

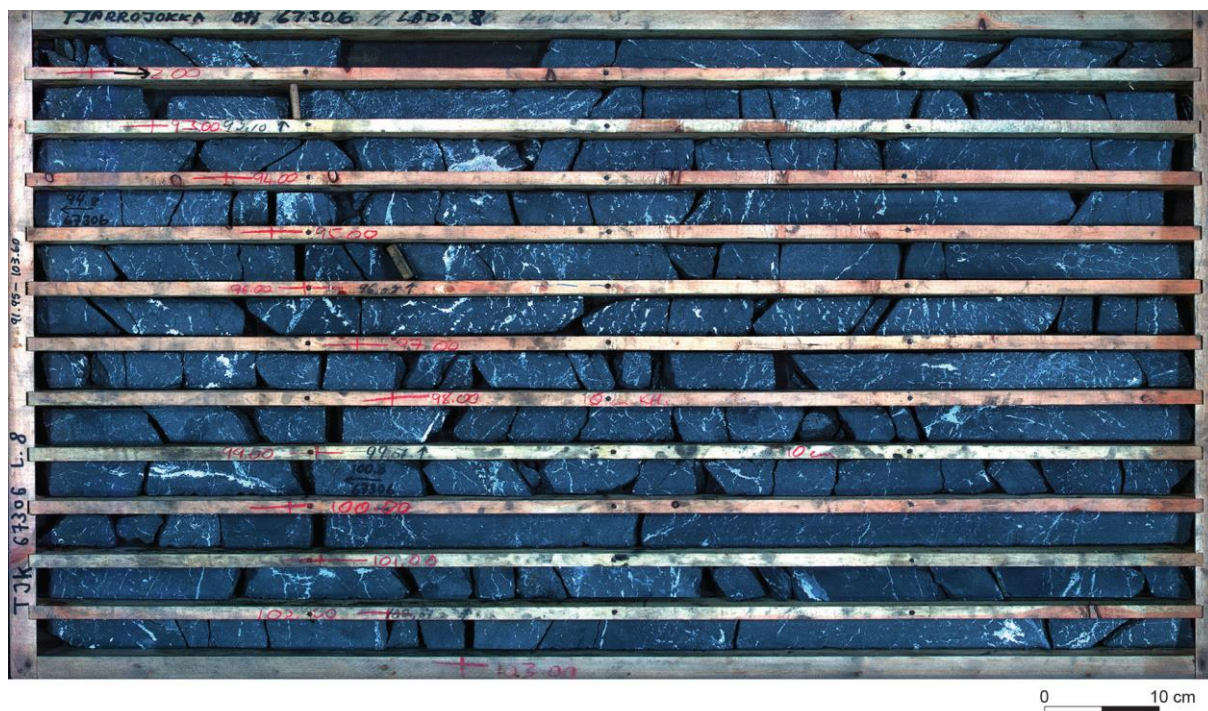
Metodutveckling, Ekonomisk geologi (2016–2017)

4D-modellering av Tjärrojåkkas Fe-Cu-Au-fyndighet

Edward Lynch, Stefan Luth & Robert Berggren

april 2020

SGU-rapport 2020:11



Omslagsbild: Borrkärnor från Tjärrojåkkas järnoxid-apatitfyndighet
med massiv järnmineralisering.
Foto: SGUs borrkärneskanningprojekt.

Författare: Edward Lynch, Stefan Luth & Robert Berggren
Granskad av: Författarna har läst varandras avsnitt
Ansvarig enhetschef: Nikolaos Arvanitidis

Redaktör: Lina Rönnåsen

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

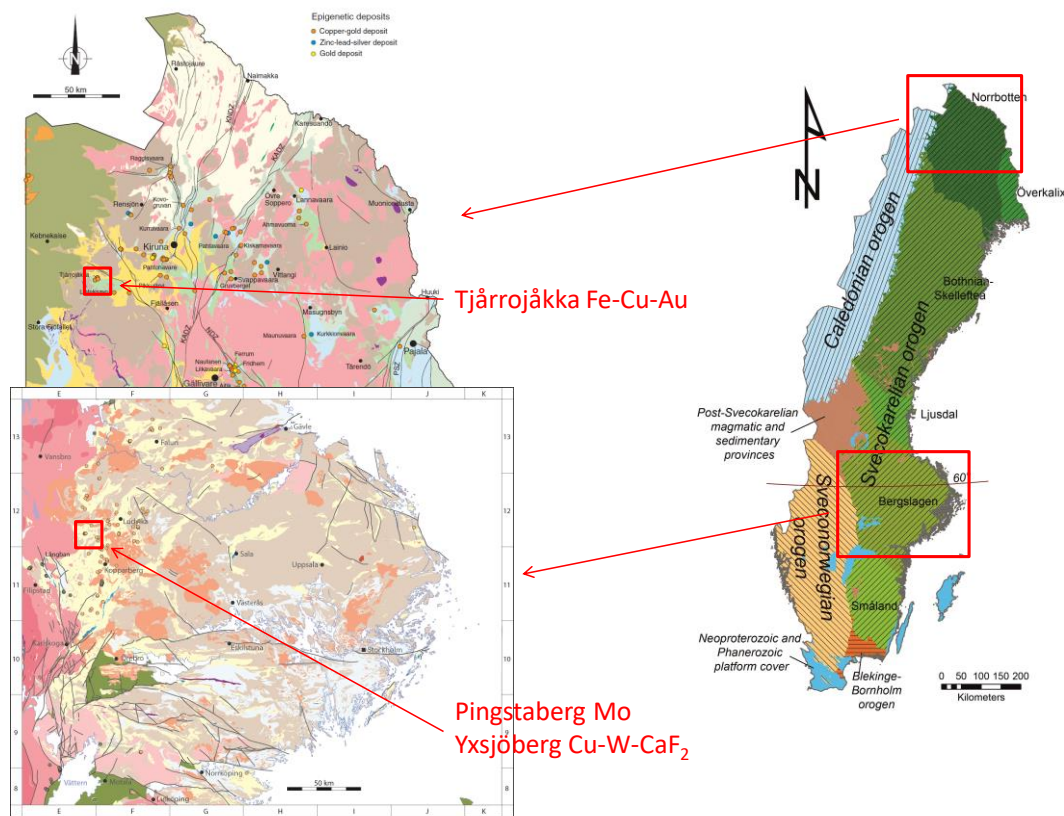
Abstract.....	4
Inledning.....	4
Berggrunden.....	5
Mineralisering och omvandling.....	7
Rum-tidmodellering (4D) vid Tjärrojåkka.....	11
3D-modellering av förekomsten i GoCAD.....	11
Geofysisk modellering.....	13
Åldersbestämning.....	15
Referenser.....	16

ABSTRACT

Within the framework of *Metodutveckling, ekonomisk geologi* two projects have been conducted so far (2016–2017). One of the sub-projects focused on space-time (4D) modelling of the Tjärrojåkka Fe-Cu mineralised system in northwest Norrbotten was initiated in 2017. The area comprises a larger (c. 51.5 Mt) Fe-rich deposit in the southeast and a smaller (c. 5.6 Mt) Cu-rich body some 500 m to the northwest. Both deposits display overlapping mineralogical and paragenetic characteristics, and a genetic link between them has been proposed (e.g. Edfelt 2007). Three-dimensional (3D) modelling of the system based on historical subsurface grade profiles constrains the geometries of the mineralised zones to a depth of c. 400 m. On-going modelling of magnetic, gravity and geochemical (assay) data within 3D space will refine the geometric footprints of the deposits and provide insights into structural and other controls on the mineralisation. A new zircon U-Pb SIMS age for a meta-andesite to the northwest of the Cu deposit has yielded an igneous age of 1891 ± 7 Ma (2σ) which is older than a previous estimate (1878 ± 7 Ma; Edfelt et al. 2006). Further geochronology work (U-Pb, Re-Os isotopic systems) aims to constrain the timing of Fe and Cu mineralisation and establish an overarching 4D space-time framework for the system.

INLEDNING

Inom ramen för Metodutveckling, Ekonomisk geologi har hittills (2016–2017) två projekt bedrivits (fig. 1). Det ena i Pingstabergr-Yxsjöbergstrakten i Bergslagen (*Relationen mellan en Mo-mineraliserad granit av GP-typ (Pingstabergr) och Cu-CaF₂-Mo-W-förande exoskarn i Barnfallsbjöden och Yxsjöberg*) och det andra vid Tjärrojåkka i Norrbotten (*4D-modellering av Tjärrojåkkas Fe-Cu-Au-fyndighet*).



Figur 1. Projektområdena.
The project areas.

Inom det ena delprojektet görs en 4-dimensionell (rum-tid) studie av Tjärrojåkkas Fe-Cu-mineralisering. Tjärrojåkka valdes eftersom det där finns en hel del bakgrundsdata i form av kartering, prospektering och forskning samt tillgång till ca 28 000 m borrhärna i SGUs arkiv i Malå (se Lynch & Berggren 2013). Tjärrojåkka är det enda kända exemplet på en betydande apatitjärnmineralisering bildad vid ca 1,78 Ga i norra Norrbotten (Edfelt 2007; Billström mfl 2010; Martinsson mfl 2016).

En integrerad analys av strukturdata från dagytan och underjordsdata (geologiska tvärprofiler, geofysik, borrhärnologgar) kan ge en holistisk 4D-modell av berggrunden i och kring den "blinda" mineraliseringen. Kompletterande dateringar (U-Pb i apatit och Re-Os i sulfid) av en mineralisering av ovan nämnda ålder kan ge stöd åt tidigare data och underlätta vidare tolkning av den malmbildande processen.

Den här rapporten presenterar preliminära resultat av 4D-modelleringen i Tjärrojåkka. Ett preliminärt dateringsresultat visas också.

BERGGRUNDEN

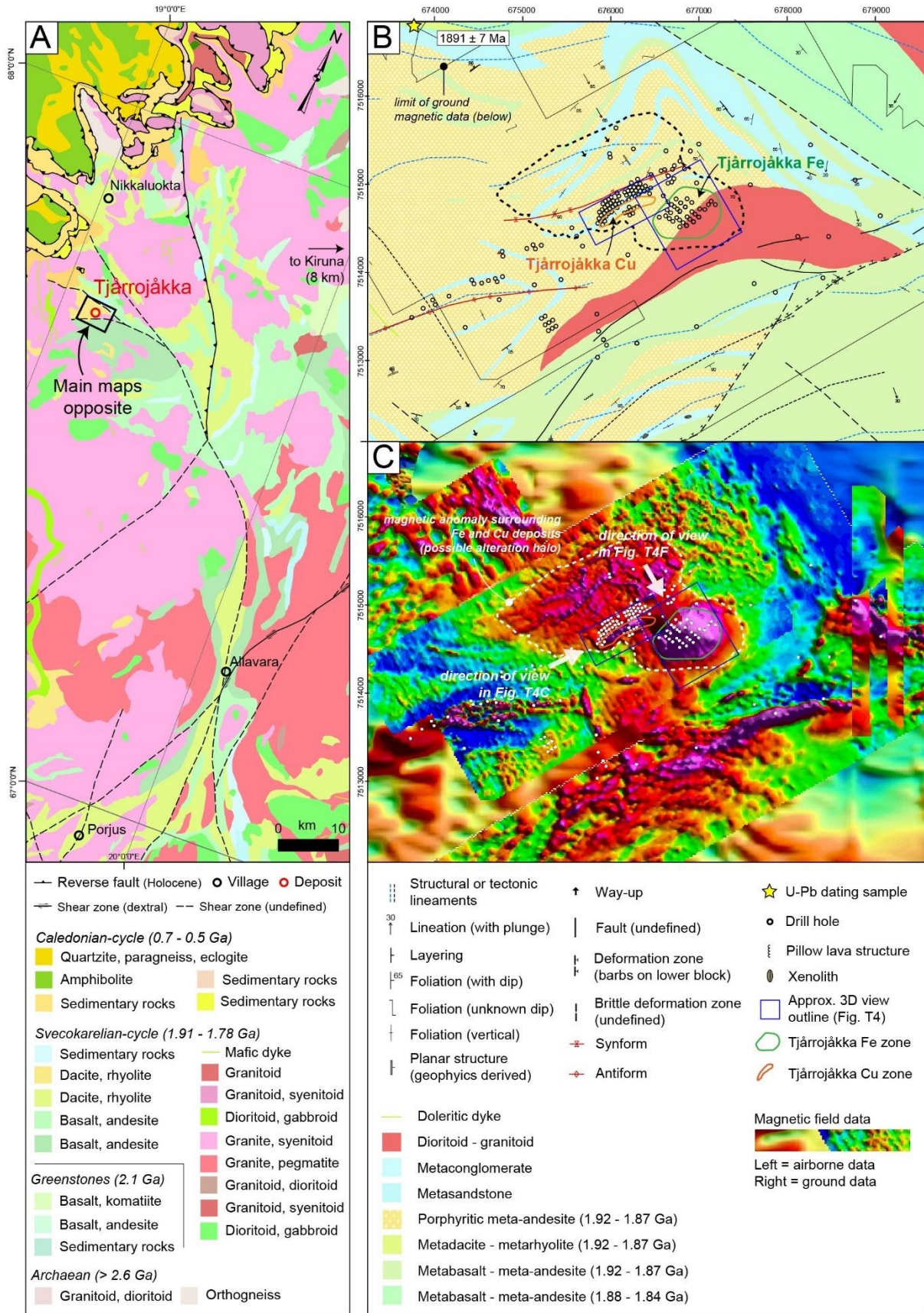
Tjärrojåkka ligger ca 50 km sydväst om Kiruna i Norrbotten (fig. 2A). Berggrunden är en del av ett ungefär 125 km långt, nordligt till nordvästligt strykande stråk av orosiriska ytbergarter som bildades under den svekokarelska orogenesisen (Bergman mfl 2001). Synorogen (ca 1,9 Ga) gabbro, kvartsmonzonit, syenit och granit samt i mindre grad ser- till postorogen (ca 1,8 Ga) diabas och granit-pegmatit finns rumsligt associerad med ytbergarterna (Bergman mfl 2001; Witschard mfl 2004).

Värdbergart till Tjärrojåkkas Fe-Cu-mineralisering är polydeformerad basaltisk till andesitisk metavulkanit med inlagringar av skiffer och kristallin karbonatsten (fig. 2B; Edfelt mfl 2006). Intrusivbergarter är underordnade i området men består av gabbro till kvartsmonzonit, diabas och granit-pegmatit (Edfelt mfl 2006). Geokemiska analyser av dessa bergarter visar att de bildades i en subduktionzonsmiljö, men att komagmatisk basalt och diabas har plattkaraktär (*within-plate*; Edfelt mfl 2006). Mineralparageneser tyder på metamorfos som mest nått lägre amfibolitfacies (se Ros 1979). I varierande grad penetrativ och sprickrelaterad hydrotermal omvandling påverkade områdets bergarter.

Edfelt mfl (2006) rapporterade en ålder på $1\,878 \pm 7$ Ma (zirkon, U-Pb, LA-ICP-MS) för den metaandesitiska värdbergarten till den huvudsakliga Cu-mineraliseringen i Tjärrojåkka. Magmatisk titanit i en närbelägen kvartsmonzodiorit gav $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -åldrar på $1\,865 \pm 5$ och $1\,846 \pm 5$ Ma (Edfelt mfl 2007). Sprick- och omvandlingsrelaterad titanit som associerar med Fe-Cu-mineraliseringen visade diskordanta $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -åldrar på 1,77–1,71 Ga ($n = 8$; Edfelt mfl 2007). En Sm-Nd *errorchron* för magnetit, apatit och amfibol gav en ålder på $1\,690 \pm 120$ Ma (Edfelt mfl 2007).

► **Figur 2.** Geologin kring Tjärrojåkkas Fe-Cu-mineraliseringar. **A.** Regional bild. Notera orienteringen av kartnorr! **B.** Den lokala berggrunden kring mineraliseringarna. **C.** Magnetisk anomalikarta över samma område som i B. Högre upplösning baserad på markmätningar, lägre på flygmätningar.

Geological setting of the Tjärrojåkka Fe-Cu system, northern Sweden. A. Regional geological setting. Note the rotated orientation (25° clockwise) of the map. B. Local geology highlighting the location of the Fe- and Cu-mineralized zones. C. Magnetic anomaly data for the same area shown in B and based on a combination of airborne and ground measurements (lower and higher resolutions, respectively).



Flera deformationsfaser har påverkat bergarterna i Tjärrojjäckaområdet (Witschard mfl 2004; Edfelt mfl 2006). Den tidigaste fasen (D_1) representeras av penetrativ, brant stupande och nordostligt till ostligt strykande foliation och relaterade *shear-bands* i ytbergarterna. Lokalt är S_1 tätt veckad med branta axialplan som stryker mellan nordväst och nordost. Dessa senare strukturer, som vi här kallar D_2/F_2 , tolkades som D_3 -veck av Edfelt mfl (2006). Äldre geologiska kartor och magnetiska anomalidata (e.g. Witschard mfl 2004, fig. 2C) visar dessutom asymmetriska veckmönster med ungefär östliga axialtytor som antyder en fas med nordsydlig kompression ($D_3/F_3?$) eller bildning genom skjuvning vid D_1 . Spröd deformation finns i form av ospecificerade, nordostliga till östliga förkastningar (e.g. Sandrin mfl 2007) och lokala ådror och brecciering associerade med mineraliseringen (se nedan). Generellt sett är emellertid antalet deformationsfaser, deras karaktär och relativa ålder dåligt dokumenterade.

MINERALISERING OCH OMVANDLING

Tjärrojjäckas Fe-Cu-fyndighet omfattar en apatitjärn- och en $Cu \pm Au$ -mineralisering (fig. 2B–C). En icke-certifierad malmbärkning för apatitjärnmineraliseringen är 52,6 Mt med 51,5 % Fe och 0,77 % P (Quezada & Ross 1975), för Cu-zonen 5,6 Mt med 0,68 % Cu, vid 0,4 % *cut-off* (Frietsch 1997). Noterbart är, att ingen beräkning eller utvärdering av Au har rapporterats (se Edfelt mfl 2005).

Följande sammanfattning baseras huvudsakligen på Frietsch (1997) och Edfelt mfl (2005) samt några egna observationer. Apatitjärnmineraliseringen består av semimassiv till massiv magnetit \pm apatit i oregelbundna zoner, linser och ådror med varierande tjocklek (fig. 3). Historiskt sett har man urskiljt två mineraliseringstyper eller -zoner baserat på textur och halter (Quezada & Ros 1975): dels massiv eller "kompakt" malm i den centrala delen ($>ca$ 52 % Fe) och "brecciamalm" mer perifert (ca 20–50 % Fe; se avsnittet om 3D-modellering nedan).

Den kompakta malmen består av finkornig (<1 mm), anhedral magnetit med underordnad apatit och amfibol i tunna aggregat, sprickor och ådror (fig. 3A–B). Den breccierade malmen är i sak likartad, men mer fragmenterad och "störd" av en större andel oregelbundna amfibol-apatit \pm kalcitådror och sidoberg (fig. 3C–D, G). Skillnaden mellan kompakt och breccierad malm verkar alltså snarare vara grad än art, och en textuell övergång mellan typerna ser ut att finnas (se fig. 3A).

Kopparkis, bornit, pyrit och en del molybdenglans finns disseminerat, som sprickfyllnad och som ådror i apatitjärnmalmen (fig. 3D–E, G–H). Generellt ser sulfiderna alltså ut att överpräglade magnetitmineraliseringen. Edfelt mfl (2005) dokumenterade elektrum och Ag-tellurid som inneslutningar i kopparkisen. Dessutom finns lokalt silvergrå, primär hematit som disseminering och som oregelbundna ådror associerade med kopparkis och epidot (fig. 3E–F).

Kopparmineraliseringen är i huvudsak disseminerad och i gångform. Mineralen är kopparkis \pm bornit samt i varierande grad magnetit, hematit och pyrit (fig. 3I–K). Enstaka inneslutningar av gediget guld och Ag-tellurid eller -sulfid i kopparsulfiderna och i kvarts har också rapporterats (Ekström 1978; Edfelt mfl 2005). I de flesta fall bildar kopparsulfiderna (mest kopparkis men även bornit och kopparglans) relativt smala zoner, fläckar och enstaka disseminationer som lokalt är parallella med foliationen i värdbergarten (fig. 3J). Tillsammans med kopparmineraliseringen i ådror (fig. 3K) tyder detta på en epigenetisk bildning syn- eller posttektoniskt (se Frietsch 1997). Magnetiten i ådror (fig. 3K) är något grövre (ca 1–2 mm) och mer kristallin (subhedral) än den i apatitjärnmalmen.

Den hydrotermala omvandlingen vid Tjärrojjäcka beskrevs av Edfelt mfl (2005). Kring Fe-mineraliseringen är värdbergarterna penetrativt eller selektivt penetrativt albit \pm amfibol \pm magnetit- och skapolit \pm albitomvandlade i olika utsträckning. Mafiska led är företrädesvis skapolitiserade

jämfört med intermediära led. Lokalt finns en kalifältspat + albit + hematitomvandling som fläck- eller zonvis rödfärgar bergarten intill magnetitrika delar (se Carlon 2000; fig. 3H).

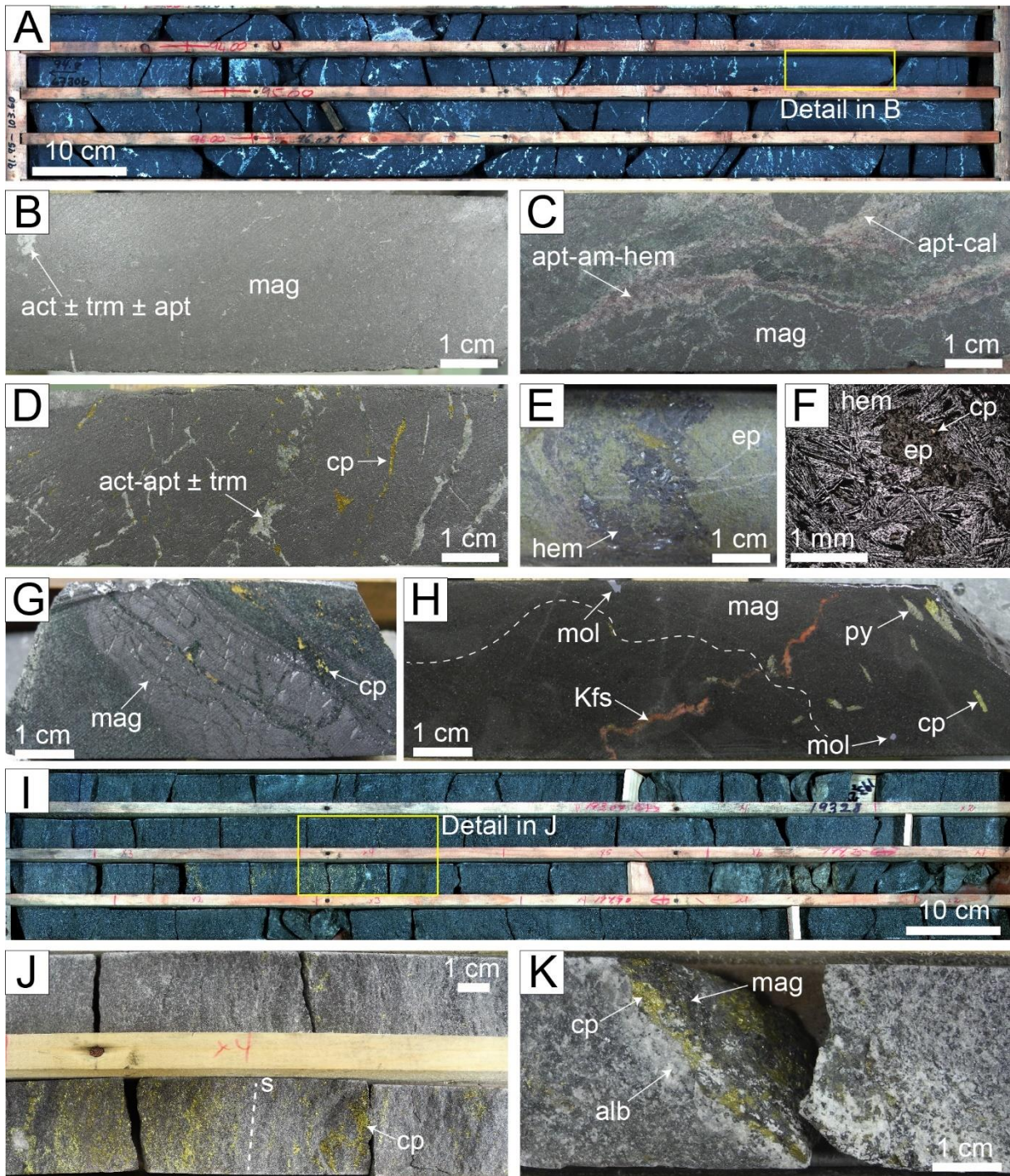
Kring Cu-mineraliseringen är värdbergarterna penetrativt albit ± skapolitomvandlade och (rödfärgande) kalifältspat + hematitomvandling mer generell. Dessutom finns lokalt en amfibol ± magnetit ± allanitparagenes. Sekundär epidot förekommer som oregelbundna fläckar och zoner som ersätter klinopyroxen (diopsid?), amfibol och fältspat.

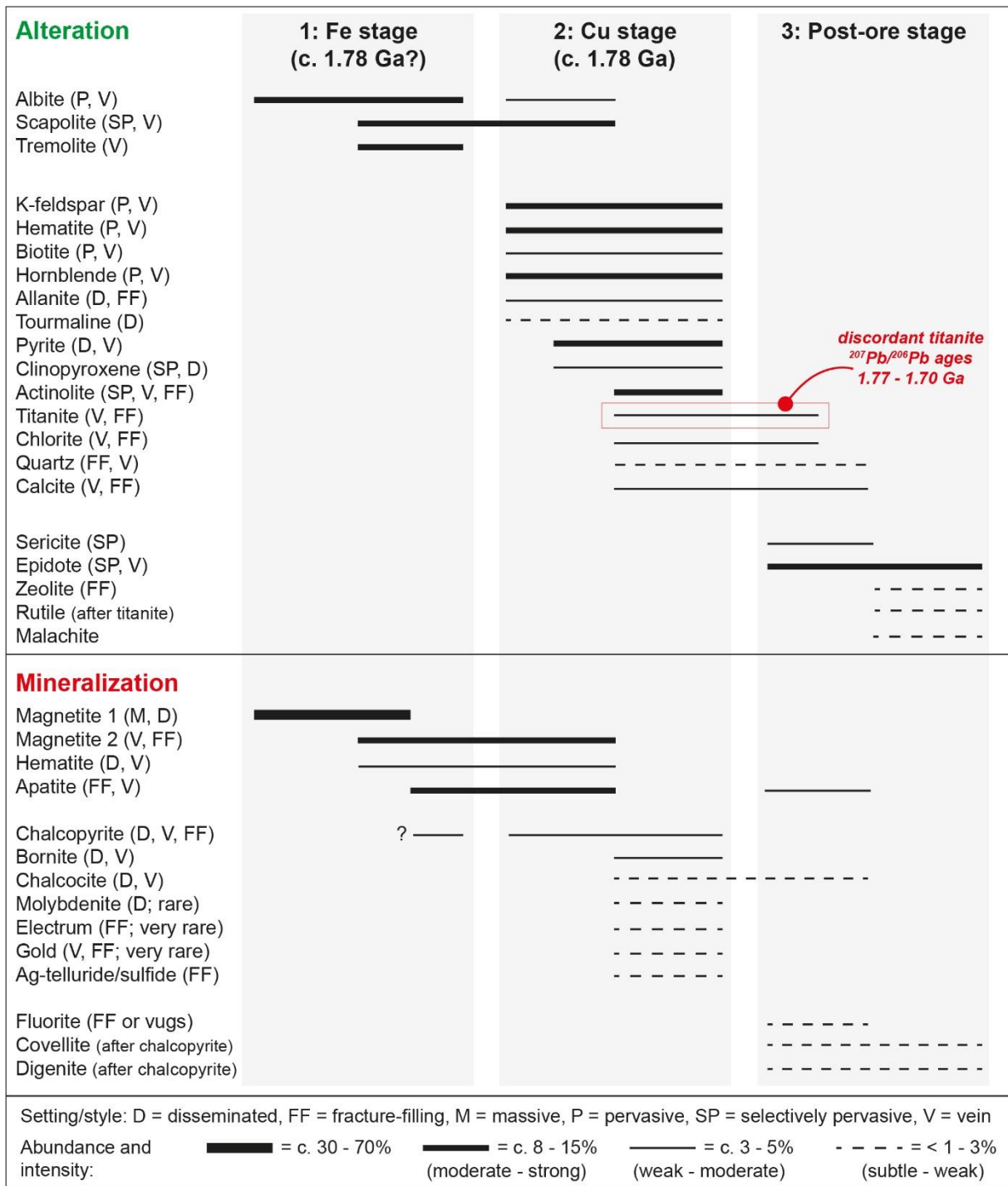
I figur 4 visas en reviderad tidsmässig paragenetisk utveckling för Fe- och Cu-mineraliseringarna.

Mineraliseringarna i Tjärrojåkka sitter i anslutning till några brant stupande (ca 70–90°) och ONO- till ostligt strykande deformationszoner. Dessa sannolika skjuvzoner representerar sekundära avlänkningsfrån en större nordnordvästlig deformationszon öster om här (fig. 2A). De geologiska, strukturella och geofysiska egenskaperna hos den senare zonen liknar de hos tex. Nautanen-zonen vid Gällivare (Bauer mfl 2017; Lynch mfl 2018). Strukturerna i Tjärrojåkka kan ha varit kritiska för transporten av Cu ± Au-haltiga lösningar, medan deras (möjliga) roll vid bildningen av järnmineraliseringen är oklar (se Frietsch 1997).

► **Figur 3.** Typer av mineralisering i Tjärrojåkka. **A.** Borrkärna som visar massiv eller "kompakt" magnetitmineralisering (Fe-rik zon). Ett flertal oregelbundna och diskontinuerliga ådror och "fläckar" med amfibol-apatit ± kalcit genomkorsar/finns i magnetiten. **B.** Detalj av bild A (gul rektangel) som visar finkornig (<1 mm), massiv magnetit. **C.** "Brecciemalm" med en magnetitrik zon som klipps av oregelbundna ådror av apatit-amfibol ± hematit ± kalcit. **D.** Magnetitrik zon ("kompakt" malm) med kopparkisådror och oregelbundna aktinolit-apatitådror. Notera att ådrorna av båda typer är likartat orienterade! **E.** Oregelbunden hematit-kopparkisådra genom epidotomvandlad bergart. **F.** Tunnslipsbild (reflekerat ljus) av ådran i bild E som visar radiella hematitrosetter. Texturen indikerar tillväxt i hålrum. **G.** Magnetitrik "ådra" eller zon (laminerad eller folierad?) i amfibolskiffer. Disseminerad kopparkis. **H.** Mafisk enhet (möjligen metadiabas) med disseminerad kopparkis, pyrit och någon molybdenglans. Den streckade linjen markerar (över och höger om) ungefärlig utbredning av riklig magnetit. **I.** Borrkärna med amfibolskiffer med "fläckar" av disseminerad kopparkis ± bornit (Cu-rik zon). **J.** Detalj av bild I (gul rektangel) med disseminerad kopparkis. Notera den något bandade karaktären hos mineraliseringen vilken motsvarar en planstruktur i värdbergarten. **K.** Magnetit-kopparkisådra omgiven av albitzon genom metavulkanisk värdbergart. Förkortningar: act = aktinolit, alb = albit, am = amfibol, apt = apatit, cp = kopparkis, ep = epidot, hem = hematit, Kfs = K-fältspat, mag = magnetit, mol = molybdenglans, py = pyrit, trm = tremolit.

Mineralisation styles at Tjärrojåkka. A. Drill core intervals showing massive- or 'compact'-style magnetite mineralisation (Fe-rich zone). Numerous, irregular and discontinuous amphibole-apatite ± calcite veinlets and patches crosscut the magnetite. B. Detailed view from A (yellow rectangle) showing massive, fine-grained (<1 mm) magnetite. C. Example of 'breccia'-style Fe mineralisation comprising a magnetite-rich zone cut by irregular apatite-amphibole ± hematite ± calcite veinlets. D. Magnetite-rich zone ('compact ore') with chalcopyrite stringers and irregular actinolite-apatite veinlets. Note the similar orientations of the chalcopyrite- and amphibole-filled veinlets. E. Irregular hematite-chalcopyrite vein crosscutting epidote-altered rock. F. Thin section view (reflected light) of vein in E showing radiating hematite rosettes. The texture is indicative of open-space crystallisation. G. Magnetite-rich 'vein' or zone (laminated or foliated?) in an amphibole schist. Disseminated chalcopyrite also occurs. H. Mafic unit (possible metadolerite) with disseminated chalcopyrite, pyrite and rare molybdenite. Dashed line marks approx. limit (to the top and right) of more abundant magnetite. I. Drill core intervals of amphibole schist with patchy zones of disseminated chalcopyrite ± bornite (Cu-rich deposit). J. Detailed view from I (yellow rectangle) of disseminated chalcopyrite. Note the somewhat banded character of the mineralisation which mimics a planar schistosity (s) developed in the host rock. K. Magnetite-chalcopyrite veinlet with albite halo crosscutting host metavolcanic rock.





Figur 4. Schematisk utveckling av parageneser vid Tjärrojäkka Fe-Cu-mineralisering (efter Ekström 1978; Edfelt mfl 2005; och egna observationer). Pb/Pb-åldrar i titanit och övriga åldersbedömningar (se texten) är enligt Edfelt mfl (2007). Relativa mineralhalter (i vol.-%) avspeglar normalvärden i borrhärne- och stuffskala. ? = osäker ålder.

Schematic alteration and mineralisation paragenesis for the Tjärrojäkka Fe-Cu system (based on Ekström 1978; Edfelt et al. 2005; and observations from this work). Titanite Pb/Pb age range and other age estimates (see main text) are from Edfelt et al. (2007). Relative mineral abundances (in vol. %) reflect typical values at the drill core- or hand specimen-scale. ? = uncertain timing.

RUM-TIDMODELLERING (4D) VID TJÄRROJÅKKA

3D-modellering av förekomsten i GoCAD

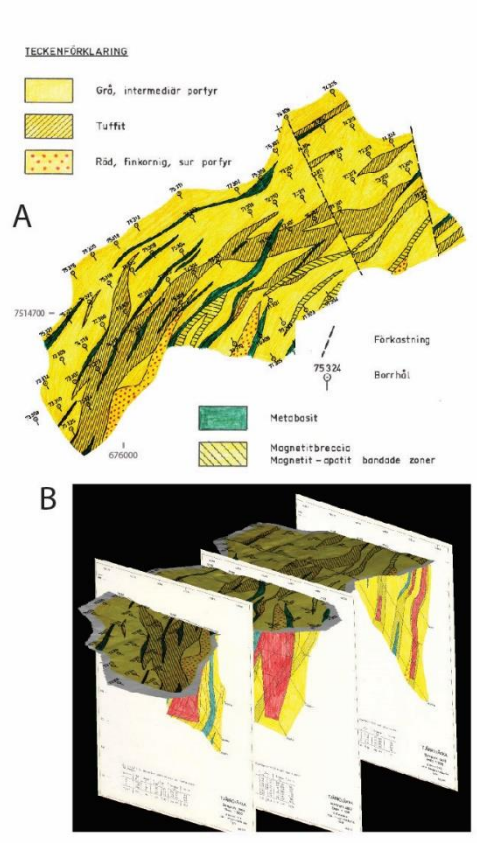
Vi har gjort översiktliga tredimensionella modeller av de större malmkroppar som utgör Tjärrojåkkas Cu- och Fe-fyndigheter (fig. 5). De syftar till att visualisera en tolkning av de geometriska relationerna mellan mineraliseringar, litologiska enheter och strukturer. Tanken är att modellerna ska fungera som underlag för en 4D-tolkning av hur configurationen av berget ändrats med tiden. Det mer regionala tredimensionella ramverket för fyndigheterna är till största delen baserat på geofysisk modellering. Arbetet med de geologiska och geofysiska modellerna är pågående, och nedanstående text och figurerna 5–6 är en kortfattad beskrivning av hur långt vi har kommit och ska inte tolkas som ett slutresultat.

De tredimensionella geologiska modellerna är baserade på kartor och profiler vilka i sin tur är tolkningar av borrhållsdata från prospekteringen (Quezada 1976; Westerdahl 1978; fig. 5). Modellen av Cu-fyndigheten är baserad på 64 borrhårn, en detaljerad litologisk karta och 17 borrhålsprofiler med 40 meters mellanrum mellan varje profil. Varje profil visar en sekvens med intermediär metavulkanit (tuffit, porfyr), metabasit och magnetitbreccia. Bergarterna stupar brant (70–90°) mot nordväst. Cu-mineraliseringen (Cu >0,2 %) sitter i intermediär metavulkanit och är indikerad med röd färg i profilerna (fig. 5B). Dock visar borrhålsloggarna att Cu-halterna här varierar starkt och lokalt kan bli så höga som 2,67 % (borrkärna 71306, intervall 154–157 m). Interpolering mellan profilerna av de rödindikerade domänerna ger en 650 meter lång Cu-malmkropp (fig. 5C). Kroppen har plan geometri med en tjocklek på mellan 15 och 60 meter, stupar brant till subvertikalt mot nordväst och är öppen mot djupet (>300 m). Stupningen hos Cu-malmkroppen är generellt mer brant än den hos lagringen i vulkaniterna, och mineraliseringen skär således över kontakten mellan tuffit och porfyr. Mineraliseringen är alltså varken stratiform eller stratabunden.

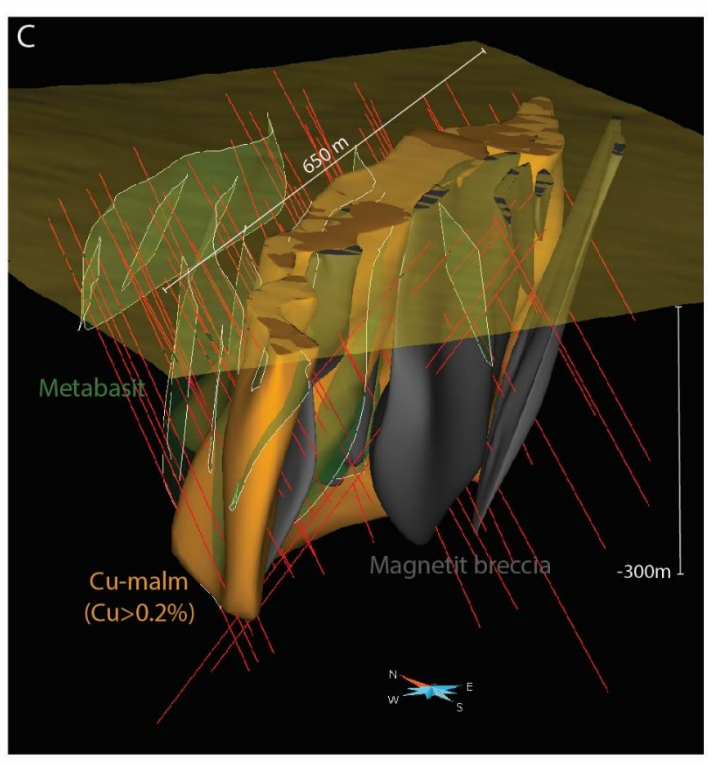
Cu-mineraliseringens värdbergarter är sura metavulkaniter och lokal metabasit. Röd, finkornig och sur porfyr samt tunna, men långa linser av magnetitbreccia förekommer bara i liggväggen.

► **Figur 5.** **A.** Geologisk karta och **B.** ett urval av de 17 borrhålsprofilerna vid Tjärrojåkkas Cu-fyndighet (Westerdahl 1978). **C.** 3D geometrisk modell av Tjärrojåkkas Cu-fyndighet baserad på interpolering mellan profilerna enligt Westerdahl (1978). Röda linjer indikerar borrhningar. **D.** Geologisk karta och **E.** ett urval av djupnivåkartor av Tjärrojåkkas Fe-fyndighet (Quezada 1976). **F.** 3D geometrisk modell av Tjärrojåkkas Fe-fyndighet baserad på interpolering mellan kartor och profiler enligt Quezada (1976).

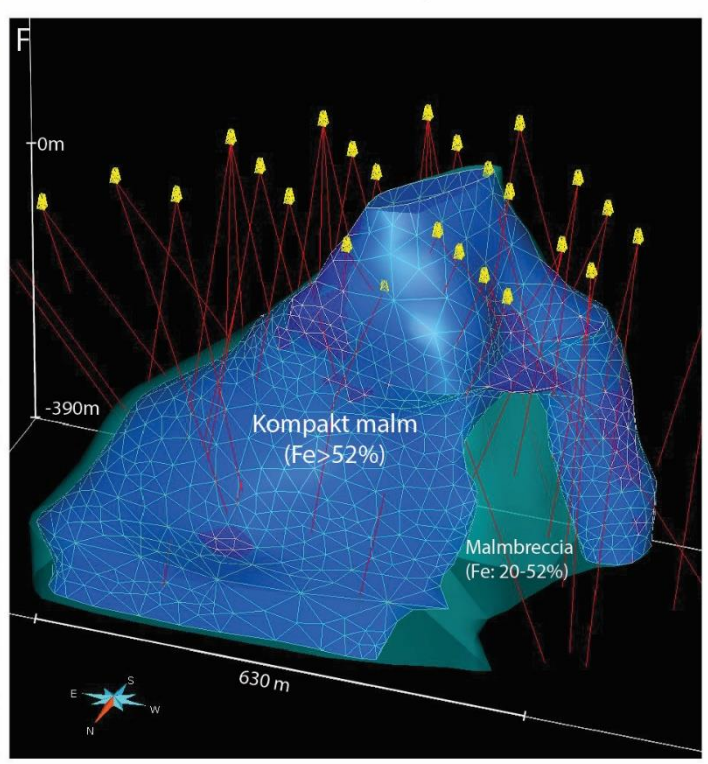
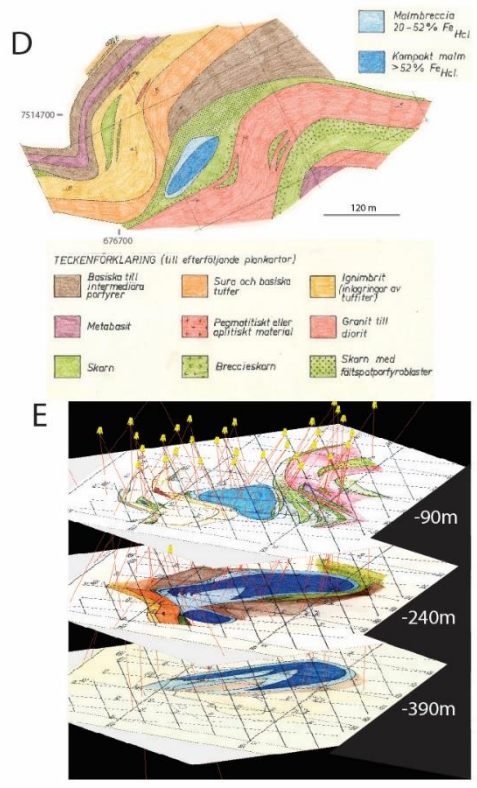
A. Geological map and **B.** a selection of 17 drillcore profiles (see text) at the Tjärrojåkka Cu deposit (Westerdahl 1978). **C.** 3D geometric model of the Tjärrojåkka Cu deposit based on interpolation between drillcore profiles according to Westerdahl (1978). **D.** Geological map of the gound and **E.** a selection of subsurface levels at the Tjärrojåkka Fe deposit (Quezada 1976). **F.** 3D geometric model of the Tjärrojåkka Fe deposit based on interpolation between maps and cross sections according to Quezada (1976).



Tjärrojäkka Cu-fyndighet



Tjärrojäkka Fe-fyndighet



Modellen av Fe-fyndigheten är baserad på 25 borrhål, en detaljerad geologisk karta, 7 djupnivåkartor och 5 borrhålsprofiler (fig. 5D–E). Fe-malmkroppen består dels av perifer malm-breccia som innehåller 20–52 % järn och dels av en kärna av kompakt malm med järnhalter som överstiger 52 %. Den tredimensionella geometrin av Fe-malmkroppen har tagits fram genom interpolering mellan domänerna markerade med blå färg i profiler och på djupnivåkartor. Resultatet visar en stående kon som blir bredare mot djupet (fig. 5F). På 100 meters djup delas kompaktmalmskroppen upp i två parallella kroppar med mellanliggande malmbreccia. Omgivande bergarter omfattar skarn, intermediär porfyr och tuffit. Deras tredimensionella utsträckningar är inte modellerade än.

Av det pågående modelleringsarbetet återstår att

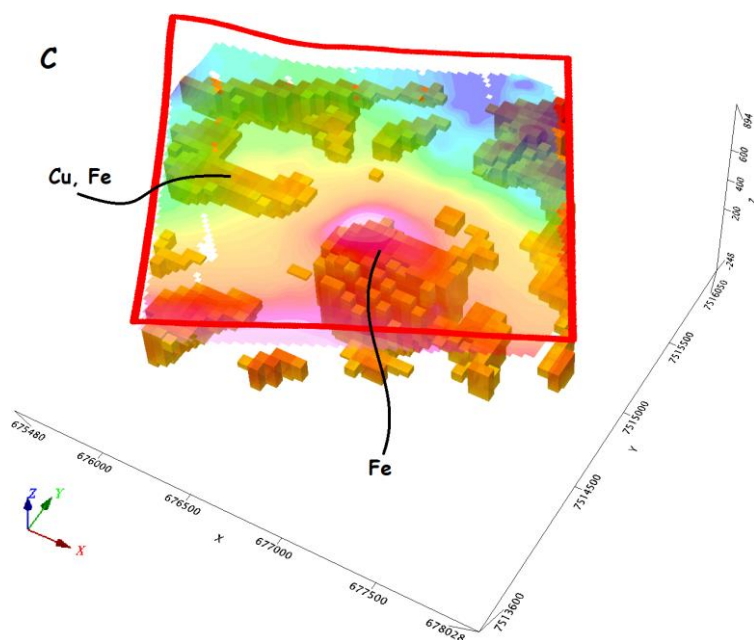
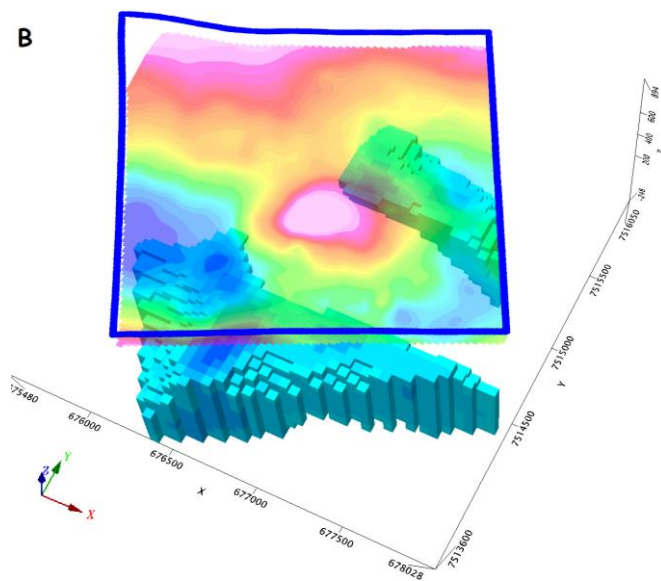
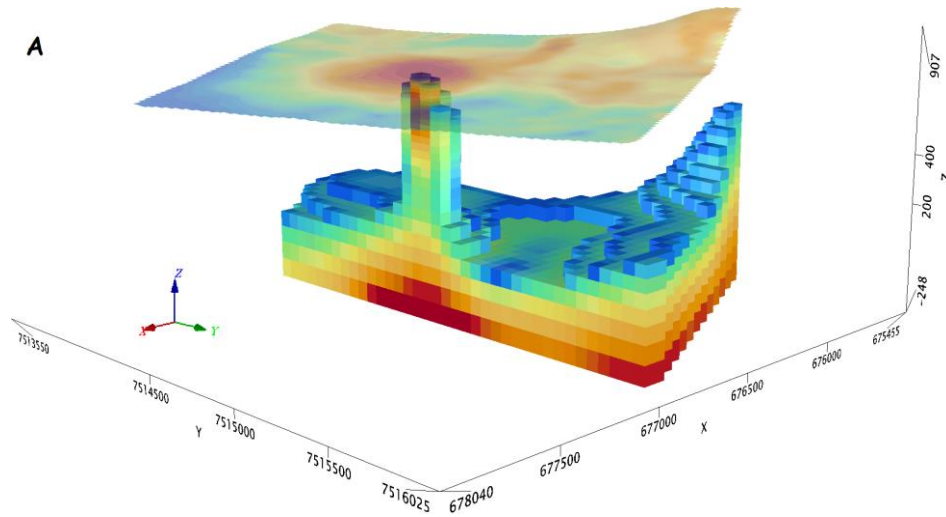
- sammanfoga de geologiska modellerna av Tjärrojäckas Cu- och Fe-fyndigheter samt inkludera omgivande litologiska enheter, omvandlingszoner och mindre mineraliseringar
- skapa ett regionalt ramverk för den lokala geologiska modellen genom geofysisk 3D-modellering och integrering av övrig befintlig information från borrhål, prospekteringsrapporter och äldre tolkningar.

Geofysisk modellering

Geofysisk modellering och tolkning hjälper till att förstå geologin. Målet är att använda 3D-modellering av magnet- och tyngdkraftsfältdata med inversionsteknik kombinerad med tolkningen av magnet- och tyngdkraftsfältet längs profiler (2,5D) för att underlätta den geologiska tolkningen. Den tvådimensionella modelleringen är av typen ”*forward modelling*” där petrofysisk provtagning och mätning av borrhålen ger modellerna direkt koppling till geologin (tex. Sandrin mfl 2006, 2009).

I Tjärrojäcka finns fem olika mätningar av magnetfältet gjorda under olika år. De är gjorda med varierande täthet; flera har linjeavstånd 20 meter och punktavstånd 20 meter och även mätningar med 10 meters punktavstånd har genomförts. Tolkningen av en preliminär 3D-modell (fig. 6A) visar att Tjärrojäckas Fe-mineralisering stupar mot nordost. Den är högmagnetisk och djupgående. Den kropp i nordväst som uppvisar förhöjning i magnetfält verkar lite djupare än Tjärrojäckas järnmineralisering och ha betydligt lägre magnetisk fältstyrka. Tjärrojäckas kopparsmineralisering har förhöjda halter av magnetiska mineral, vilket har visats även vid tidigare undersökningar (Sandrin m.fl. 2009). Den preliminära modellen kan inte urskilja denna förhöjda magnetiska fältstyrka, varför Tjärrojäckas Cu-mineralisering inte framträder som en kropp med förhöjd susceptibilitet.

En detaljerad mätning av tyngdkraftsfältet med linjeavstånd 40 meter och punktavstånd 20 meter har gjorts, vilket ger data för 3D-modellering med god upplösning. Preliminära modeller (fig 6B–C) har tagits fram för tolkning även av tyngdkraftsfältet. Figur 6C visar massförhöjningar och djupgående i samband med Tjärrojäckas Fe- och Cu, Fe-mineraliseringar. Mätningarna visar på högre densitet hos flera kroppar. Det är dock särskilt tydligt vid Tjärrojäckas Fe-mineralisering där bergarterna verkar ha markant högre densitet ned till ca 900 meters djup. Bergvolymen i nordväst, som är relativt högmagnetisk (se ovan), har även en massförhöjning som ser ut att ha samma strykning som den vid Tjärrojäckas Cu-mineralisering. Dock finns den i ett djupare läge (ca 500 meters djup) och verkar utgöras av signifikant lättare bergarter än de vid kopparsmineraliseringen. Intressant är de östvästliga stråk i figur 6B där modellen visar bergarter med låg densitet. Det kan vara en fråga om en östvästlig rörelsezona.



Figur 6. A. VOXI 3D-modell av magnetfältet över Tjärrojåkka Fe- och Cu-Fyndigheter och närmaste omgivning. Figuren visar Fe-fyndigheten som en brant nordöstligt stupande, högmagnetisk volym. **B.** VOXI 3D-modell över berggrundens massfördelning som visar ett massunderskott i modellen breder ut sig i Ö-V. **C.** Tjärrojåkka Fe är den kropp som visar ett kraftigt massöverskott ned till stort djup. Densitetsmodellen visar Tjärrojåkka Cu, Fe som ett massöverskott, men utan stort djupgående.

A. VOXI 3D model of the magnetic field at Tjärrojåkka and surroundings. The Fe mineralisation appears as a steeply, NE dipping, highly magnetic body. **B.** VOXI 3D model of rock densities showing higher values at the Tjärrojåkka Fe mineralisation and some other rock units. Note the NS-striking minimum. **C.** Tjärrojåkka Fe shows a significant density increase down to great depth. The density model also shows an increase of density for the Fe, Cu mineralization, but down to lesser depth.

Åldersbestämning

En porfyrisk metaandesit belägen ca 4,5 km nordväst om Cu-zonen provtogs för datering (fig. 7; se fig. 2 för läget). Den provtagna bergarten är petrologiskt likartad den metaandesit som är värdbergart till Cu-mineraliseringen. SIMS-analys (Nordsim) av U-Pb-systemet i zirkon gav en konkordant magmatisk ålder på $1\,891 \pm 7$ Ma (2σ ; $n = 9$), vilket är äldre än den som erhöles vid motsvarande LA-ICP-MS-analys ($1\,878 \pm 7$ Ma; Edfelt mfl 2006). Eftersom den tidigare dateringen tolkades som en minimiålder (Edfelt mfl 2006), föreslår vi att vår ålder mer precist visar tiden för andesitisk vulkanism i området. Resultatet ger också en maximiålder för bildningen av magnetitmineraliseringen (se fig. 4).

Den nu erhållna åldern på Tjärrojäckas metaandesit är i stort identisk med den på ca 1 895 Ma på en metavulkanit i Malmberget, ca 80 km sydost om här (Sarlus mfl 2017). Dessa data visar alltså regionalt på en begränsad period med bimodal magmatism från ca 1 895 till 1 891 Ma då värdbergarterna för både apatitjärnmalmer och epigenetiska Cu-Au-mineraliseringar bildades.

Pågående dateringsarbete i det här delprojektet avser att även analysera U-Pb i apatit och Re-Os i sulfider för att exakt försöka bestämma åldern på mineraliseringarna i Tjärrojäcka. Förhoppningsvis kommer det att leda till en bättre förståelse av de malmbildande processerna (tex. i relation till regionala termala händelser) och till att skapa en bättre 4D-modell i Tjärrojäcka.



Figur 7. Fotografi av samma metaandesit vid Tjärrojäckas Cu-mineralisering som daterats.

Example of porphyritic meta-andesite hosting the Tjärrojäcka Cu deposit used for zircon U-Pb SIMS geochronology.

REFERENSER

- Bauer T.E., Sarlus, Z., Lynch, E.P., Martinsson, O., Wanhainen, C., Dreijing-Carroll, D. & Coller, D., 2017: *Two independent tectonic events controlling AIO and IOCG deposits in the Gällivare area, Sweden*. Proceedings of the 14th Biennial SGA Meeting, Québec City. Volume 3, 839–842.
- Bergman, S., Kübler, L. & Martinsson, O., 2001: Description of regional geological and geophysical maps of northern Norrbotten County. *Sveriges geologiska undersökning Ba 56*, 110 pp.
- Billström, K., Eilu, P., Martinsson, O., Niiranen, T., Broman, C., Weihed, P., Wanhainen, C. & Ojala, J., 2010: IOCG and related mineral deposits of the northern Fennoscandian Shield. In T.M. Porter (ed.): *Hydrothermal iron oxide–copper–gold & related deposits: a global perspective, vol. 3*. Advances in the Understanding of IOCG deposits. PGC Publishing, Adelaide, 381–414.
- Carlson, C.J., 2000: Iron oxide systems and base metal mineralisation in northern Sweden. In Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, Volume 1*, PGC Publishing, Adelaide, 283 – 296.
- Edfelt, Å., 2007: *The Tjärrojäkka apatite–iron and Cu–Au deposits, northern Sweden – products of one ore forming event*. Ph.D. thesis, Luleå University, Sweden.
- Edfelt, Å., Armstrong, R.N., Smith, M. & Martinsson, O., 2005: Alteration paragenesis and mineral chemistry of the Tjärrojäkka apatite–iron and Cu (-Au) occurrences, Kiruna area, northern Sweden. *Mineralium Deposita* 40, 409–434.
- Edfelt, Å., Sandrin, A., Evins, P., Jeffries, T., Storey C., Elming, S.-Å. & Martinsson, O., 2006: Stratigraphy and tectonic setting of the host rocks at the Tjärrojäkka Fe-oxide Cu-Au deposits. *GFF* 128, 221–232.
- Edfelt, Å., Billström, K., Broman, C., Rye, R.O., Smith, M.P. & Martinsson, O., 2007: Origin and fluid evolution of the Tjärrojäkka apatite–iron and Cu (-Au) deposits, Kiruna area, northern Sweden. In Edfelt, Å., *The Tjärrojäkka apatite–iron and Cu–Au deposits, northern Sweden – products of one ore forming event*. Ph.D. thesis, Luleå University, Sweden.
- Ekström M., 1978: Mineralogisk karakteristik av kopparmineraliseringen vid Tjärrojäkka. *Sveriges geologiska undersökning Brap 78002*, 13 pp.
- Lindblom, S. & Öhlander, B., 1994: Fluids associated with skarn mineralization at the Yxsjöberg tungsten deposit, Central Sweden. Abstracts 21:a Nordiska Geologiska Vintermötet, Luleå. 115.
- Lynch, E.P., Bauer, T.E., Jönberger, J., Sarlus, Z., Morris, G.A. & Persson, P.-O., 2018: Petrological and structural character of c. 1.88 Ga meta-volcanosedimentary rocks hosting iron oxide-copper-gold and related mineralisation in the Nautanen-Aitik area, northern Sweden. In: Bergman, S. (ed): *Geology of the Northern Norrbotten ore province, northern Sweden*. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och Meddelanden 141*.
- Lynch, E.P. & Berggren, R., 2013: Background information Tjärrojäkka key area (29I Kebnekaise SO & 29J Kiruna SV). *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2013:14*, 43 pp.
- Martinsson, O., Billström, K., Broman C., Weihed, P. & Wanhainen C., 2016: Metallogeny of the Northern Norrbotten ore province, northern Fennoscandian Shield with emphasis on IOCG and apatite-iron ore deposits. *Ore Geology Reviews* 78, 447–492.
- Quezada, R., 1976: SGU Berggrundsbyrå (Tjärrojäkka Fe-fyndighet)
- Quezada, R. & Ros, F., 1975: Malmberäkning av Tjärrojäkka järnmalmfyndighet. *Sveriges geologiska undersökning BRAP 82569*, Uppsala.
- Ros, F., 1979: Tjärrojäkka kopparmalmfyndighet. *Sveriges geologiska undersökning BRAP 82567*, 13 p., Uppsala/Malå.
- Sandrin A., Berggren R., Elming S.-Å., 2006: Geophysical targeting of Fe-oxide Cu-(Au) deposits west of Kiruna, Sweden. *Journal of Applied Geophysics* 61, 92 – 101.

- Sandrin, A., Edfelt, Å., Waight, T., Berggren, R. & Elming, S-Å., 2009: Physical properties and petrologic description of rock samples from an IOCG mineralized area in the northern Fennoscandian Shield, Sweden. *Journal of Geochemical Exploration* 103, 80 – 96.
- Sarlus, Z., Martinsson, O., Bauer, T.E. & Wanhainen, C., 2017: *Timing and tectonic setting of host rocks to the Malmberget AIO deposit, Sweden*. Proceedings of the 14th Biennial SGA Meeting, Québec City. Volume 3, 959 – 842.
- Tegengren, F.R., m.fl., 1924: Sveriges ädlare malmer och bergverk. *Sveriges geologiska undersökning Ca 17*, 406
- Westerdahl, K., 1978: SGU Berggrundsbyrån (Tjärrojåkka Cu-fyndighet)
- Witschard, F., Thelander, T., Kübler, L., Stölen, L.K. & Perdahl, J.A., 2004: Beskrivning till berggrundskartbladen 29I Kebnekaise SO. *Sveriges geologiska undersökning Ai 198*.