

Kobberforekomsten på Ulveryggen, Finnmark, Norge

JOHANNES FABRICIUS

Resumé

Ulveryggen kobberforekomst ved Repparfjord på 70°26' nordlig bredde, 24°13' østlig længde, Finnmark, Norge, består af disseminerede Cu- og Cu-Fe-sulfider i en fedtspatholdig sandsten og i mineraliserede kvartsårer. Undersøgelsen omfatter mikrotermometriske målinger på væskeindslutninger i kvarts i såvel åre- som matrixkvarts og malmmikroskopi. Væskeindslutningerne viser, at kvarts og sulfider i årerne er udfældet af vandige opløsninger med op til 42 vægtprocent salt og temperaturer til over 550°. Der opstilles tre tentative modeller for malmdannelsen.

Geologi

Ulveryggen er en 525 m høj fjeldryg, der strækker sig som en ca. 14 km lang antiklinal i SV-NØ retning i Komagffjord tektoniske vindues nordøstlige del. Kobbermineraliseringen findes i en feldspathoidig sandsten, der danner en antiklinal på Ulveryg-antiklinalens sydøstlige flanke ca. 3 km syd for Repparfjord. Den arkosiske bjergart består af en mellemgrå til lysegrå sandsten, men i malmfeltet er den lys gulliggrå til lys brunliggrå. Den gullige farvetone skyldes en kraftig feldspatforvitring som følge af en meget kraftig opsprækning. Sandstenen indeholder flere steder konglomeratiske lag med vel afrundede kvartsboller i størrelsen 1 cm til mindre end 1 mm. Ulveryg-afsnittet er et tykbænket, massivt, dårligt sorteret, umodent sediment med flere konglomeratiske indslag, der sammen med almindeligt forekommende krydslejringer tyder på et midelhøjt energiniveau. De klastiske korn er 70–80% kvarts, 10–12% plagioklas og 3–5% mikrolin samt under 1% apatit, cordierit, rutil, titanit og zirkon. Matrixen udgør 3–5% og består af lys glimmer i meget små korn samt epidot og større chloritkorn. Der er kun fundet få biotitkorn. De metamorfe mineraler viser, at metamorfosegraden svarer til overgangsfacies mellem lav-T og høj-T grønskiferfacies og at biotitisograden netop er nået svarende til 375°–420° ved 1 kb. På grundlag af mineralindholdet kan Ulverygsandstenen klassificeres som en arkosisk sandsten. Sandstenen er gennemsat af utallige små kvartsfyldte sprækker uden foretrukket ori-

entering. I sjældne tilfælde er sprækkerne 1–1½ cm brede og omkring 10 cm lange, men normalt er de væsentligt mindre.

Mineralisering

Malmfeltet har en længde af ca. 2 km og en bredde varierende fra ca. 10 m til ca. 100 m samt en dybde på ca. 200 m. Forekomsten består i horisontalplanet af en række langstrakte uregelmæssige linseformede legemer, medens de vertikalt er mere eller mindre tragtformede og mod dybet fingrer legemerne ud med en hældning mod SØ. De enkelte »fingre« har den største lødighed centralt placeret (op til ca. 2% Cu) og aftagende ud mod periferien med en »cut-off« grænse på 0.3% Cu. Den gennemsnitlige lødighed for Cu-forekomsten er 0.72% Cu. De vigtigste malmmineraler er bornit, chalcopyrit, digenit og chalcosin, mens pyrit, idait, anomal bornit, covellin, cobaltit og wittichenit forekommer i ringe mængder.

Sulfidmineraliseringen forekommer mesoskopisk således:

I. dissemineret og koncentreret på de sedimentære lagflader i meget små korn.

II. i kvartsårer og i den breccierede sidesten,

III. som tynde strimer i mylonitsoner i ekstremit små korn.

Mineraliseringstype I udgør skønsmæssigt 60% af forekomsten. Malmmineralerne er overvejende dissemineret chalcopyrit (0.01–1 mm) og få større bornitkorn (3–4 mm), forekommende på sedimentære lagflader sammen med chalcopyrit. Type II omfatter bornit med chalcosin/digenit, samt afblandinger af chalcopyrit i bornit. Bornitkornenes størrelse er afhængig af årens mægtighed og kan undtagelsesvis være af cm-størrelse. I forbindelse med sprækkedannelsen er sidestenen ofte blevet mere eller mindre breccieret, i hvilken kvarts og sulfider er udkrystalliseret. Type III er uden økonomisk betydning, da mylonitsonerne er meget fåtallige og tynde. Sulfidmineraliseringen er dannet samtidig med eller senere end de bevægelser, der har forårsaget sprækkedannelsen og knusningen.

Foruden sulfiderne findes Fe-oxider hovedsageligt som disseminerede hæmatitkorn, der dan-

ner meget små velkrystalliserede specularitskæl og mere eller mindre martitiserede små, vel afrundede magnetitkorn samt perfekte små magnetitoktaedre. Hæmatit- og magnetitdannelsen er ældre end sulfidmineraliseringen, idet mineraliseringen forekommer i tynde sprækker i større hæmatitkorn, samt imellem kornene i itubrudte magnetitkorn. Endvidere danner specularitkrytallerne skarp grænse til sulfiderne.

Foruden hæmatit og magnetit findes goethit/lepidokrokit og ilmenit, der findes som ekstremt små (få μm) euhedrale listeformede krystaller poikiloblastisk i aggregater af rutil, titanit og leucoxen. Disse findes ofte i forbindelse med bornit, digenit og chalcosin eller pyrit. Mængdeforholdet mellem sulfider og oxider skønnes at være 1:1.

Bornit er det økonomisk vigtigste sulfidmineral. Det findes oftest med en omdannelsesrand af digenit eller chalcosin. Bornit forekommer som store selvstændige korn, som forskellige afblandingsstrukturer med chalcopyrit og som myrmekitisk sammenvoksning med digenit eller chalcosin. Chalcopyrit forekommer: som sub- til anhedrale isolerede korn, oftest omgivet af en rytmisk udfældet rand af goethit, som korn under omdannelse til digenit og som afblandingsstrukturer i bornit. Mængdeforholdet mellem bornit og chalcopyrit skønnes at være 3:2. Digenit forekommer udbredt som omdannelsesprodukt efter bornit, som afblandingsstrukturer, som en tynd rand omkring chalcopyritlameller i bornit, som lameller i chalcosin og som selvstændige korn. De større digenitkorn er som regel lamellare. Chalcosin forekommer i mindre mængde end digenit som store isolerede korn, i afblandinger med op til 50 μm brede digenitlameller og som myrmekitisk sammenvoksning med bornit. Paragenesen bornit-chalcopyrit-digenit er meget udbredt i flere forskellige afblandingsstrukturer. Disse strukturer er ikke diagnostiske for en bestemt afblandingstemperatur eller afkølingshastighed, men isolerede hexagonale chalcosinkorn med digenitlameller og delvis omdannelse til covellin viser, at chalcosinen er dannet på temperaturer højere end 103°. Omdannelsen til covellin kan tolkes som en ascenderende omdannelse i temperaturområdet 157°–507°.

Mikrotermometri

Ved de mikrotermometriske undersøgelser blev

der anvendt prøver af farveløs kvarts fra malmfeltets små kvartsfyldte sprækker og fra matrixkvarts. Der er anvendt en nondestruktiv analysemetode til bestemmelse af væskeindeslutningernes dannelsesstemperatur og salinitet. Undersøgelsen omfatter 374 målinger af indeslutninger, der alle var vandige opløsninger. Der er målt væske-gas (v-g) og væske-gas-krystal (v-g-x) indeslutninger. Den faste fase i v-g-x indeslutningerne er bestemt ved nedkøling. Generelt består den faste fase af halittering. I enkelte indeslutninger er forekommet et rektangulært mineral, som antages at være anhydrit. *Homogeniseringsstemperaturen* (T_h) er målt på 208 v-g og 127 v-g-x indeslutninger (Fig. 1). T_h ligger i intervallet 145°–550° med følgende distinkte temperaturintervaller: 145°–225° og 270°–350° for v-g indeslutninger og 145°–210° og 270°–300° for v-g-x indeslutninger. Disse fire populationer omfatter ca. 85% af T_h -målingerne. For at kunne bestemme indeslutningernes *dannelsesstemperatur* (T_i) skal saliniteten være kendt og T_h skal korrigeres for det på dannelsesetidspunktet herskende tryk. Trykket er skønnet til at ligge mellem 400 og 800 bar. Korrektionen af T_h er størst for de laveste T_h -værdier og svinger fra 0 til 55°C. Til bestemmelse af saliniteten er *smeltetemperaturen* (T_m) målt på 20 v-g og 61 v-g-x indeslutninger efter nedkøling til isdannelse. Først efter længere tids nedkøling på $\div 80^\circ$ – $\div 100^\circ$ og påfølgende langsom hævnning af temperaturen til $\div 55^\circ$ – $\div 50^\circ$ skete der en spontan isdannelse i 81 indeslutninger, svarende til ca. 5% af samtlige nedkølede indeslutninger. T_m er analog med frysepunktsdepressionen, der er udtryk for saliniteten, som angives i ækvivalent vægtprocent (ækv.vt%) NaCl. Da T_m for en mættet NaCl-opløsning er $\div 21.1^\circ$ og de målte T_m har et gennemsnit på ca. $\div 29^\circ$ (ca. 30 ækv.vt% NaCl) i intervallet $\div 19^\circ$ – $\div 35^\circ$, er der andre salte end NaCl i opløsningerne. Indeslutningernes salinitet bestemmes i fasetetraedret $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2-\text{KCl}$ ud fra T_m for v-g indeslutningerne, og for v-g-x indeslutningerne tillige halitteringens *opløsningsstemperatur* T_{sol} . Salinitetsgennemsnittet for v-g indeslutningerne er beregnet til 26.0 ækv.vt% salt, hvilket fordeles mellem $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ (17%) og NaCl (9%), mens indholdet af KCl er forsvindende. Gennemsnittet for v-g-x indeslutningerne er bestemt til 21 ækv.vt% NaCl og 14 ækv.vt% $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$. Den maksimale salinitet

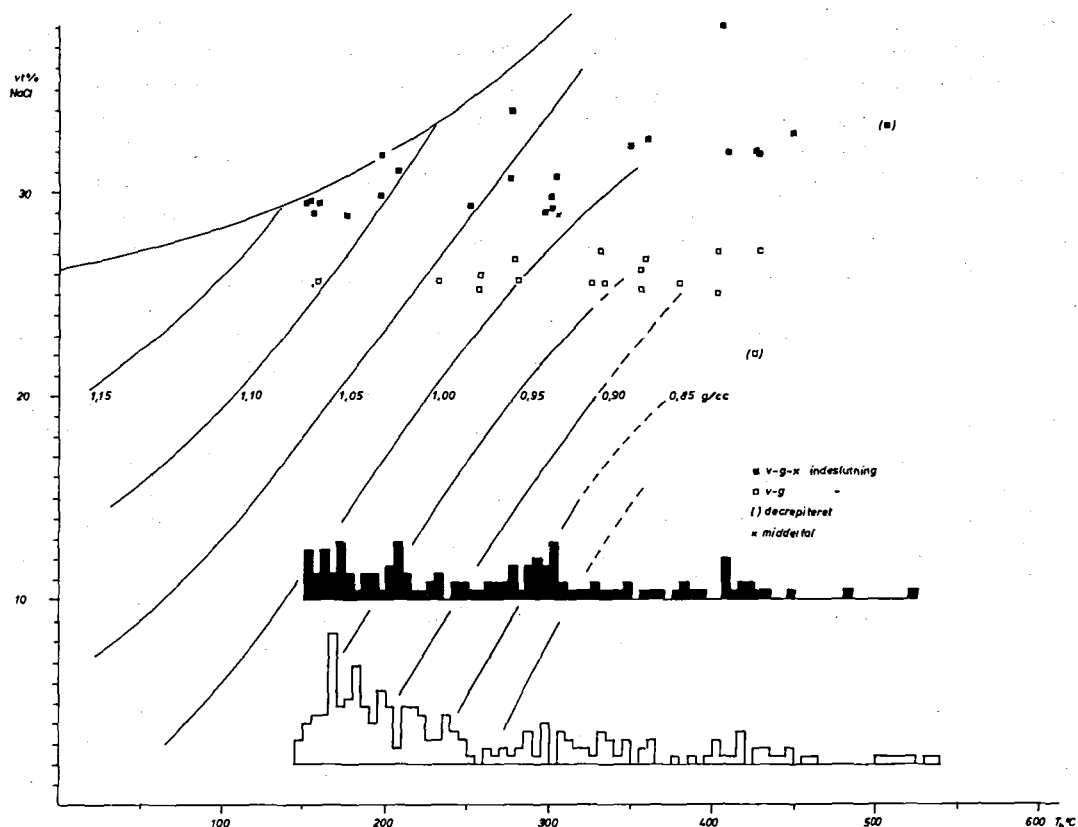


Fig. 1.

har været 42 ækv.vt%. Opløsningernes densitet er bestemt ud fra isochorerne i diagrammet figur 1, der bygger på sammenhørende T_m - og T_h -målinger og på homogenisering i væskefasen i NaCl-H₂O systemet for indeslutninger med lavt volatiltindhold. Histogrammerne i fig. 1 viser, at den dominerende del af indeslutningerne har T_h under 350°. Disse indeslutningers gennemsnitlige densitet vil være ca. 1.05 g/cc for en gennemsnitlig salinitet på ca. 30%. Omkring 10 T_h -målinger kunne ikke gennemføres som følge af instrumentellets begrænsninger. T_h har i disse tilfælde været væsentligt over 550°.

Indeslutningernes dannelsstemperatur T_t går fra ca. 550° til ca. 200°. I malmfeltet har der således fundet et temperaturfald sted på ca. 350°. En svagt sur NaCl-opløsning på 350° eller højere kan opløse mere end 1000 ppm Cu og/eller Fe gennem Cl-kompleksdannelse. Ved en tilstrækkelig høj svovlfugacitet vil Cu og Fe udfælde som sulfider, når opløsningen afkøles fra 350° til 250°. Ca. 99% Cu og ca. 90% Fe vil være udfældet i dette

interval. De undersøgte opløsninger har haft høj svovlfugacitet, idet der i nogle indeslutninger forekommer sandsynlige anhydritkrystaller. Da Cu er mere temperaturafhængig end Fe, forekommer pyrit i Ulveryg-malmen kun i begrænset mængde, men på samme måde som og sammen med Cu- og Cu-Fe-sulfiderne.

I malmfeltet er opløsningernes afkøling dels foregået ved varmeledning til sidestenen og dels ved drøvling/trådtrækning (throttling). Varmeledning er foregået ved turbulent strømning i de mesoskopiske og mikroskopiske ikke-planare sprækker og er karakteriseret af en hurtig mineraludfældning, der bevirker dannelsen af små uklare kvartskorn og små disseminerede opake mineral-korn. I flere tilfælde har det været muligt at påvise afkøling ved drøvling, der er en irreversibel adiabatisk proces. Processen finder sted, hvor den hurtigt strømmende høj-T opløsning møder en indsnævring og derefter en påfølgende pludselig udvidelse. Ved udvidelsen sker et hurtigt tryktab og et hurtigt temperaturfald (til under

400°) med endotermisk mineraludfældning af små uklare kvartskorn, således at T_1 i længere tid har ligget i intervallet 200°–350°. I dette interval udkrystalliseres store klare kvartskorn og relativt store sulfidekorn. Drøvling er en meget effektiv afkølingsproces for omhandlede opløsningsstype. Afkøling gennem opblanding med koldere meteorisk vand kan udelukkes, da kun ca. 5% af indeslutningerne dannede is ved nedkølingen og først efter lang tids underafkøling. Opløsningerne har derfor været meget »rene« uden krystallisationskim, idet saltkim ikke kan nukleere is.

Diskussion af malmgenese

I: Hydrotermal dannelse:

Hydrotermalt dannet/mobiliseret malm udgør skønsmæssigt en trediedel til halvdelen af den samlede tonnage. Opløsningernes oprindelse kendes ikke, men de kan eventuelt være kommet fra de mange gabbroide intrusioner i området. Cu-Fe-indholdet i opløsningerne kan muligvis være dannet fra udludning af bjergarter på dybere niveauer, da sidestenen til de malmmineraliserede kvartsårer ikke er udludet.

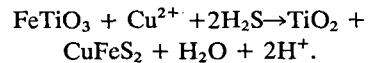
II: Detritisk dannelse:

Den resterende del af tonnage forekommer som små disseminerede chalcopyritkorn og enkelte væsentligt større bornitkorn. Disse tolkes aflejret som detrituskorn. Til støtte for en sådan detritusmodel tjener, at chalcopyritkornene alt overvejende ikke er i forbindelse med andre Cu- og Cu-Fe-sulfider, men omgivet af en rytmisk udfældet goethitrånd. Den tiloversblevne Cu-mængde efter omdannelsen til goethit er ud-

fældet som malachit og azurit på sprækkeflader. Til ugunst for denne synsedimentære detritusmodel er malmlegemernes form og orientering. På et palinspastisk kort med nuværende erosionsniveau vil malmen fremtræde som en smal stejlstående (70° i forhold til den sedimentære lagdeling) 2 km lang række af mere end 200 m dybe linser vinkelret på sedimentationsstrømmen og mere end 4 km borte fra en eventuel chalcopyritkilde i nordvestlig retning. Endvidere taler det relativt høje energiniveau og chalcopyrits spredthed mod en detritusmodel.

III: Diagenetisk dannelse:

Der hersker ikke tvivl om magnetits sedimentære oprindelse i og udenfor malmfeltet. Ilmenitkornene er som anført omdannet til rutil/leucoxen og ofte i forbindelse med pyrit eller Cu-Fe-sulfider. Dette svarer nøje til lignende observationer i visse dele af malmem i Mufulira-distriktet, Zambia, hvor chalcopyrit er dannet diagenetisk efter følgende proces:



De mikrotermometriske, mikroskopiske og geologiske undersøgelser har ikke vist en entydig model for dannelsen af Cu- og Cu-Fe-sulfiderne. Malm dannelsen på Ulveryggen kan ikke forklares ved en enkelt proces, men er sandsynligvis en kombination af flere af ovennævnte processer.

Nærværende undersøgelse er uddrag af forfatterens speciale til naturvidenskabelig kandidatsamen ved Københavns Universitet september 1978.