

Norsk mineralsymposium 2016

Redigert av
Alf Olav Larsen og Torfinn Kjærnet

Stathelle 2016

Kompleks sulfidmineralisering i kaledonske kvartganger ved Trondheim

Leif Roger Størseth

Skyttarbakken 39, 7089 Heimdal (lstorset@broadpark.no)

Sammendrag

Mer enn 40 ulike opake mineraler er påvist i kvartsganger på to lokaliteter (Vintervannet og Trolla) vest for Trondheim by. Mineralene er i hovedsak knyttet til små ($< 0,2$ mm) bornitt- og/eller chalkopyritinneslutninger i pyritt, inkludert et stort antall uidentifiserte mineraler. De ulike mineralene er presentert med optiske og kjemiske egenskaper. Det er kun pyritt, chalkopyritt og Mineral 6 (Ca-Mn-oksyd) som kan sees med blotte øye, mens de øvrige mineralene er kun 10-20 μm store. Dette har vært begrensende for ytterligere identifisering. Blant mineralene som er påvist kan vi nevne elektrum, altaitt, aikinitt, volynskitt, berryitt og gedigent vismut. Vintervann-forekomsten er definitivt den rikeste. Den hydrotermale aktiviteten som har transport særegne elementene inn i systemet, har også forårsaket til dels markerte omvandlinger av den tilstøtende trondheimitten, bl.a. med en for området særegen kvarts-sericitt-pyritt-bergart. Ingen lignende sulfidmineralisering skal være rapportert fra den norske delen av kaledonidene.

Introduksjon

Bakgrunnen for dette arbeidet var funn av meget grovkrystallin pyritt i en nysprengt kvartsgang ved Vintervannet i Bymarka ved Trondheim i 1980. Som vitenskapelig assistent ved Institutt for Geologi og Bergteknikk ved NTNU, fikk jeg anledning til å fordype meg i dette materialet i 1990-92. Ved omfattende mikroskopering og mikrosondeanalyser viste det seg å være en kjemisk kompleks sulfidmineralisering.

I Bymarka har det tidlig på 1900-tallet vært en del prospektering på tynne, massive sulfidforekomster (Holstvolden, Blyberget, Fagerlia). Vintervann-mineraliseringen er imidlertid den første registreringen inne i trondhemitten. Den inneholder også andre større og mindre kvartsganger, som bare unntaksvis er sulfidholdige. Det finnes en rekke rustsoner i området rundt Vintervannet og nordover mot Gråkallen. I hovedforekomsten finnes det sulfider både i kvartsgangen og tilstøtende trondhemitt. Mikroskopering av polerte tynnslip viste at pyritten inneholdt tallrike små bornitt-chalkopyritt-inneslutninger, hvor i tillegg en lang rekke andre mineraler bestående av vismut, sølv, gull, tellur, kadmium, bly m. fl. opptrådte i varierende mengder.

Som en følge av funnet ble andre områder i og rundt trondhemitten undersøkt for sulfider, og en annen polymetallisk forekomst ble funnet i et nedlagt steinbrudd ved fjorden ved Trolla vest for Trondheim. Her ble det også påviste sjeldne sulfider i en kvartsgang med pyritt-pyrrhotitt-mineralisering.

Berggrunnsgeologi

Kvartsgangen ved Vintervannet er flere titalls meter lang, og ble blottlagt i en 10 meter lang skjæring ved en nyanlagt gangvei i 1980. Gangen ligger i kanten av sure intrusiver (Fagervika trondhemitt (Slagstad 2003), heretter kun omtalt som trondhemitt) som danner en lang, linseformet kropp plassert sentralt i en grønnsteinsenhets (Bymarkagruppen) i Størendekket i de skandinaviske kaledonidene (Fig. 1). Stratigrafisk under Størendekket finner vi Gulagruppen lenger vest, og som overliggende enhet Nedre Hovingruppen lenger øst (Wolff 1979). De basaltiske grønnsteinene antas å være del av et kambrisk ofiolittkompleks (Grenne *et al.* 1980, Slagstad 2003). Disse inneholder et mindre antall rustsoner/sulfidmineraliseringer med finfordelt pyritt, som for eksempel en liten forekomst på vestbredden av Vintervannet (Fig. 2). Dette antas å være en meget liten, stratabundet mineralisering (Tabell 2, prøve 001).

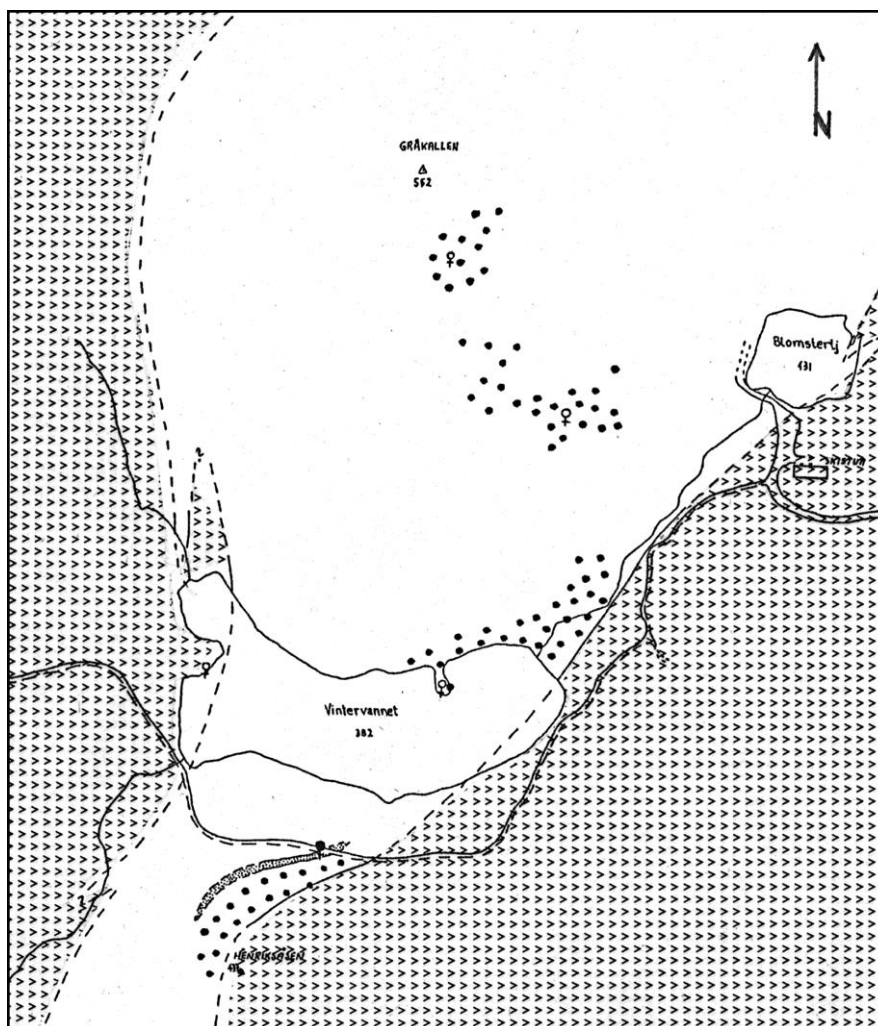


Fig. 1. Geologisk kartskisse over området Vintervannet-Gråkallen (1 cm ~ 100 m).

>>> angir grønnstein, ... angir pyrittimpregnasjoner, hvitt angir trondhemitt.
Kvartsgang med malmineraler er angitt som en grå linse syd for Vintervannet.

Trondhemittintrusjonen, som kutter lagdelingen i den omliggende grønnsteinen, er heterogen med variasjon i både strukturer, mineralogi og utseende. Dette skyldes hovedsakelig ulike grad av

omvandling, som best kan studeres ved Vintervannet. Nord for dette øker homogeniteten og bergarten blir grovere og mer granittisk. Den nyeste publikasjon (Slagstad 2003) omtaler intrusjonen som Fagervika-trondhemitten, som da er å regne som foretrukket enhetsnavn.



Fig. 2. Vegskjæring med malmmineralførende kvartsgang ved Vintervannet.

Detaljerte studier rundt Vintervannet viser flere typer trondhemitt. Den mest utpregede omvandlede typen er en grønnlig hvit bergart med omfattende kvarts-sericitt-pyrittomvandling, og inneholder mange, mindre pyritførende kvartsganger. Kvarts utgjør ca. 60 %, sericitt/muskovitt 20-30 %, mindre pyritt og feltspat, og mindre mengder epidot og kloritt. Glimmerinnholdet gir bergarten en lepidoblastisk tekstur og framtredd skiffrighet. Det lave feltspatinnholdet ble bekreftet ved kjemiske analyser av bergarten. Denne omvandlede bergarten er mest utbredt i sørøsthellingen av Gråkallen, ned mot Vintervannet.

I Trollaområdet er trondhemitten mindre omvandlet, har en grovere granittisk tekstur, og langt færre tegn på deformasjon eller metamorfose. I bergarten inngår her noe biotitt som er noe klorittisert, samt turmalinnåler (< 1 cm). Noe sør for steinbruddet ved Trolla viser bergarten er trondhemitt-granittisk sammensetning.

Som en kuriositet fra steinbruddet ved Trolla nevnes en linse eller inneslutning av en spesiell bergart med biotitt, kalsitt, kvarts, pyritt og spessartin (bekreftet ved XRD) som hovedmineraler og derved helt ulikt trondhemitten. Kjemisk analyse av bergarten stadfester høyt manganinnhold, som også kan stamme fra karbonatet. I små kvartslinser er det funnet galenitt og sinkblende. Hovedbergarten i Trolla er gjennomvannet av flere, utholdende, < 1 m tykke kvartsårer med en god del pyrrhotitt og pyritt, som ble gjenstand for mikroskopering og mikrosondeanalyser.

Opptreden av de opake mineralene

De mest mineralrike paragenesene finnes i den mest grovkornede pyritten, og er dermed vesentlig funnet ved hovedforekomsten ved Vintervannet (Fig. 2). Pyritførende kvartsårer nær parallelle til skiffrigheten i metatrondhemitten er imidlertid hyppige også nord for Vintervannet (bl.a. den sterkt omvandlede bergarten på nordsiden av vannet), og oppover mot toppen av Gråkallen. Kun unntaksvis

er det funnet andre opake mineraler enn pyritt; noe chalkopyritt og i ett tilfelle mindre bornittinnneslutninger.

Ved Trolla er pyrittmineraliseringen klart begrenset til diskordante kvartsårer/ganger, sammen med pyrrhotitt. Tegn på hydrotermal aktivitet finnes også andre steder i Trollaområdet, bl.a. veiskjæring ved Høvringen med en ”adular”-gang med en rosafarge. Her også funnet grønn apatitt.

I alle prøver fra Vintervannet er pyritt det dominerende opake mineralet. Chalkopyritt utgjør opptil drøyt 2 % i de mikroskoperte tynnslipene, mens det mineralogisk interessante bornitt-innholdet kun er ca. 0,1 % basert på modalanalyser (Tabell 1). Magnetitt er representert ved et fåtall 2-3 mm store subhedrale korn. I Trolla viste en modalanalyse 99,9 % pyritt, mens chalkopyritt er meget sjeldent (Tabell 2, prøve 016). Selv om kun 4-5 opake mineraler dominerer, finnes det likevel ytterligere et stort antall ulike malmmineraler, men de aller fleste i svært små korn (5-50 µm). Enkelte tynnslip fra Vintervannet inneholder opptil 25 ulike malmmineraler, mens det er funnet opptil 15 ulike i slip fra Trolla.

Tabell 1. Modalanalyse av 5 polerte tynnslip fra Vintervannet, 4 av disse fra samme stuff.

Mineral	Vol-%	Gjennomsnitt (%)
Pyritt	85,1-99,1	92,4
Chalkopyritt	0,5-14,2	6,5
Limonitt	0,2-1,5	0,7
Magnetitt	0,0-1,3	0,3
Bornitt	0,0-0,2	0,1
Berryitt	0,0-0,3	0,1

Tabell 2. Kjemiske analyser av ulike pyrittmineraliseringer. Alle konsentrasjoner er angitt som ppm (parts per million), hvis ikke annet er notert.

Prøve	Fe (%)	S (%)	Cu	Pb	Zn	Ag	Au (ppb)	Mo	Bi	Mn	Th
001	20,07	16,81	748	11	236	3.1	23	2	64	843	2
002	9,84	10,50	25	2	12	0.1	1	54	2	193	1
012	15,68	17,70	931	2	5	3.1	58	3	2	90	72
016	17,45	25,50	8	322	5	5.7	73	16	33	73	2
020	18,65	32,90	9311	4	18	7.8	227	8	24	4630	10
Gj. snitt	10,93	10,74	751	7	25	1.0	26	9	8	534	13

Prøve 001 er fra en smal (<10 cm), stratabundet mineralisering i amfibolrik grønnstein på vestbredden av Vintervannet, antatt nær grensen til trondhemitt.

Prøve 002 er fra pyrittsonen på det lille nest på nordbredden av Vintervannet.

Prøve 012 er fra en 2-3 cm tykk pyrittzone på grensen av trondhemitt og kvartsgangen ved hovedforekomsten Vintervannet.

Prøve 016 er fra en av kvarts-pyrittgangene som krysser steinbruddet i Trolla.

Prøve 020 er av den rikeste og groveste pyritten fra hovedforekomsten Vintervannet.

Gjennomsnitt angir summen av alle de 19 analyserte prøvene i området.

De kjemiske analysene ble utført ved ACME Analytical Laboratories Ltd. (Canada) ved fire assay/ICP for Au, LECO-instrument for S og ICP AES for de øvrige elementene.

Ca. 20 kjemiske bergartsanalyser er utført. Tabell 2 viser et utdrag av de mest interessante og kun én er fra Trolla. Det er generelt lave verdier for de fleste elementene, med høyeste verdi i analysen av den grovkornede pyritten (prøve 020). Mn-innholdet bør nevnes, og sees i sammenheng med opptreden av mineral 6 (Tabell 1). Funn av gull/elektrum-korn i malmmikroskopet (Fig. 4) startet mye av dette arbeidet. Imidlertid er gullinnholdet meget lavt, kun 26 ppb (parts per billion). Trolla-analysen skiller seg ut med lavere Cu- og høyere Pb-innhold.

Ca. 25 mikrosondeanalyser er vist i Tabell 3 og 4. På grunn av kornstørrelsen av de sjeldnere mineralene er det et generelt problem med forhøyde verdier for Fe, S og Cu, som stammer fra mineralenes omliggende pyritt, chalkopyritt eller pyrrhotitt. Spesielt Fe- og S-innholdet er derfor til en viss grad ignorert i vurderingen av analysene og identifiseringen av mineralene.

Identifiserte opake mineraler

Aikinitt, $PbCuBiS_3$

Mikrosondeanalysen (Tabell 3) av dette optisk lyse mineralet viser formelen $Pb_{0.99}Cu_{1.05}Bi_{0.94}S_3$ (basert på $S = 3$), nært det ideelle $PbCuBiS_3$. Aikinitt er kun påvist med mikrosonden, da dets optiske egenskaper er svært likt mange av de andre, tilstøtende mineralene.

Altaitt, $PbTe$

Altaitt er funnet som homogene inneslutninger eller sammenvoksninger med volynskitt i pyrrhotitten fra Trolla. Det opptrer i 15-30 μm store korn, lysende hvite og med høy refleksans. To mikrosondeanalyser viste relativt lik sammensetning (Tabell 3). Mineralet inneholder 0,2 vekt-% Au, noe som er kjent som en underordnet bestanddel (Palache *et al.* 1946). Fe-innholdet i analysene skyldes antagelig påvirkning fra omliggende pyrrhotitt.

Berryite, $Pb_3(Cu,Ag)_5Bi_7S_{16}$

Mineralet er karakteristisk i flere tynnslipt fra Vintervannet (Fig. 3), som inneslutninger i pyritt, enten sammen med chalkopyritt eller alene. Det ligner galenitt av farge, har sterk anisotropi som varierer fra lys gulaktig til mørk grå. Tvillinger er observert. To analyserte korn fra samme tynnslipt ga relativt lik kjemi (Tabell 3), nær $Ag_3Cu_4Pb_4Bi_9S_{20}$. Mange sulfosalter inneholder disse elementene, og to mineraler ligner spesielt sterkt; berryite ($Pb_3(Cu,Ag)_5Bi_7S_{16}$) og cupropavonitt ($AgPbCu_2Bi_5S_{10}$). En analyse av berryitt fra Skottland (Lowry *et al.* 1994) er sterkt sammenfallende med mineralet fra Vintervannet. Berryitt er i nyere tid også påvist i Kløvereidnuten, Telemark (F.S. Nordrum, pers. komm.).

Bornitt, Cu_5FeS_4

Bornitt opptrer vesentlig i poikilitiske inneslutninger i pyritt; alene eller med chalkopyritt i polymineralske inneslutninger (Fig. 3). Den følges relativt ofte av mange, sjeldne malmmineraler. I prøver der bornitt mangler, mangler også disse. Dette gjelder ikke i Trolla, hvor bornitt ikke er observert. Mineralet er selv erstattet av chalkopyritt, covellin og sporadisk «limonitt». "Basketwave"-tekstur med chalkopyritt er observert, likedan avblandingstekstur med idaitt. De største bornitt-chalkopyritt-inneslutningene er målt til 0,4 x 0,2 mm.

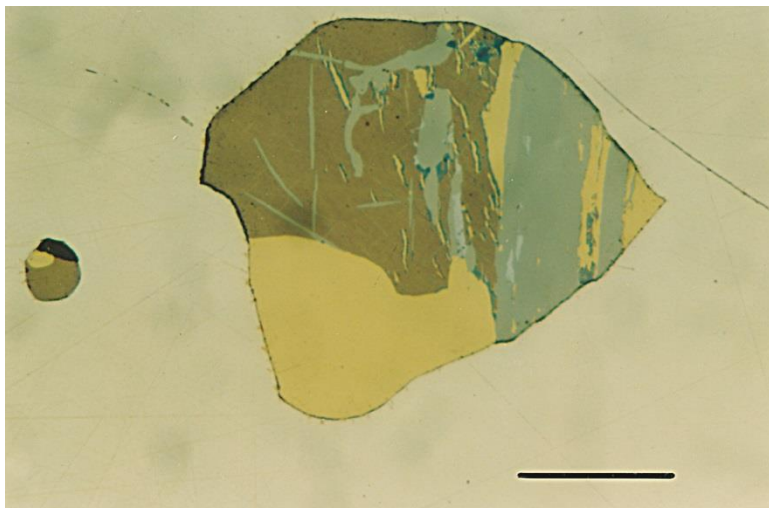


Fig. 3. Polymineralsk bornitt-chalkopyritt-inneslutning i pyritt. Streken er 40 μm lang.

Chalkopyritt, CuFeS_2

Chalkopyritt er det nest mest utbredte av de opake mineralene og utgjør opptil 14,2 % av undersøkte prøver (Tabell 1). I den mest grovkornede pyritmineraliseringen sees også en del mm-store korn i håndstykker. I mikroskopet sees tre hovedformer av chalkopyritten:

- poikilitiske inneslutninger i pyritt, med bornitt og evt. en lang rekke sjeldnere mineraler (Fig. 3)
- erstatning av og innfylling i sprekker i pyritt (Fig. 4).
- større uregelmessige korn, tilfeldig opptredende sammen kvarts og epidot, med kun sphaleritt og magnetitt som inneslutninger.

Chalkopyritt viser stedvis tvillingdannelse, og erstatter bornitt i flere korn, noe som kan skyldes dannelsen av idaitt. Noen steder synes inneslutningene å være lameller parallelt med pyrittens krystallplan. Chalkopyritt er sjelden i Trolla-mineraliseringen, noe som bekreftes kjemisk (Tabell 2, prøve 016).

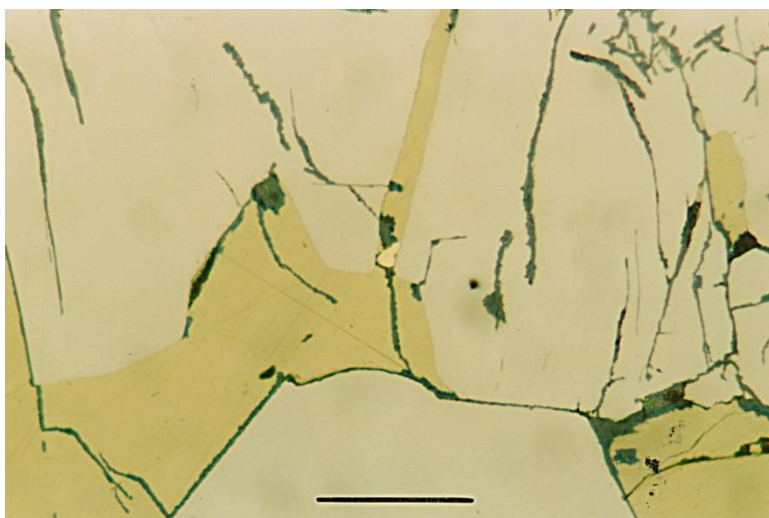


Fig. 4. Chalkopyritt (brungult) som trenger inn i pyritten. Et gult korn av elektrum sees i senter av bildet. Streken er 40 μm lang.

Covellin, CuS

Covellin opptrer alltid intimt sammenvokst med chalkopyritt eller bornitt, som den helt eller delvis erstatter, sporadisk sammen med digenitt. Noen av de større kornene viser anisotropi med det karakteristiske fargespillet (rødt til gult). Covellin er også funnet på kanten av chalkopyritt, der den ligger i kvarts, eller på sprekker i pyritt sammen med «limonitt».

Cubanitt, CuFe₂S₃

Det er kun én observasjon av dette mineralet. Den er svært lik pyrrhotitt i farge, men skiller seg med en karakteristisk anisotropifarge. Cubanitten opptrer som en lamell som går i gjennom et helt individ av chalkopyritt i den aktuelle inneslutningen. Lamellen er oppbygd av mindre individuelle korn med varierende anisotropieffekt.

Digenitt, Cu₉S₅

Dette blå, isotrope mineralet opptrer alltid nær covellin som erstatter bornitt eller chalkopyritt (ved Vintervannet kun bornitt). Få observasjoner er imidlertid gjort og identifiseringen er kun basert på optiske egenskaper.

Elektrum, (Au,Ag)

Det første funnet av gull-lignende korn ga bakgrunnen for undersøkelsene, og mikrosondeanalysene (Tabell 3) viste at dette var elektrum med mer enn 20 vekt-% Ag. Relativt høye verdier i analysene av Fe og S skyldes nærliggende pyritten. Elektrum er funnet i sju polerte tynnslip fra Vintervannet (Fig. 4) og ett fra Trolla. Kornstørrelsen av rundete korn er 1-7 µm. Mineralet opptrer i de karakteristiske bornitt-chalkopyritt-inneslutningene, ofte i selskap med ulike sjeldne faser, ellers i chalkopyritt som erstatter pyritt. I ett tilfelle lå elektrumkornet (5 µm) direkte i pyritt. Mineralet er lett å påvise i tynnslipene, og i Vintervannforekomsten er det kun elementært vismut som er i nærheten av samme høye reflektans.

Galenitt, PbS

Det er stor forskjell på galenittinnhold i Vintervannet og Trolla (henholdsvis 7 og 322 ppm, Tabell 2). I Trolla er mineralet vanlig i pyrittinneslutninger eller som 3-4 mm store korn i små, uregelmessige kvartsårer. I Vintervannforekomsten er galenitt kun identifisert under mikrosondeanalysen (Tabell 3).

Hematitt, Fe₂O₃

Mineralet er vesentlig funnet sammenvokst med ilmenitt. I ett av slipene er hematitt mer sentral i mineralselskapet, hvor det opptrer som euhedrale korn i, eller som sprekkefylling i pyritt. Martittisering er av og til observert og indikerer supergen omvandling.

Hessitt, Ag₂Te

Mineralet er observert i to polerte tynnslip fra Vintervannet, begge som innfylling i pyrittsprekker sammen med berryitt. Hessitten er gråbrun og klart anisotropisk, med farger fra matt gulaktig brun til mørk blågrå. Den har høyere poleringshardhet enn berryitt, og betydelig lavere reflektans. En kvalitativ mikrosondeanalyse viste kun sølv og tellur, og sammen med optiske egenskaper ble mineraler identifisert som hessitt.

Idaït, Cu₅FeS₆

Idaït er tilstede i mange av de større bornittkornene, som et nettverk av tynne lameller parallelt bornittens krystallplan. Mineralet sees lett på grunn av de grønne til røde anisotropifargene. Tynne

lameller av chalkopyritt opptrer sammen med idaitt. Disse ligger i andre retninger og skyldes antagelig avblanding. Lamellene er så tynne at de ikke har framkommet på noen bilder.

Ilmenitt, $FeTiO_3$

Ilmenitt er sjelden, men opptrer som små korn i kvarts nær sulfidene. Mineralet er stedvis sammenvokst med hematitt i slip fra Vintervannet.

«Limonitt»/goethitt, $Fe^{+3}O(OH)$

Jernoksyd utgjør lokalt 1-2 %, og dominerer i sene sprekker, dels sammen med covellin og som helst ligger i kontakt med chalkopyritt.

Mackinawitt, $(Fe,Ni,Co,Cu)_9S_8$

Dette sulfidet er lett å kjenne igjen som tynne, fiolettgrå, lamellære korn i chalkopyritt, nær pyrrhotitt og med sterk anisotropi.

Magnetitt, Fe_3O_4

Magnetitt er blant de få opake mineralene som kan sees i håndstykker hvor det opptrer som opptil 2-3 mm store korn og krystaller. Innholdet er ikke målt over 2 %. Kornene er poikolittiske med inneslutninger av pyritt og chalkopyritt. Sistnevnte lager en slags skjelettekstur, med lameller og linseformede korn parallelt krystallplanene i magnetitten.

Markasitt, FeS_2

Markasitt dannes ofte av pyrrhotitt. Mineralet er kun funnet i ett tynnslip fra Trolla, sammenvokst med pyrrhotitt og magnetitt.

Mckinstryitt, $Ag_{1.2}Cu_{0.8}S$

Dette sølvholdige mineralet ble oppdaget ved mikrosondeanalyser, da malmmikroskoperingen kun viste covellin i det aktuelle området i en av chalkopyrittinneslutningene. Mckinstryitt har tidligere i Norge blitt observert fra Godejord i Nord-Trøndelag (Bergstøl & Vokes 1974). Analysen (Tabell 3) korresponderer ikke eksakt med syntetisk mckinstryitt ($Ag_{1.2}Cu_{0.8}S$), men er nærmere $(Ag,Fe)_{1.06}Cu_{0.80}S$ (basert på $S=1$), med et visst underskudd av sølv.

Molybdenitt, MoS_2

Molybdenitt er kun funnet i chalkopyritt i to tynnslip fra Vintervannet, hvilket stemmer med et lavt Mo-innhold i bergartsanalysene (9 ppm, Tabell 2). I Trolla var snittinnhold noe høyere (16 ppm), og molybdenitts er observert i noen flere korn, vesentlig direkte i pyritten.

Pyritt, FeS_2

Rundt Vintervannet er pyritt sentralt, både som primærsulfid i kvartsårer ellers som del av omvandling av trondhemitt, enten som impregnasjon eller anriket ved kvartsårene. Disse årene som varierer fra 1 cm til flere meter tykke. Pyritt fra et lite, stratabundet lag på vestbredden av Vintervannet er ikke undersøkt mikroskopisk, men en kjemisk analyse viser et høyere Zn-Bi-innhold enn for hovedmineraliseringene (Tabell 2, prøve 001).

Pyritten opptrer i krystaller opptil 6 cm med flere tynne sprekker. Mindre krystaller har bedre utviklet krystallform og viser et langt lavere innhold av sporelementer. Oppsprekking sees også i mikroskala, med chalkopyritt som fyller inn (Fig. 4), dels parallelt med pyrittens krystallplan.

Ved Trolla følger pyritten rustne kvartsårer/ganger som gjennomsetter steinbruddet, også her med flest ulike mineraler i grovere partier.

Karakteristisk i undersøkte tynnslip er poikilitiske inneslutninger (Fig. 3) som er et vanlig teksturelt fenomen i både pyritt og andre porfyroblastiske mineraler. Både ved Vintervannet og i Trolla inneholder inneslutninger et relativt høyt antall kjemisk komplekse, opake mineraler. Inneslutningene kan være monomineralske med enten chalkopyritt, bornitt og sjeldnere berryitt eller elektrum. De kan også være polymineralske (Fig. 3). Størrelsen varierer fra submikroskopiske til maksimalt 0,2 x 0,4 mm med varierende formen. I tillegg til metalliske mineraler, inneholder pyritten også < 4-5 mm store korn av kvarts og krystaller av epidot. Ved Trolla synes pyritten å ha blitt dannet av pyrrhotitt, dels med markasitt som mellomprodukt.

Pyrrhotitt, $Fe_{1-x}S$

Pyrrhotitt opptrer helt ulikt i forekomstene ved Vintervannet og Trolla. I Vintervannet opptrer mineralet kun som små dråper og runde korn i chalkopyrittinneslutningene (< 20x20 μm). I Trolla finnes det mindre kvartsganger med nesten kun pyrrhotitt, dels med sekundære teksturer ("birds-eye"), og dels med dannelse av markasitt (supergen omvandling).

Rutil, TiO_2

Mineralet er sjelden ved Vintervannet, men opptrer sammen med pyritt i lokale mineraliseringer i grønnstein.

Sphaleritt, ZnS

Sphaleritt er uvanlig i forekomstene, og danner kun små, uregelmessige korn og lameller i den groveste chalkopyritten (< 25x25 μm). Likevel stor nok til å vise de karakteristiske interne reflekser i rødt. I Trolla opptrer mineralet sammen med magnetitt i pyrrhotitt-inneslutninger i pyritt, samt at det er funnet opptil 1 cm i den særegne biotitt-kalsittbergarten der.

Tennantitt, $(Cu,Fe)_{12}(As,Sb)_4S_{13}$

Mange av de studerte tynnslipene inneholder små, isotrope grå korn i bornitt-chalkopyritt-inneslutningene, men gjerne kun 1-3 stk. i hvert slip. En mikrosondeanalyse ga $(Cu,Fe,Bi)_{10.4}As_4S_{13}$, altså en Bi-rik tennantitt med et lite kobberunderskudd. Analysen (Tabell 3) viser god overenstemmelse med syntetisk tennantitt, både for S og As. Materialet fra Vintervannet viser god overenstemmelse med en analyse av Bi-rik tennantitt publisert av Palache *et al.* (1946).

Vismut, Bi

Elementært vismut ble bekreftet to ganger ved analyse av to gulaktige korn med høy reflektans (større enn pyritt). Det ene kornet som inneslutning i mineral 4 (Tabell 4), dels dekket med covellin. Mikrosondeanalysen viser et innhold av S, Ag, Cu og Fe som skyldes å være innflytelse av omliggende faser. Palache *et al.* (1946) omtaler spor av Te, As, Sb og S i elementært vismut.

Volynskitt, $AgBiTe_2$

Mineral ble funnet ved mikrosondeanalyser av små korn i altaitt-inneslutninger i pyrrhotitt fra Trolla-forekomsten. De optiske egenskaper under pålysmikroskopering er lik altaittens. Analysen (Tabell 3) ga $Ag_{0.99}Bi_{0.96}Te_2$, som er i god overensstemmelse med data fra Criddle & Stanley (1985).

Uidentifiserte opake mineraler

Det er mange opake mineraler som er oppdaget under mikroskopering av materiale fra Vintervannet og Trolla. Tilsammen 13 ulike opake mineraler er tolket som egne faser og beskrives med optiske og kjemiske data. Det er gjort til sammen 14 mikrosondeanalyser av disse. De fleste er funnet i bornitt-

chalkopyritt-inneslutningene fra Vintervannet, kun de to siste er ukjente faser fra Trolla-forekomsten. Basert på de kvantitative analysene (Tabell 4) er det forsøkt angitt kjemisk formel, samt mulig kandidater for disse mineralene. Optiske informasjonen er imidlertid ofte så begrenset at det ikke er grunnlag for videre identifisering.

Mineral 1A

Beregnet formel/kjemi: $\text{Cu}_2(\text{Bi,Fe})\text{S}_2$. Noe Ag i den ene analysen (Tabell 4). Ligner Mineral 1B.

Optiske egenskaper: Birefleksjon og anisotropi, fra svakt gulaktig til mørk blåfiolett.

Annet: Poleringshardhet høyere enn bornitt. Den nest vanligste (etter mineral 6) av de uidentifiserte

Mineral 1B

Beregnet formel/kjemi: $\text{Cu}_{13}\text{Bi}_5\text{S}_{13}$, med noe Fe og Ag.

Optiske egenskaper: Ligner mineral 1A.

Annet: Mindre korn enn mineral 1A. Wittichenite (Cu_3BiS_3) har mest lik formel, men ganske annerledes optiske egenskaper (Roberts *et al.* 1990).

Mineral 2

Beregnet formel/kjemi: $\text{Bi}_{<3}\text{Te}_{>2}\text{S}$.

Optiske egenskaper: Lysende, runde korn $< 15 \mu\text{m}$, vesentlig i bornitt. Høyere refleksjon enn pyritt, dog noe varierende.

Annet: Ligner kjemisk sulphotsumoitt ($\text{Bi}_3\text{Te}_2\text{S}$), tsumoitt (BiTe), ingoditt (Bi_2TeS). I mikroskop ikke lett å skille fra mineral 3.

Mineral 3

Beregnet formel/kjemi: $(\text{Ag,Cu})_5(\text{Bi,Fe})_9\text{Te}_9\text{S}_5$.

Optiske egenskaper: Som mineral 2.

Annet: Ikke avklart forholdet mellom mineral 2 og 3. Ikke funnet lignende mineral pr. 1992.

Mineral 4

Beregnet formel/kjemi: $(\text{Ag,Cu})_3\text{Bi}_6\text{S}_{12}$. Fe-innholdet i analysen antas å skyldes omliggende mineraler.

Optiske egenskaper: $< 50 \times 25 \mu\text{m}$, subhedrale, fiolettgrå korn i/ved chalkopyritt.

Annet: Funnet kun to korn. Benjaminitt ($(\text{Ag,Cu})_3(\text{Bi,Pb})_7\text{S}_{12}$) ligner kjemisk, men ikke optisk (Palache *et al.* 1946).

Mineral 5

Beregnet formel/kjemi: $(\text{Cu,Fe})\text{BiS}_2$ eller $(\text{Cu,Fe,Ag})_{10,0}\text{Bi}_{10,7}\text{S}_{23}$.

Optiske egenskaper: Brune korn, $< 10 \mu\text{m}$, i berryitt. Svak anisotropi, men effekten er kamuflert av berryittens optiske egenskaper.

Annet: Også noe Pb i analysen. Emplektitt (CuBiS_2), cuprobismuthitt ($\text{Cu}_{10}\text{Bi}_{12}\text{S}_{23}$) ligner kjemisk, men emplektitt har sterkt anisotropi. I mikroskop framtrer fasen dels som et "belegg" på berryitten.

Mineral 6

Beregnet formel/kjemi: Inneholder Mn og Ca som hovedelementer.

Optiske egenskaper: Sterk isotropi, dels med livlige blå farger.

Annet: Svart belegg (brun strek) mellom kvarts og epidotkorn, typisk manganoksydfarge. Markert fibrig i mikroskop, dels som matriks for mindre kolloforme inneslutninger med svakere anisotropi. Ligner kjemisk noe på marokitt (CaMn_2O_4) og takanelitt ($\text{Mn}^{2+}, \text{Ca, Mg} \text{Mn}^{4+}_3\text{O}_9 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$).

Mineral 7

Beregnet formel/kjemi: Muligens CdS, med noe Zn. Kun ett korn analysert.

Optiske egenskaper: Mørk, blågrått korn ($15 \mu\text{m}$) sammen med bornitt og mineral 1A. Isotropisk, med svake, dypt brunrøde interne reflekser (lik sinkblende).

Annet: Ligner kjemisk greenockitt eller hawleyitt (dimorfe mineraler), men disse skal ikke ha slike reflekser. Høyere poleringshardhet enn chalkopyritt.

Mineral 8

Beregnet formel/kjemi: Domineres av Cu, S og Fe med noe Bi + Mn.

Optiske egenskaper: Små ($< 50 \mu\text{m}$) blålig grå korn i chalkopyritt, nært mineral 1B. Antatt isotropt.

Annet: Eneste analyse av sulfider med Mn. Ligner visuelt en del på mineral 7.

Mineral 9

Beregnet formel/kjemi: Domineres av Pb, Cu, S, noe Fe + Bi, samt spor av Au og Te.

Optiske egenskaper: Lys, fiolettgrå fase inne i mineral 1B (mørkere), $< 15 \mu\text{m}$. Sterk anisotropi (gulbrun til blåsort) og svak bireflektans.

Annet: Ingen lignende mineraler.

Mineral 10

Beregnet formel/kjemi: $\text{Cu}(\text{Bi, Fe})_3\text{S}$. Også 1,15 % Au, noe Ag + Mn.

Optiske egenskaper: Gult korn ($0,01 \text{ mm}$) dels dekket av covellin/»limonitt«. Anisotropisk (fra lett grønnlig gul til grålig brun).

Annet: Ingen lignende mineraler.

Mineral 11

Beregnet formel/kjemi: Dominert av Ag, Te, Cu, S, samt noe Fe, Bi, Au og Hg.

Optiske egenskaper: Lysegrå korn i inneslutning med bornitt og mineral 1A

Annet: Ingen lignende mineraler.

Mineral V4

Beregnet formel/kjemi: Dominert av Bi, Te og S.

Optiske egenskaper: Lysegrå korn i inneslutninger i pyritt. Blek gulhvit anisotropi.

Annet: To analyser som dokumenterer helt annerledes kjemi enn noen av de andre fasene.

Mineral V5

Beregnet formel/kjemi: Inneholder Pb, Bi, Te og S, og noe mindre Fe og Ag.

Optiske egenskaper: Små korn inne i mineral V5, ikke observert optiske egenskaper. Påvist vha SEM/backscatter.

Annet: Ingen øvrige data.

Diskusjon

Forekomstene er spesielle i de norske kaledonidene på grunn av de beskrevne malmmineralene med et stort antall identifiserte og uidentifiserte faser med Ag, Te, Bi, Cd, Mn, Au, Pb, Fe, Cu, Zn, As og S. Nær sammenheng til trondhemitten og hydrotermale løsninger er åpenbar. Hydrotermal aktivitet vises også svært tydelig med den svært omvandlede trondhemitten rundt Vintervannet. Den nære sammenhengen mellom disse effektene og graden/antallet sulfidholdige kvartsganger, antyder sterkt at de samme hydrotermale løsninger har forårsaket dannelse av alle malmmineralene.

Mineraliseringen kan deles inn i:

- Første fase med dannelse av kvarts og pyritt og sannsynligvis få andre mineraler.
- Andre fase med komplekse metalliske løsninger med variert kjemi danner poikilitiske inneslutninger i pyritten.
- Siste fase med chalkopyritt som erstatter/fyller inn i pyritt, og med introduksjon av supergene mineraler (covellin, «limonitt», mineral 6) i sprekker og på mineralgrenser. Martittisering av magnetitt og omvandling av bornitt hører sannsynligvis med i samme fase.

De kjemiske analysene (Tabell 2) viser jevnt over lavere verdier for de fleste metallene, og med bakgrunn i dette er det høye antallet polymetalliske mineral noe forunderlig. Studier har vist at metallinnholdet er betydelig lavere enn i kaledonske massive sulfidforekomster, som også inneholder Bi-Te-Ag-mineraler (Sulitjelma, Stekenjokk, Røros). Mineralogisk viser forekomsten ved Vintervannet større likheter med kobberførende kvartsganger i Telemark, hvor imidlertid pyritt er helt underordnet i mineraliseringen.

Totalt sitter vi igjen med 27 identifiserte og 13 uidentifiserte mineraler. Dette inkluderer uvanligheter som elementært vismut, altaitt, aikinitt, berryitt, hessitt, volynskitt og mckinstryitt. De fleste av de sjeldne mineralene er kun funnet på én av forekomstene. Muligheten for å finne flere korn av disse mineralene er nok proporsjonal med antallet studerte slip av originalmaterialet, og mulighet for å finne ytterligere mineraler vil nok være høy ved ytterligere studium. Det er også viktig å notere seg at med det lave Au-innholdet som de kjemiske analysene viste, er det nokså uvanlig å finne gull/elektrum i det hele tatt ved pålysmikroskoperingen.

Takk

Jeg vil takke NTNU, Institutt for Geologi og Bergteknikk som ga meg anledning til å jobbe med dette herlige materiale. Dessverre kunne aldri noe fullverdig studium av dette fullføres, og en mer vitenskapelig publisering av materiale lot seg ikke gjøre. En spesiell takk til Gunnar Juve, NGU, for tallrike samtaler om Vintervannet.

Referanser

- Bergstøl, S. & Vokes, F.M. (1974): Stromeyerite and mckinstryite from the Godejord polymetallic sulphide deposit, central Norwegian Caledonides. *Mineralium Deposita* **9**, 325-337.
- Criddle, A.J. & Stanley, C.J. (1985): *The quantitative data file for ore minerals*. British Museum (Natural History), London. 420 s.

- Grenne, T., Grammelvedt, G. & Vokes, F.M. (1980): Cyprus-type sulphide deposits in the western Trondheim district, central Norwegian Caledonides. *Proceedings International Ophiolite Symposium, Cyprus 1979, Geological Survey of Cyprus*, 727-743.
- Lowry, D., Stephens, W.E., Herd, D.A. & Stanley, C.J. (1994): Bismuth sulphosalts within quartz veining hosted by the Loch Shin monzogranite, Scotland. *Mineralogical Magazine* **58**, pp 39-47.
- Palache, C., Berman, H. & Frondel, C. (1946): Dana's system of mineralogy, Vol I. 7th edition, New York.
- Roberts, W.L., Campbell, T.J., Rapp, Jr. G.R. (1990): *Encyclopedia of minerals*. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 979 s.
- Slagstad, T. (2003): Geochemistry of trondhjemites and mafic rocks in the Bymarka ophiolite fragment, Trondheim, Norway: Petrogenesis and tectonic implication. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **83**, 167-185.
- Wolff, F.C. (1979): Beskrivelse til de berggrunnsgeologiske kart Trondheim og Østersund 1:250 000. *Norges Geologiske Undersøkelse* **353**, 1-76.

Tabell 3. Mikrosondeanalyser av identifiserte mineraler fra Vintervannet og Trolla*.

	Aikinitt	Altaitt*	Altaitt*	Berryitt	Berryitt	Vismut	Vismut	Elektrum	Galenitt	Mckinstryitt	Tennantitt	Volynskitt*
	vekt-%											
Fe	0,71	1,61	3,39	0,68	1,34	0,79	1,51	4,60	2,61	1,51	3,67	2,89
Pb	36,47	60,10	58,51	20,19	22,62				83,97			1,26
Cu	11,94			6,57	7,12	0,92	2,19	1,25	1,38	25,88	37,06	
S	17,06	0,12	0,18	17,54	17,45	1,56	4,74	16,77	14,32	16,13	27,65	0,42
Au		0,22	0,25					60,81				
Ag		0,21	0,19	8,90	8,79	1,04	0,27	28,21	0,99	55,00	1,06	18,28
As					0,70						20,41	
Bi	34,96			45,68	44,13	91,80	87,14		2,39		9,22	34,62
Te		39,38	37,17	0,06	0,07					0,08	1,53	43,94
Hg												
Cd												
Mn	0,02											
Total	101,15	101,64	99,69	99,62	102,22	96,11	95,85	111,64	105,66	98,60	100,60	101,41
	atom-%											
Fe	1,17	4,53	9,41	1,14	2,19	2,65	4,29	6,87	4,93	1,87	3,55	6,88
Pb	16,37	45,80	43,94	9,18	10,00				43,02			0,81
Cu	17,33			9,66	10,18	2,73	5,45	1,63	2,28	27,97	31,34	
S	49,54	0,60	0,87	51,91	49,91	9,21	23,53	43,79	47,47	34,86	46,77	1,75
Au		0,18	0,20					25,79				
Ag		0,31	0,27	7,76	7,45	1,82	0,40	21,83	0,98	35,23	0,53	22,59
As					0,85						14,73	
Bi	15,54			20,58	19,82	83,01	66,24		1,21		2,39	22,10
Te		48,53	45,14	0,04	0,05					0,04	0,65	45,82
Hg												
Cd												
Mn	0,04											

Tabell 4. Mikrosondeanalyser av uidentifiserte mineraler fra Vintervannet og Trolla*.

	Min. 1A	Min. 1A	Min. 1B	Min. 1B	Min. 2	Min. 3	Min. 4	Min. 5	Min. 8	Min. 9	Min. 10	Min. 11	Min. V4*	Min. V4*	Min. V5*
	vekt-%														
Fe	1,16	2,10	1,52	1,54	1,12	3,52	0,57	1,66	17,24	4,93	2,97	1,33	1,99	1,97	0,43
Pb							0,92	0,66		58,51			7,36	7,50	44,75
Cu	34,40	33,16	39,35	39,29	2,61	2,32	1,52	15,47	36,88	20,34	19,92	8,74			
S	17,23	15,30	19,59	19,76	3,25	4,09	18,36	20,24	30,81	16,05	18,77	6,66	5,37	5,45	9,40
Au										0,17	1,15	0,18			
Ag		1,80	0,41	0,87		12,85	13,48	0,41			0,73	60,34			0,32
As															
Bi	47,17	45,38	40,19	40,31	65,63	46,30	63,02	61,45	15,34	1,56	55,59	1,29	50,39	51,64	28,22
Te					29,99	37,16				0,09		21,36	33,37	31,44	17,20
Hg												0,14			
Cd														0,01	
Mn									2,12		0,02				
Total	99,96	97,73	101,06	101,77	102,61	107,24	97,87	99,89	102,39	101,65	99,15	100,04	98,47	98,01	100,32
	atom-%														
Fe	1,58	2,95	1,87	1,88	2,83	7,07	0,98	2,45	15,71	,34	4,31	2,15	0	479	,97
Pb							0,43	0,26		23,57			4,79	4,93	27,35
Cu	40,85	40,84	42,38	42,05	5,77	4,08	2,29	20,05	29,40	26,50	25,29	12,40			
S	40,55	37,71	42,21	42,29	14,26	17,87	55,21	52,45	49,13	41,81	47,67	18,88	22,65	23,17	37,15
Au										0,07	0,47	0,08			
Ag		1,31	0,26	0,55		13,38	12,01	0,31			0,55	50,72			0,37
As															
Bi	17,03	17,12	13,26	13,21	44,12	24,91	29,01	24,39	3,74	0,62	21,61	0,56	32,52	33,61	17,09
Te					33,03	32,64				0,06		15,15	35,16	33,42	17,00
Hg												0,06			
Cd														0,01	
Mn									1,97		0,03				

Mikrosondeanalysene ble utført vha JEOL 733 Superprobe på Institutt for Kontinentalundersøkelser (IKU), Trondheim. Følgende standarder er brukt: PbS, (Fe,Ni)₉S₈, CuFeS₂ og rent Au, Ag, Te, Bi, Co og As. Aksellerasjonsspenning 25 kV og strålestrøm 20 nA.