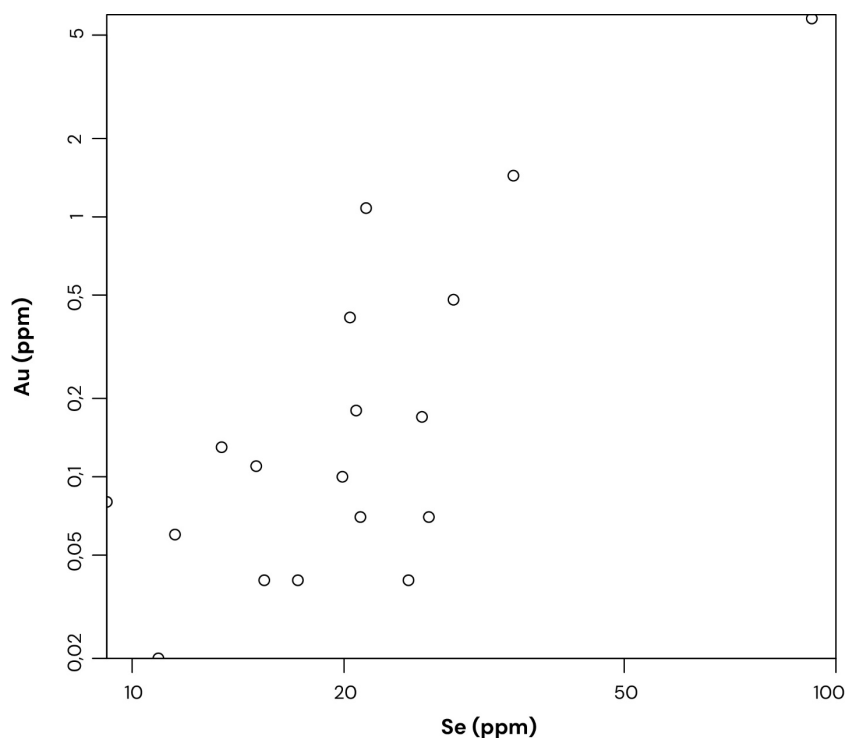


**Figur 30.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slaggprov från Gamla Berget, Falun. Proven, vilka har relativt låga totala REE-halter, uppvisar mycket likartade profiler med tydliga negativa europiumanomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE, men också en viss variabilitet hos de tyngsta HREE (Tm–Lu). Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt.

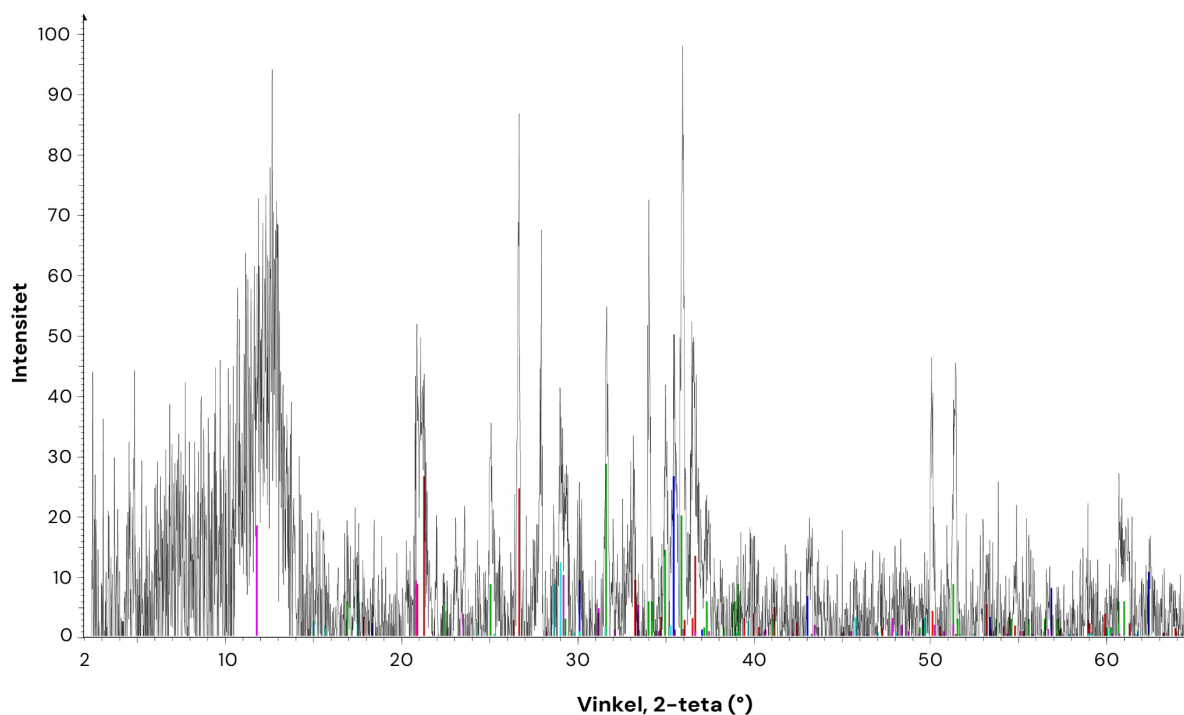
Vad gäller ädelmetaller så visar analyserna på en ganska stor variation i halterna, men över lag föreligger förhöjningar av både silver (medelhalt nära 13 ppm, maxhalt 61 ppm Ag) och guld, med en medelhalt om 0,6 ppm och en maxhalt om 5,8 ppm Au. Flera ytterligare metaller, liksom halvmetallen selen (medelhalt nära 24 ppm Se), visar generella förhöjningar i Faluslaggerna. Just selenhalten är inte oväntad, med tanke på förekomsten av enskilda selenmineral i delar av Falumalmerna samt att den ursprungliga upptäckten av selen gjordes i rostad malm just härifrån (se till exempel Jonsson & Langhof 2018 och referens däri). En modest men noterbar koppling kan ses mellan förhöjda selen- respektive guldhalter i Faluslaggerna (figur 31), vilket möjligen kan länkas åtminstone partiellt till den bekanta kopplingen mellan guld och essentiellt selenförande sulfosalter i åtminstone delar av Falumalmerna (se till exempel Åberg & Fallick 1993, samt referenser däri).

En mindre delmängd av slaggproven valdes ut för preparering och påföljande mera detaljerade mineralogiska-mineralkemiska undersökningar och analyser baserat inte minst på resultaten från de kemiska bulkanalyserna.

Röntgendiffraktometrisk analys av slaggmaterial från området vid Hyttgårdsparken gav ett brusigt diffraktogram, men med relativt tydliga toppar från en fayalitartad fas tillsammans med en spinelltypoxid, rimligen motsvarande magnetit-magnesioferrit, utöver faser indikerande en relativt kraftig vittring av materialet (figur 32). Dominansen av fayalitfas + järnoxid liknar sålunda i mycket observationerna från Riddarhyttans kopparslagger.



**Figur 31.** Diagrammet visar relationerna mellan guld- och selenhalt (båda i ppm) i alla de analyserade slaggerna från Falun. En modest korrelation mellan de två är uppenbar.



#### Tolkade kristallina faser

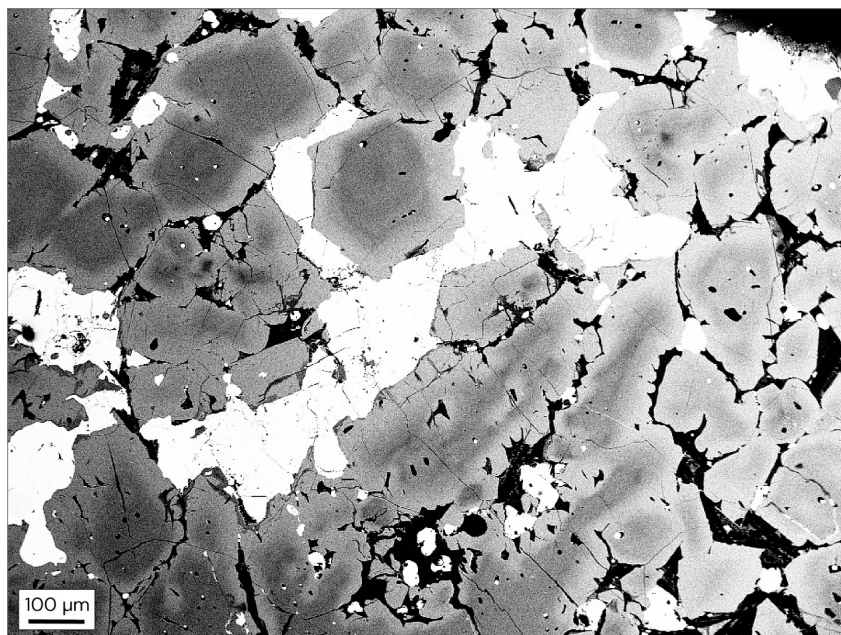
- |                                                                                |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: red;">■</span> Kvarts (Powder Diffraction File 05-0490)    | <span style="color: blue;">■</span> Magnesioferrit (Powder Diffraction File 417-0465) |
| <span style="color: red;">■</span> Goethit (Powder Diffraction File 29-0713)   | <span style="color: magenta;">■</span> Gips (Powder Diffraction File 06-0046)         |
| <span style="color: green;">■</span> Fayalit (Powder Diffraction File 07-0164) | <span style="color: cyan;">■</span> Jarosit (Powder Diffraction File 36-0427)         |

**Figur 32.** Tolkat filtererat röntgendiffraktogram på slaggprov från Hyttgårdsparken, Falun. Rådiffraktogrammet var brusigt men de tolkade kristallina faserna domineras liksom i många andra kopparslagger av en fayalitartad fas samt en oxid av magnetittyp (referenstoppar för Mg-analogen magnesioferrit inlagda i diffraktogrammet). Denna slagg var uppenbart oxiderad, vilket visas av närvaron av toppar som kan tillskrivas faser motsvarande goethit och sannolik jarosit (en hydrerad järnsulfat) och del av de breda, brusiga topparna vid låga 2-tetavinklar kan till dels tolkas representera en gipsliknande fas, alltså en hydrerad kalciumsulfat. Gips är en inte ovanlig vittringsprodukt av sulfider vid låg temperatur.

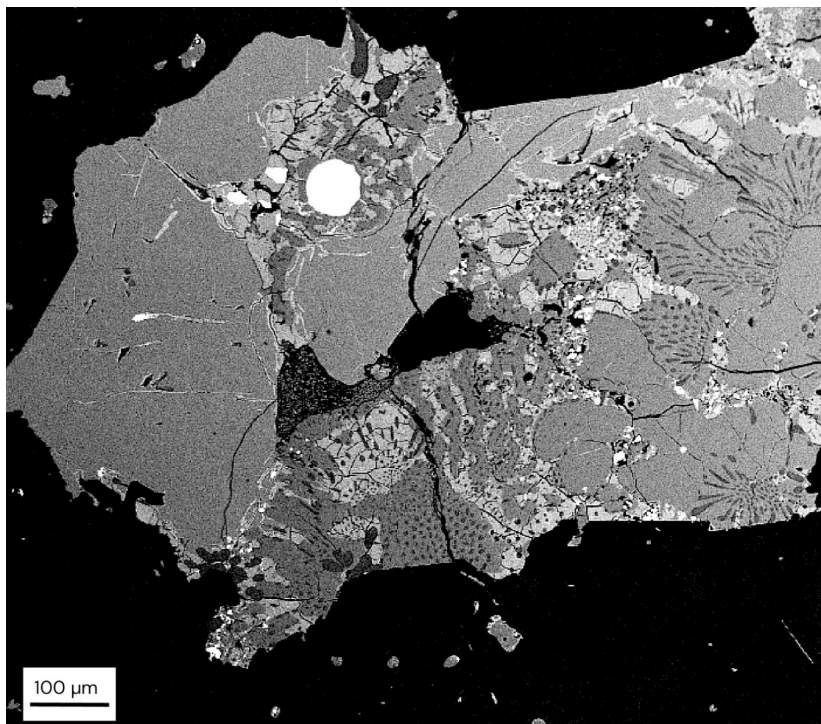


EDS-analyser av det dominerande kristallina grundmassematerialet visade delvis en ganska dålig stökiometri för att vara en fas av fayalittyp, med halter av bland annat zink och magnesium tillsammans med något mangan, utöver de dominerande järn, kisel och syre. Som nämnts ovan så visade dock XRD-analysen att en fayalitartad fas är en av de dominerande kristallina dito i materialet. Denna dominerande silikat utgörs av rikligt förekommande euhedra till sub- eller anhedra kristaller med en tydlig kemisk zonering, synlig i BSE-avbildning (figur 33). Den erinrar över lag mycket om den fayalitiska fas som beskrivits tidigare från kopparhyttorna vid Riddarhyttan. Liksom i tidigare fall så verkar den huvudsakliga kemiska zoneringen bero på förhållandena mellan en Mg-rikare/Fe-fattigare kärna och en Mg-fattig, Fe-rik ytterzon, vilken också innehåller Ca och Mn. Zink förekommer i både kärna och ytterzon.

Denna slaggt är förhållandevis rik på större och mindre inneslutningar/aggregat av sulfider med associerade metalliska faser, ofta med mycket komplexa texturer inklusive olika typer av myrmekiter eller symplektitiska sammanväxningar (se till exempel figur 34). Dessa förekommer både som inneslutningar i glas och fayalitfas, liksom interstitiellt till den senare och domineras oftast av Fe-, Cu-Fe- och Fe-Zn-sulfider, men innehåller också järnoxid(er), magnetit- till wüstitartade. Även bly har påvisats mera sparsamt både i metallisk form, inklusive bly med en signifikant silverhalt (figur 34), och som sulfidfas. Både sulfider och oxider är ofta uppenbart icke-stökiometriska jämfört med kemiskt och optiskt likartade mineral. Järnsulfid med Fe:S nära 1:1 är vanligt förekommande, medan zink-järnsulfider erinrar om zinkblände, men kan ha  $Fe > Zn$  och verkar för övrigt sakna kadmium. Koppar-järnsulfiderna uppvisar typiskt icke-stökiometri i jämförelse med normala Cu-Fe-sulfidmineral. En oxiderad svavelförande blyfas har också påträffats i en textuellt sen position, vilken skulle kunna motsvara något liknande en oren anglesit (idealisk formel  $PbSO_4$ ).



**Figur 33.** Höglupad BSE-avbildning tagen i svepelektronmikroskop med BSE-detektor som visar tydligt zonerade kristaller av (ljusgrå till mörkgrå med euhedral till anhedral form) en fayalitisk silikat, erinrande om de som observerats i proven från Riddarhyttans kopparhyttor. Sulfidaggregat med associerade oxider (alla BSE-vita med denna kontrast för att visa zoneringen i silikaten) fyller ut mellan silikatkristallerna. Notera att en viss förskjutning i gråskalan löper från vänster (mörkare) till höger (ljusare) i bilden, på grund av den aktuella inställningen av svepelektronmikroskopet. Slaggt från Gamla berget, Falun. Foto: Erik Jonsson.



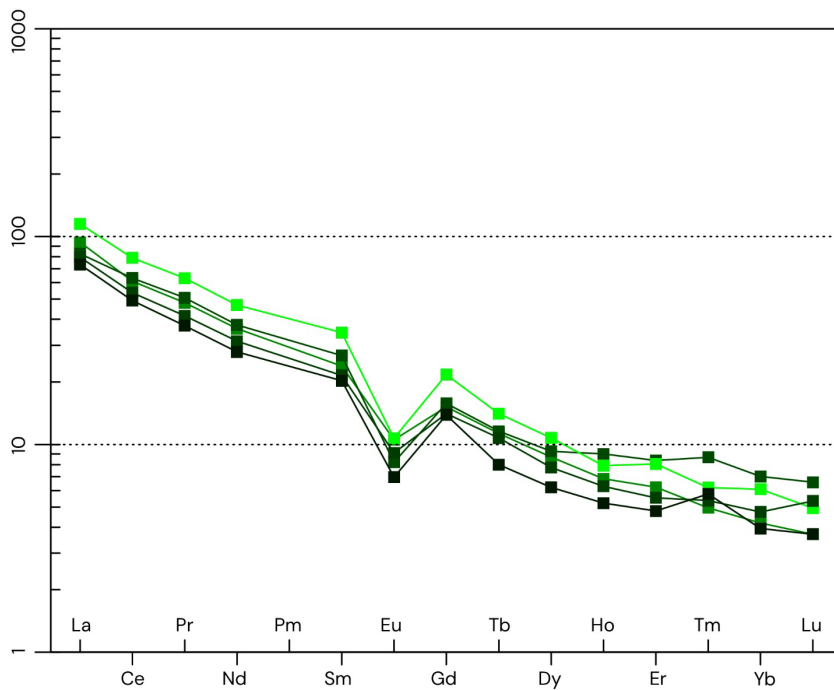
**Figur 34.** Bild tagen i svepelektronmikroskop med BSE-detektor av ett texturellt mycket komplext sulfid-dominerat aggregat (gråtoner) med järnoxider (mörkgrå till nära svarta) i en grundmassa dominerad av silikatkrystaller och glas (svart). I detta fall har intensitet och kontrast minskats ned för att visa de olika metallrika faserna. De rikligt förekommande olikartade myrmekit- eller symplektittexturerna visar att de metallrika faserna kristalliserat mycket snabbt från smälta. De radiella symplektiterna med mörka maskliknande (vermiforma) inneslutningar i en ljusare homogen (medelgrå) grundmassa utgörs av Fe-oxid(er). Den rundade vita droppen i aggregatets övre vänstra del utgörs av silverförande metalliskt bly, medan de mindre kantigare BSE-vita inneslutningar i dess närhet utgörs av en bly sulfid. Dess otydliga bård innehåller en järnsulfid med Fe:S nära 1:1. Slagg från Gamla berget, Falun. Foto: Erik Jonsson.

## Korsgårdensområdet

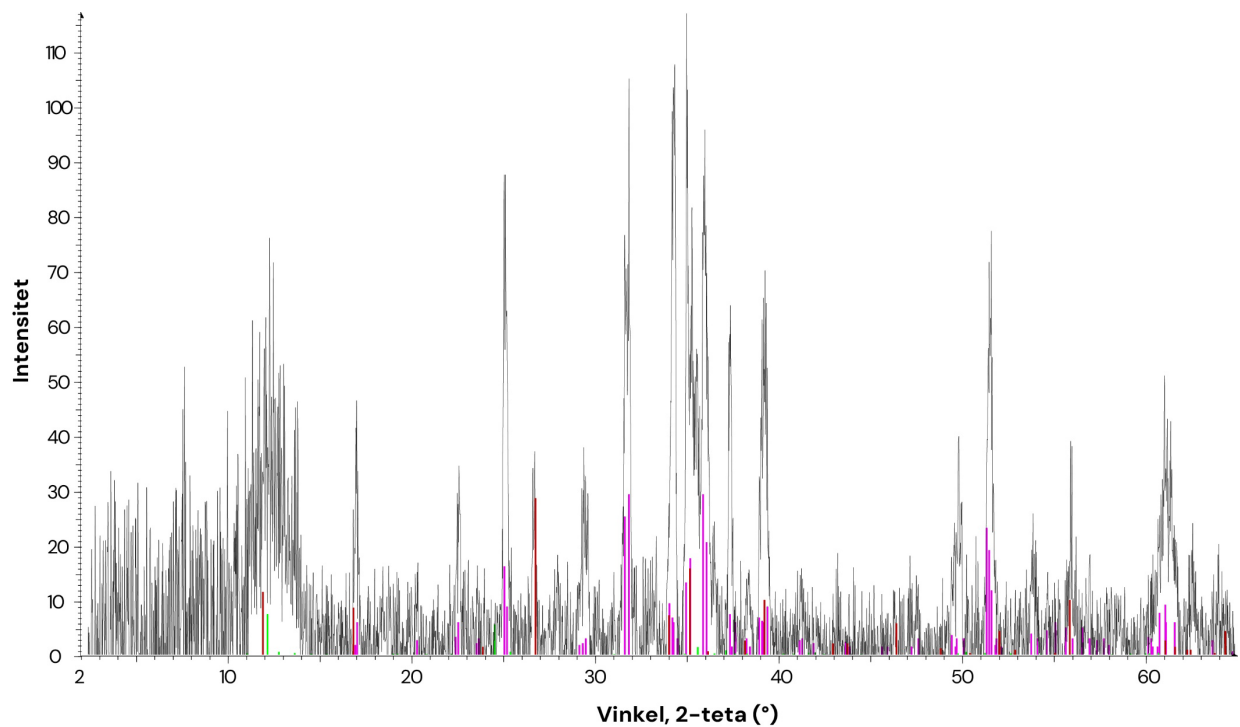
Slaggerna från Korsgårdensområdet provtogs och analyserades i form av fem prov. Analyserna visar något förhöjda medelhalter av kobolt (medelhalt 112 ppm, maxhalt 177 ppm Co), vismut (medelhalt 4,9 ppm, maxhalt 15 ppm Bi) och volfram (medelhalt 137 ppm, maxhalt 238 ppm W), utöver järn (medelhalt 39 % Fe) och basmetaller som koppar (medelhalt 1,4 % Cu) och zink (medelhalt 1,7 % Zn). Även i dessa prov (jämfört med ”centrala Falun”, ovan) varierar ädelmetallhalterna avsevärt, men över lag är de förhöjda för både silver (medelhalt 25 ppm, maxhalt 71 ppm Ag) och guld (medelhalt 0,7 ppm, maxhalt 1,6 ppm Au). Vad gäller REE är slaggerna från Korsgårdensområdet om möjligt ännu mindre anrikade än övriga provtagna slaggförekomster i Falun, men visar samma generella profiler (figur 35).

Röntgendiffraktionsanalys av en mera vittrad (inklusive synliga gröna utfällningar), men ändå relativt uppenbart partiellt kristallin, slagg från Korsgårdensområdet gav ett brusigt diffraktogram med flera osäkert identifierbara toppar och en stor puckel i det låga 2-teta-området (figur 36). En central del av detta (kvarvarande brusig topp vid ca 12 grader 2-teta i det tolkade diffraktogrammet) kan motsvara en fas av akaganeittyp, alltså motsvarande ett mineral som typiskt bildas vid oxidation av järnrika ursprungsmaterial i närvaro av klor. Specifikt bildas denna fas just i miljöer med åtminstone lokalt relativt höga klorhalter och låga pH (se till exempel Ståhl m.fl. 2003). Rimligen kan det sistnämnda kopplas till sura lösningar uppkomna genom ytvittring av sulfidfaser i slaggerna. Flertalet av övriga toppar bör kunna tillskrivas en fayalitartad fas, som i flera andra undersökta slaggar från kopparförhyttning i både Faluområdet och Riddarhyttan. Röntgendiffraktionsanalys av en utseendemässigt sett mera distinkt ”kristallin” slagg från Korsgårdensområdet visade mycket tydligt att den kristallina komponenten också i detta fall var helt dominerad av en fayalitartad fas (figur 37). Optiska undersökningar visade en flora av sulfid- och oxidfaser lik den beskriven från övriga Faluslaggar (ovan).





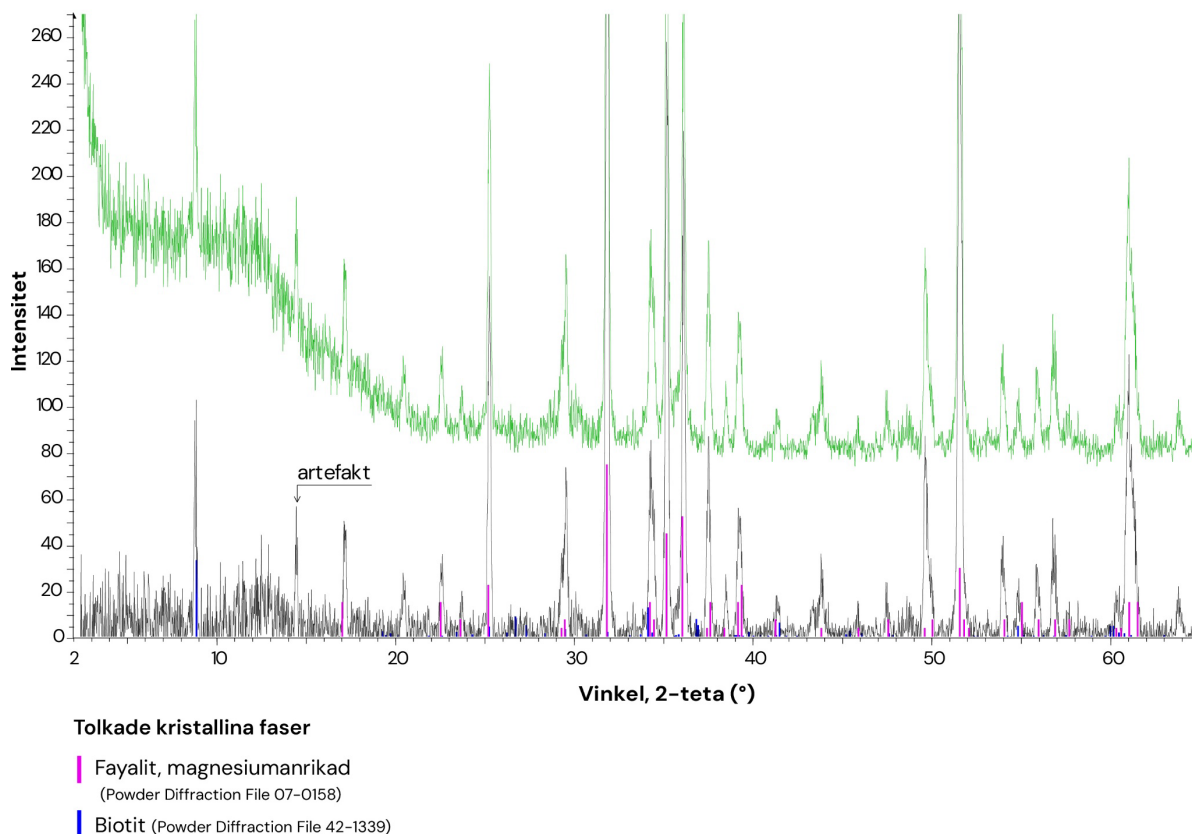
**Figur 35.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i slaggsprov från Korsgården-området, sydväst om Falun. Proven har endast svagt förhöjda totala REE-halter. De uppvisar mycket likartade profiler med tydliga negativa europiumanomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt.



#### Tolkade kristallina faser

- |                                                                                                    |                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: magenta;">█</span> Fayalit (Powder Diffraction File 34-0178)                   | <span style="color: red;">█</span> Akaganeit (Powder Diffraction File 34-1266)   |
| <span style="color: magenta;">█</span> Fayalit, magnesiumanrikad (Powder Diffraction File 31-0633) | <span style="color: green;">█</span> Antigorit (Powder Diffraction File 07-0417) |

**Figur 36.** Tolkat filterat diffraktogram från ett slaggsprov från Korsgårdenområdet, Falun. Rådiffraktogrammet var mycket brusigt men de tolkade kristallina faserna domineras, liksom i många andra kopparslagger, av en fayalitartad fas, här alternativt indikerad som möjligen magnesiumanrikad. En bred, brusig topp vid låga 2-tetavinklar kan till dels tillskrivas en antigoritartad fas (något analogt med mineral ur serpentin-subgruppen), men kan delvis representera en akaganeitartad fas. Den senare är också ganska starkt indikerad genom ytterligare en till synes unik topp.



**Figur 37.** Tolkat filtererat diffraktogram (svart kurva) tillsammans med obehandlad råkurva (grön) för ett slaggprov från Korsgårdensområdet, Falun. De höga brusiga intensitetsförhöjningarna vid låga 2-tetavinklar i råkurvan visar på en stor andel glasig till dåligt kristallint material i provet. Dominansen av en fayalitartad fas bland det kristallina materialet är uppenbar. En måttligt intensiv topp vid 10Å skulle kunna visa på en rest av ett glimmermineral, men detta är osäkert i avsaknad av andra toppar eller alternativa analysmetoder (nu markerad med referensdata för biotit).

## Sammanfattning och diskussion

Inom ramen för det ursprungliga projektet valdes två skilda huvudområden ut för provtagning: Riddarhyttan i västra centrala Bergslagen och Falun i norra Bergslagen. Över lag sammanfaller uppmätta förhöjningar av ett flertal kritiska och strategiska metaller med vad som är karakteristiskt för ett flertal av malmerna, mest specifikt så för de polymetalliska järn- och kopparmineraliseringarna i Riddarhytteområdet (se Jonsson m. fl. 2019, Jonsson 2020, Jonsson & Högdahl 2023, Söderhielm m.fl. 2023, samt referenser däri). Det är viktigt att i alla sammanhang observera att representativiteten för hela slaggvolymer är låg med så pass få analyserade prov per lokal eller delområde. Detta beror på projektets ekonomiska och tidsmässiga ramar liksom dess karaktär av pilotstudie. Det kan dock ändå konstateras att utfallet var lyckat och att flera intressanta förhöjningar, i några fall markant höga halter, av kritiska och strategiska metaller fångats upp.

Undersökningarna av det provtagna materialet visar tydligt att våra historiska hyttslaggar kan ha potential för utvinning av vissa kritiska metaller. I de studerade förekomsterna handlar det främst om kobolt och sällsynta jordartsmetaller, möjligen kombinerat med icke-kritiska högvärdesmetaller (guld, silver) och en strategiskt klassad basmetall som koppar. Kopparslaggerna från Riddarhyttan uppvisade också bland andra vismut, volfram och i mindre utsträckning indium (ej klassad som EU-kritisk i den senaste listan från 2023) i förhöjda koncentrationer, medan Faluslaggerna uppvisade modesta förhöjningar av volfram.



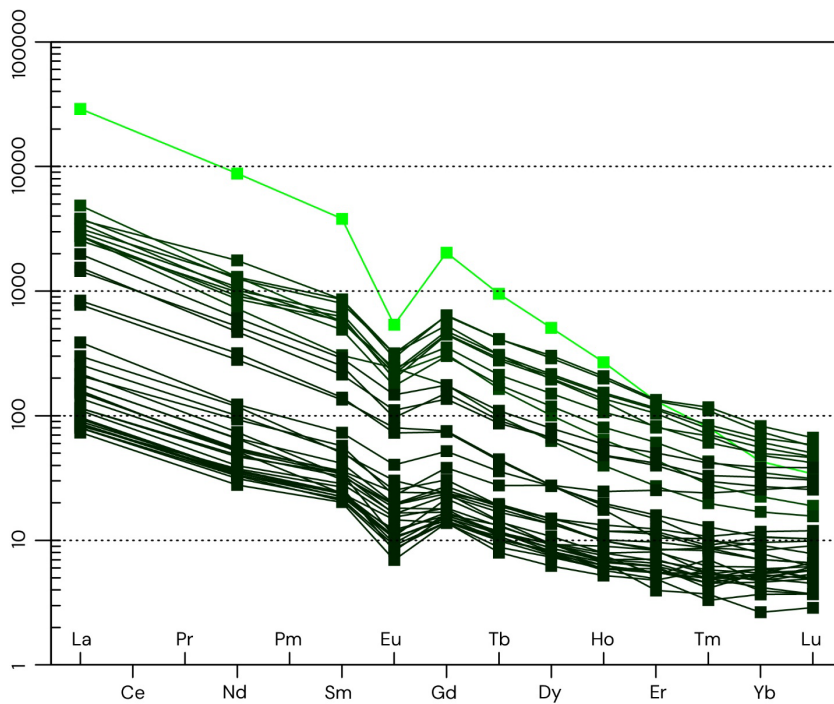
Huruvida utvinning (eller ”återutvinning”) av metaller ur hyttslaggar kan genomföras med någon ekonomisk potential är en helt annan fråga och måste baseras på ett flertal tekniska och ekonomiska parametrar. Av dem är de eventuella totala tillgängliga tonnagen med kända genomsnittshalter som kan behandlas med en rimlig processmetodik kanske mest centralt. Vilka specifika faser som agerar värdar för relevanta metaller och hur de senare är bundna i dem är förstås också nyckelfrågor för en eventuell extraktion av dem. Den relativt komplexa ”mineralogi” som uppvisas i ett flertal av de här undersökta metallrika slaggerna kombinerat med komplexa och finskaliga texturer (exempelvis myrmekitiska sammanväxningar av olika slag) utgör uppenbara utmaningar. Utvinning genom någon form av lakning kan tentativt vara en väg för att möjliggöra realistisk ekonomi i en sådan process, åtminstone för vissa av de aktuella metallerna.

I fallet med sällsynta jordartsmetaller står flertalet undersökta prov från Riddarhyttan ut med förhöjda till mycket kraftigt förhöjda totala REE-halter i jämförelse med övriga analyserade prov (figur 39). Det är också tydligt hur mycket proven från Nya kopparverket skilde sig från det Gamla kopparverket med avseende på REE. De förra uppvisar alltså signifikant lägre halter totala REE och har i någon mån en mera variabel karaktär på fördelningen av individuella REE, vilket avspeglas i deras kondritnormaliserade spindeldiagram. Några lika låga men även mycket höga totala REE-halter föreligger i proven från Gamla kopparverket. Rimligen kan variabiliteten i dessa fall tolkas som antingen (eller både) variabilitet i processerna mellan de olika verken och tidsåldrarna, liksom i vilka malmer som behandlats i hyttorna över tid. Slaggprovet med den högsta uppmätta halten totala REE (>23 000 ppm) kom sålunda från Gamla kopparverket och visade också inte minst förhöjda (eller höga) halter av volfram, kobolt, koppar och järn.

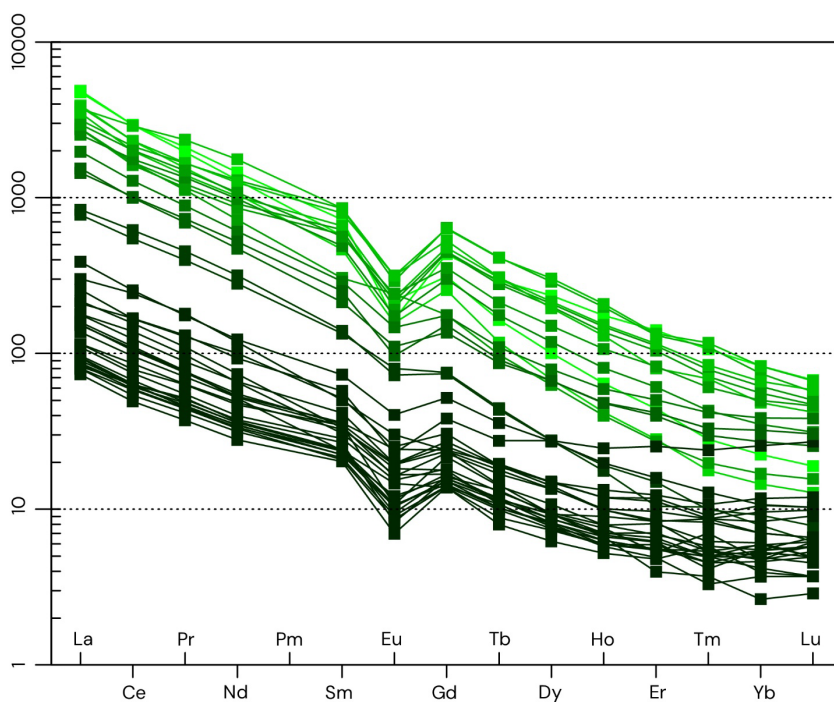
Dominansen av fayalit som kristallin fas i merparten av de mera detaljstuderade slaggerna från kopparförhyttning är intressant i en diskussion kring potentiella värdfaser för REE. I de slaggar som uppvisade högsta totala REE-halter, från Gamla kopparverket i Riddarhyttan (upp till >23 000 ppm REE<sub>tot</sub>; figur 38) är alltså en fayalitartad fas genomgående vanligt förekommande. I flera prov (exempelvis från just Gamla kopparverket) har SEM-EDS-analyser givit indikationer på närvaron av LREE, specifikt La ± Ce i den fayalitiska silikatfasen. Detta överensstämmer med exempelvis Brandt m.fl. (2021), vilka föreslog att just fayalitiska oliviner kunde vara en viktig värdfas för REE i vissa geologiska system. Att slutligt belägga detta kräver dock annan metodik (som diskuteras nedan, se avsnitt *Rekommendationer för fortsatt undersökningar*). Att just de två lättaste lantaniderna indikerats kan vara ett resultat av att de är mest rikligt förekommande av alla REE i de primära mineraliseringarna, snarare än att de anrikats genom någon specifik process.

Järnslaggar som uppvisar förhöjda till relativt höga REE-halter har dock en annan huvudsaklig sammansättning, typiskt med en stor andel glas tillsammans med silikatfas(er) och en mindre andel metalliskt järn. Homogeniteten mellan olika prov från olika hyttor vad gäller REE-fördelningen i de glasiga järnslaggar är markant (figur 38). Över lag uppvisar slaggerna kondritnormaliserade REE-profiler som är närmast identiska med referensdito för ej synligt REE-mineraliserade skarnprov från Nya Bastnäs från Jonsson (2020; figur 39), och därmed REE-linjen i gemen. Detta antyder inte minst att REE endast fraktionerats marginellt, med några undantag, under förhyttningsprocesserna.

Svårigheten att identifiera spårmängder av REE med SEM-EDS i de aktuella faserna gjorde att det inte minst var svårt eller omöjligt att specificera deras förekomst i järnhytteslaggar. Med tanke på dominansen av glas i de sistnämnda är en möjlighet att REE anrikats i den glasiga delen av smältan.



**Figur 38.** Kondritnormaliserat spindeldiagram för REE i alla analyserade slaggprov inom detta projekt. Proven har endast svagt förhöjda totala REE-halter. Flertalet uppvisar tydliga negativa europiumanomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halt i grönt, totalt >23 000 ppm REE, från Gamla kopparverket i Riddarhyttan. Övriga prov från Riddarhytteområdets hyttor ligger med ett par undantag i den övre gruppen, medan Faluslaggerna i sin helhet återfinns i den lägsta gruppen.



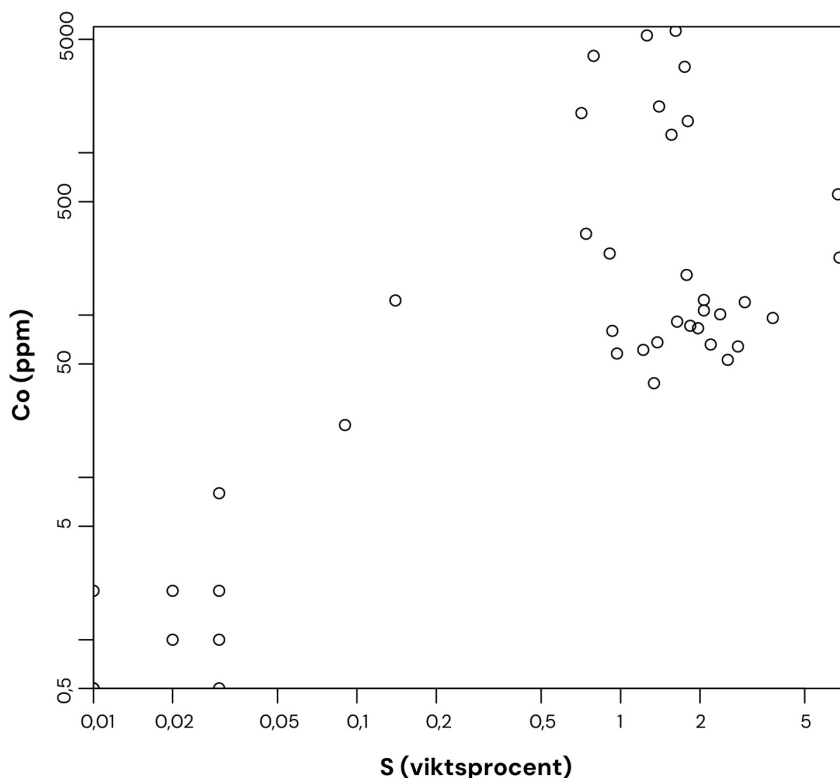
**Figur 39.** Kondritnormaliserade spindeldiagram för REE i alla analyserade slaggprov utom ett inom detta projekt, tillsammans med två analyser av REE-förande skarn från Nya Bastnäsältet (Riddarhyttan; Jonsson 2020). De två senare proven hade ingen makroskopiskt synlig REE-mineralisering och endast relativt måttligt förhöjda totala REE-halter (för att vara därifrån). De två Nya Bastnäs-proven representeras av de två högsta profilerna (i mörkare grönt) och överlappar närmast med varandra och, något lägre, slaggproven från Riddarhyttan. Bastnäsproven börjar med med något högre HREE, men varierar för de lättaste (LREE). Ett slaggprov, det med högst halter av REE, från Gamla kopparverket (se t.ex. figur 38), togs bort för att bättre åskådliggöra likheterna mellan profilerna från slagg och bastnässkarn. Det absoluta flertalet uppvisar mycket likartade REE-profiler med tydliga negativa europiumanomalier och karakteristiskt förhöjda LREE i förhållande till HREE. Kondritnormalisering efter Anders & Grevesse 1989. Färgkodning med högsta REE-halter i slaggprov i ljusare grönt.



Vad gäller kobolt är kopplingen uppenbar till kända kobolthalter i och associerade med kopparmalmerna vid Riddarhyttan och det är också från dessa slagger som de högsta halterna noterats inom detta projekt, upp till dryga 5 600 ppm Co i ett prov från Nya kopparverket. Medelhalten för alla analyserade kopparslagger från Riddarhyttan är knappa 2 200 ppm Co, vilket är i samma storleksordning som koboltmalmer i sedimentära bergarter, och betydligt högre än i exempelvis kobolt-nickellateriter och många magmatiska Cu-Ni-sulfidmalmer (se till exempel Dehaine m.fl. 2021, och referenser däri). Analyser av primära sulfidmalmer och mineraliserade skarn från Riddarhyttan kan uppvisa halter mellan endast fåtaliga ppm och flera viktspocent Co, beroende på karaktären av de individuella proven, men en viss förhöjning är över lag typisk (se t.ex. Jonsson 2020, Jonsson m.fl. 2019, Söderhielm m.fl. 2023).

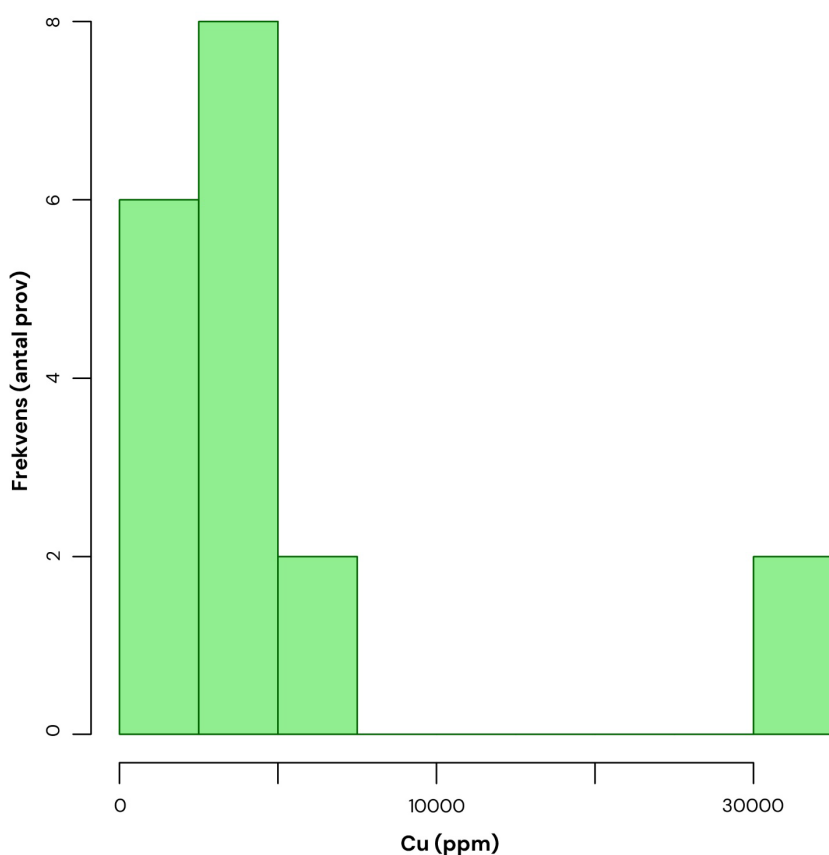
Att även kobolt kan uppträda som substituent i silikater och då inte minst olivinmineral är känt från både naturliga bergarter och slagger (se till exempel Grimsey 1992, Herd m.fl. 2009). Det bedöms dock som relativt osannolikt att denna typ av substitutionsmekanism är särdeles relevant i de här undersökta kopparslaggerna med sin generella rikedom på metall- och sulfidfaser i fallet med ett uttalat kalkofilt grundämne som kobolt. Den torde alltså främst ha anrikats i metall-sulfidsmältan, vilken inte är blandbar med en silikatdito under avtagande temperaturer. Detta syns tydligt inte minst i form av många olika texturer i de undersökta proven. Koboltens preferens för sulfidrika associationer visas över lag ganska tydligt i figur 40, vilken alltså visar relationerna mellan kobolt- och svavelhalter i alla analyserade slaggprov. Den befintliga korrelationen visar tämligen entydigt att kobolt- och svavelhalterna hänger ihop. Bland de höga kobolthalterna (från ca 50 ppm) och svavelhalterna (från omkring 1 viktspocent) tycks två trender eller grupperingar föreligga; dessa utgörs grovt sett (med några undantag) av kluster med 1) lägre kobolthalter och medelhöga till höga svavelhalter och 2) höga till mycket höga kobolthalter och något lägre svavelhalter.

Det förstnämnda klustret utgörs av prov från Falun, medan det andra representerar prov från kopparhyttorna vid Riddarhyttan.

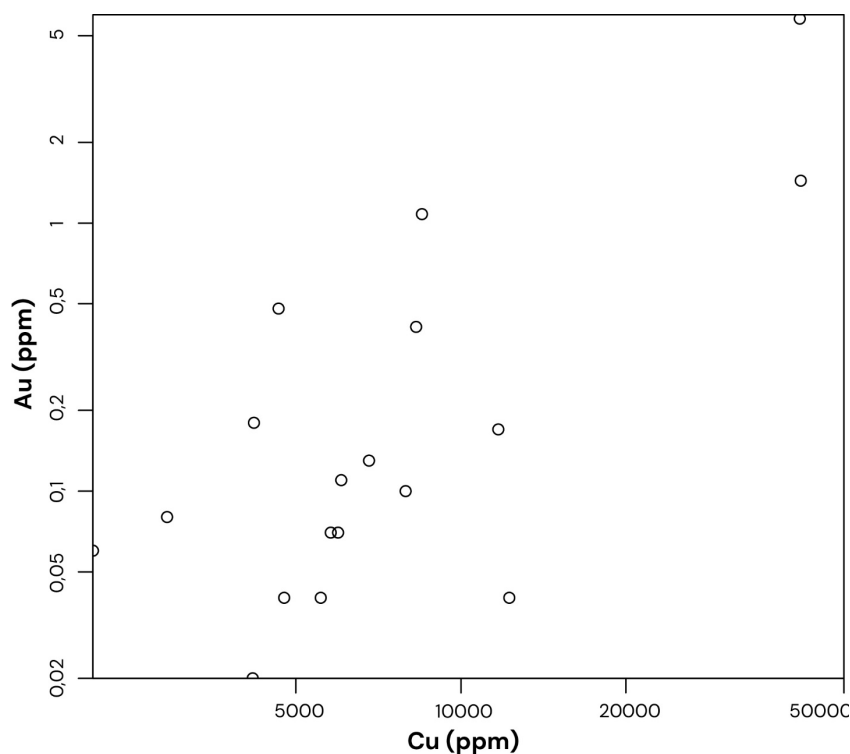


**Figur 40.** Diagram som visar relationerna mellan svavel- och kobolthalter i alla analyserade slaggprov. Svavelhalter i viktspocent på x-axeln och kobolthalter i ppm på y-axeln; båda med logaritmiska skalor. En relativt tydlig korrelation kan ses mellan de två, men med två möjliga trender för de prov som hade de högsta kobolt- och svavelhalterna. Hade proven med lägst Co- och S-halter (främst från järnhyttorna i Riddarhyttan) exkluderats hade den förbättrats något.

Att de äldsta slaggerna (åtminstone medeltida till tiden kring den industriella revolutionen) är mera heterogena till sin natur och innehåller – utöver synliga inneslutningar av exempelvis kol – också varierande men ganska stora mängder av sulfider och metaller som inneslutningar. Det är tydligt i material från bland annat Gamla berget i Falun (figur 2) och verkar även logiskt med tanke på att man använde sig av mera primitiva och ineffektiva processer jämfört med under senare tid. Man kan sålunda konstatera att vad gäller generellt innehåll av exempelvis basmetaller som den strategiskt klassificerade kopparn kan förindustriella till relativt tidigt industriella slaggar vara mest intressanta, förutsatt att volymerna bedöms som tillräckligt stora. Det senare illustreras till viss del av analyserna på Faluslagger med över lag markanta till relativt höga kopparhalter (som mest över 4 viktsprocent; se figur 41). I fallet med ädelmetallhalter, åter exemplifierat med Falun, så noterades också den högsta guldhalten (4,8 ppm) i ett mycket kopparrikt slaggprov av sannolikt hög ålder från just Gamla berget. Förhöjda koppar- och guldhalter verkar dessutom grovt hänga samman, inte minst i Faluslaggerna (figur 42). Vad gäller mera speciella metaller, specifikt kritiska sådana som sällsynta jordartsmetaller, torde den viktigaste informationen gälla de ursprungliga malmernas karaktär – alltså vad vi vet om respektive malmtypers innehåll eller potential för innehåll av specifika grundämnen, baserat på de geologiska processer som bildat dem.



**Figur 41.** Diagram som visar fördelningen av kopparhalter i alla analyserade slaggprov från Falun (kopparhalter i ppm på x-axeln, antal prov på y-axeln).



**Figur 42.** Kopparhalter kontra guldhalter i alla slagprov från Falun (logaritmiska skalor; båda angivna i ppm). Även om korrelationen är måttlig till dålig så är det uppenbart att proven med högre kopparhalter ofta också uppvisar de högre guldhalterna.

## Rekommendationer för fortsatta undersökningar

Den här tillämpade tekniken med svepelektronmikroskopi med energidispersiv mikrokemisk analys (SEM-EDS) har inte haft tillräcklig känslighet för att fullödigt karakterisera värdfaserna för de mest uppenbart intressanta kritiska metallerna, specifikt då kobolt och sällsynta jordartsmetaller. Rimligen bör i flertalet fall med denna typ av prov även våglängdsdispersiv elektronmikrosondanalys (WDS-EPMA) drabbas av samma problematik med för låga halter för att få goda och statistiskt säkrade analytiska resultat. Man bör fortsättningsvis göra undersökningar och analyser av dessa och andra slaggmateriell av liknande typer – efter initial karakterisering medelst optisk och elektronstrålebaserad mikroskopi – med ytterligare känsligare och rumsmässigt högupplösta kemiska *in-situ*-analysmetoder som laserablationsbaserad masspektrometrisk analys (LA-ICP-MS), vilken också kan generera elementkartor över provytan. En hel- eller halvautomatiserad yttäckande kemisk analysmetodik som exempelvis så kallad QEMSCAN (eng. *quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy*) kan vara mycket användbar kombinerat med den föregående metoden. Vill man komma närmare eventuell ”återutvinning” så måste de relevanta metallernas position i specifika faser bestämmas med hög detaljnivå och detta skulle också kräva att betydligt mera fokus också kunde läggas på olika typer av optisk och elektronoptisk mikroskopi, fortsättningsvis kombinerat med pulverröntgendiffraktometri (pXRD), vilken visat sig vara en bra och kraftfull kombinerad metodik för att karakterisera slaggernas huvudfaser. Ett eventuellt komplement med spektroskopiska metoder (Raman, IR) för ytterligare faskarakterisering bör utvärderas, liksom så kallad mikro-XRD samt möjligen enkristallmetoder för röntgendiffraktometri (SXRD). Främst bör annars över lag olika *in situ*-metoder vara prioriterade.

Det är uppenbart att karaktärerna hos såväl smältor och slaggar som råmetaller torde ha varierat avsevärt i de regioner där man utvecklade och ändrade processer och hantering över tid (se till exempel Falun; Lindroth 1955, Forshell 1992), något som också observerats i denna studie och partiellt beskrivits ovan. I vissa områden torde också skiften mellan olika producerande gruvor ha gjort att det totala metallinnehållet och karaktären av såväl produkter som slaggar kan ha varierat. Den begränsade provtagningen inom varje delområde i denna studie gav inte möjlighet till att systematiskt



karaktisera eventuella sådana variationer. Variationer över tid kan både återfinnas lateralt inom större områden med hyttslaggar, men förstås också vertikalt. Därför bör eventuella framtida och mera detaljerade studier täcka in sådan möjlig variabilitet över tid av slagggproduktion inom varje delområde (inklusive grävning och/eller bormning för att karaktisera variation i djupled). Planeringen av mera detaljerad provtagning bör föregås av inhämtande av befintlig dokumentation av historisk utveckling av använda processer och relaterad historisk hantering, liksom vilka gruvor/malmtyper som levererat till aktuella hyttor över tid. På grund av begränsningar inom denna studie i hur mycket provmaterial från respektive typ som kunde undersökas med vilka metoder kunde inte heller eventuell variation inom proven bestämmas. Det sistnämnda torde huvudsakligen dock endast vara ett större problem med mycket heterogena äldre typer av slaggar.

## Referenser

- ALS, 2025: *Geochemistry*. <<https://www.alsglobal.com/en/geochemistry/>> Senast åtkommen den 20 november 2025.
- Anders, E. & Grevesse, N., 1989: Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 197–214.
- Andersson, U. B. (red.), 2004: The Bastnäs-type REE mineralisations in north-western Bergslagen, Sweden. Sveriges geologiska undersökning, *Rapporter & Meddelanden* 119, 34 s.
- Blengini, G. A., Latunussa, C. E. L., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F. & Pennington, D., 2020: *Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report*. European Commission, 152 s.
- Boliden, 2025: *Järnsand*. <[https://www.boliden.com/sv/produkter/vara\\_produkter/biprodukter/jarnsand](https://www.boliden.com/sv/produkter/vara_produkter/biprodukter/jarnsand)> Senast åtkommen den 4 december 2025.
- Brandt, G., 1735 [tryckt 1739]: Dissertatio de semi-metallis. *Acta Literaria et Scientiarum Sveciae* 4, 1–10.
- Brandt, G., 1760: Tal om färg-cobolter, hållit för Kongl. Vet. Acad. vid Praesidii nedläggande den 30 Jul. 1760. Lars Salvius, Stockholm. 24 s.
- Brandt, S., Fassbender, M. L., Klemd, R., Macauley, C., Felfer, P. & Haase, K. M., 2021: Cumulate olivine: a novel host for heavy rare earth element mineralization. *Geology* 49, 457–462.
- Carlborg, H., 1923: Historik. I: Geijer, P. & Carlborg, H., Riddarhytte malmfält i Skinnskattebergs socken, Västmanlands län. *Kungliga Kommerskollegium, Beskrivningar över mineralfyndigheter N:r 1*, 139–212.
- Dehaine, Q., Tijsseling, L. T., Glass, H. J., Törmänen, T. & Butcher, A. R., 2021: Geometallurgy of cobalt ores: a review. *Minerals Engineering* 160, 106656, 1–28.
- Eriksson, J. A. & Qvarfort, U. 1996: Age determination of the Falu copper mine by <sup>14</sup>C-datings and palynology. *GFF* 118, 43–47.
- Ettler, V., Mihaljević, M., Drahot, P., Kríbek, B., Nyambe, I., Vaněk, A., Penížek, V., Sracek, O. & Natherová, V. 2022: Cobalt-bearing copper slags from Luanshya (Zambian Copperbelt): mineralogy, geochemistry and potential recovery of critical metals. *Journal of Geochemical Exploration* 237, 106987, 1–11.
- Forshell, H. 1992: The inception of copper mining in Falun. Relation between element composition in copper artifacts, mining and manufacturing technology and historic development with particular emphasis on copper from the Falu mine. PhD Thesis. *Theses and Papers in Archaeology B:2*, Institute of Archaeology, Stockholm University. 189 s.

- Grimsey, E. J., 1992: The solubility of cobalt in fayalite slags and factors affecting cobalt recovery. Results of research carried out as MERIWA Project No. M102. *Minerals and Energy Research Institute of Western Australia, Report No. 92*. 115 s.
- Grohol, M., Veeh, C., Blagoeva, D., Bourdon, E. & Walch, A. 2023: *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report*. European Commission, 155 s.
- Herd, C. D. K., Dwarzski, R. E. & Shearer, C. K., 2009: The behavior of Co and Ni in olivine in planetary basalts: an experimental investigation. *American Mineralogist* 94, 244–255.
- Horn, S., Gunn, A. G., Petavratzi, E., Shaw, R. A., Eilu, P., Törmänen, T., Bjerkgård, T., Sandstad, J. S., Jonsson, E., Kountourelis, S. & Wall, F., 2020: Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries. *Ore Geology Reviews* 130 (3), 1–25.
- Janousek, V., Farrow, C. M. & Erban, V., 2006: Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* 47, 1255–1259.
- Jernkontoret, 2025: *Slagg, en mycket användbar restprodukt*.  
<<https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/restprodukter/slagg/>> Senast åtkommen den 4 december 2025.
- Jonsson, E., 2020: REE-linjen i Bergslagen – sammanfattning av provtagning och analyser. *SGU-rapport 2020:17*. Sveriges geologiska undersökning, 37 s.
- Jonsson, E., 2024: Critical metals in historical smelter slags from Bergslagen, Sweden: examples from the Riddarhyttan district. 36<sup>th</sup> Nordic Geological Winter Meeting, Gothenburg, Sweden.
- Jonsson, E. & Högdahl, K., 2023: Cobalt enrichment in some ores of the Bergslagen province, south central Sweden. *GFF* 145, 1–7.
- Jonsson, E. & Langhof, J., 2018: Upptäckten av halvmetallen selen fyller 200 år. *Geologiskt forum* 100 (2018), 24–27.
- Jonsson, E., Nysten, P., Bergman, T., Sadeghi, M., Söderhielm, J. & Claeson, D., 2019: REE mineralisations in Sweden. I: M. Sadeghi (red.): Rare earth elements distribution, mineralisation and exploration potential in Sweden. Sveriges geologiska undersökning, *Rapporter & Meddelanden* 146, 20–111.
- Jonsson, E., Lewerentz, A. & Persson, L., 2023: Undersökning, provtagning och karaktärisering av historiska gruvavfall. Kapitel 3 i: Rapportering av regeringsuppdrag – Hållbar utvinning och återvinning av metaller och mineral från sekundära resurser. SGU RR 2023:1. Sveriges geologiska undersökning, 17–35.
- Lewerentz, A., Camitz, J., Casey, P., Claeson, D., Hamberg, R., Jonsson, E., Larsson, D., Persson, S., Rauséus, G., Reginiussen, H., Söderhielm, J. & Wiberg, B. 2023: Critical metal occurrences in historic mining waste in Sweden. SEG 2023: *Resourcing the green transition*, London.
- Lindroth, S. 1955: *Gruvbrytning och kopparhantering vid Stora Kopparberget intill 1800-talets början. Del II. Kopparhanteringen*. Skrifter utgivna av Stora Kopparbergs Bergslags Aktiebolag, Almqvist & Wiksells Boktryckeri AB, Uppsala. 454 s.
- Lottermoser, B. G., 2011: Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements* 7, 405–410.
- Mindat, 2025: *Search Minerals By Chemistry*. <<https://www.mindat.org/chemsearch.php/>> Senast åtkommen den 10 oktober 2025.
- Nickel, E. H., 1995: The definition of a mineral. *Canadian Mineralogist* 33, 689–690.
- Parsons, M. B., Bird, D. K., Einaudi, M. T. & Alpers, C. N., 2001: Geochemical and mineralogical controls on trace element release from the Penn Mine base-metal slag dump, California. *Applied Geochemistry* 16, 1567–1593.

- Schenck, R. & Dingmann, T. 1927: Gleichgewichtsuntersuchungen über die Reduktions-, Oxydations- und Kohlungsvorgänge beim Eisen. III. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie* 166, 113–154.
- Skyllberg, E., 1997: Skinnskattebergs bergslag. *Atlas över Sveriges bergslag*, Jernkontorets bergshistoriska rapport H 105, 194 s.
- Ståhl, K., Nielsen, K., Jiang, J., Lebech, B., Hanson, J. C., Norby, P. & van Lanschot, J., 2003: On the akaganéite crystal structure, phase transformations and possible role in post-excavational corrosion of iron artifacts. *Corrosion Science* 45, 2563–2575.
- Söderhielm, J., Larsson, D., Bergman, T., Hellström, F., Nysten, C., Jonsson, E., Hildebrand, L. & Berggren, R., 2023: Malmer, industriella mineral och bergarter i Skinnskattebergs kommun, Västmanlands län. SGU *Rapporter och meddelanden* 153, 263 s. + bilagor.
- Stevens, G., Prinz, S. & Rozendaal, A., 2005: Partial melting of the assemblage sphalerite + galena + pyrrhotite + chalcopryrite + sulfur: implications for high-grade metamorphosed massive sulfide deposits. *Economic Geology* 100, 781–786.
- Tegengren, F. R., 1924: Sveriges ädlare malmer och bergverk. *Sveriges geologiska undersökning Ca* 17, 406 s.
- Vogt, J. H. L., 1884: Studier over slagger. *Kungliga Vetenskapsakademien Handlingar*, Bihang, 9, 1. 302 s.
- Åberg, A. & Fallick, A. E., 1993: A fluid inclusion and light element stable isotope study of the gold-bearing quartz vein system, Falun, Sweden. *Mineralium Deposita* 28, 324–333.