



Fig. 3. Således kan et snit gennem den øverste del af jordskorpen og vulkanen over Gardiner komplekset have set ud for 50 mill. år siden. (efter Nielsen 1994).

# Et unikt mineralselskap av magnesiumfosfater fra magnesitt-serpentin-forekomster på Modum

Gunnar Raade

## INNLEDNING

Det er i alt kjent 13 forekomster av magnesitt-serpentin i Modum (Jøsang, 1966). Vest for Snarumselva har vi følgende, fra sør mot nord: Trekasthøgda, Tingelstادتjern, Overntjern, Ammundrud, Hulebak, Flaten, Nes, Langerud og Sandfall. Øst for Snarumselva finnes disse, fra sør mot nord: Laupmyr, Nedre Dypingdal, Øvre Dypingdal og Liaæs.

Det er vel Dypingdal som er mest kjent blant mineralsamlere. Jeg har ledet ganske mange ekskursionsjoner til denne og andre av disse forekomstene i årenes løp. Jeg har også vært med på ekskursionsjoner ledet av andre. Det som da har slått meg, er at det aldri, så vidt jeg kan huske, har vært nevnt noe om *dannelsen* av magnesitt-serpentin-forekomstene, dvs. hva har de opprinnelige bergartene bestått av?

Det er to mulige opprinnelser: (1) bergartene har opprinnelig vært karbonat-sedimenter, magnesium (og silisium) er tilført senere og bergartene er metamorfosert; (2) de har opprinnelig vært ultramafiske og olivinrike, CO<sub>2</sub> er tilført senere og bergartene er metamorfosert.

Jeg har publisert geokjemiske data (Raade, 1986) som etter min mening tyder på at vi har å gjøre med omdannede ultramafiske bergarter: stabile isotoper (karbon og oksygen) i magnesitt, fordeling av lantanoider i apatitt, relativt høye verdier for nikkell (90-100 ppm) i forsteritt og serpentin, høyt arseninnhold i fosfater. Fra aktiveringsanalyser har jeg også indikasjon på at krominnholdet i aluminiumrike mineraler (spinell og hydrotalkitt) er relativt betydelig, men jeg kan ikke tallfeste dette (det ble brukt epitermisk bestråling, men krom bestemmes best etter termisk bestråling). Jeg har merket meg at Andersen & Munz

(1995, p. 159) kun nevner den ene muligheten, nemlig sedimentær opprinnelse.

## FOSFATMINERALISERING

Noen av de sydligste og vestligste forekomstene - Tingelstادتjern og Overntjern - er karakterisert ved opptreden av fosfater, både apatitt og diverse magnesiumfosfater, hvorav de fleste er originalbeskrevet fra Tingelstادتjern:

- Althausitt** (Raade & Tyssealand, 1975).  
 $Mg_4(PO_4)_2(OH,O)(F,\square)$ . *Pnma*. *R* = 2,2% (Rømming & Raade, 1980).  
Magnesium forekommer både i 5- og 6-koordinasjon. Magnesium-oktaedre med felles kanter danner kjeder langs *b*-aksen. Hydroksyl og fluor er i stor grad ordnet i alternerende posisjoner langs "kanaler" parallelt med *b*. Okkupasjonsfaktoren for fluorposisjonen er 0,81, dvs. det er 19% vakanser (tomplasser).
- Holtedahllitt** (Raade & Mladeck, 1979).  
 $Mg_{12}(PO_3OH,CO_3)(PO_4)_5(OH,O)_6$ . *P31m*. *R* = 3,1% (Rømming & Raade, 1989).  
Par av magnesium-oktaedre med felles flater(!) danner dobbeltkjeder langs *c*-aksen ved å ha felles kanter. Hydrogenfosfat-grupper på tretallige akser er delvis erstattet av karbonatgrupper (populasjonsfaktor 0,24 for karbon). Det er strukturelle likheter med fosfoellenbergritt.

3. **Heneuitt** (Raade *et al.*, 1986).  $\text{CaMg}_5(\text{CO}_3)(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ . *P*-1.  $R = 2,6\%$ . (Rømming & Raade, 1986).  
Kalsium forekommer i 8-koordinasjon, Mg(1)-Mg(4) i 6- og Mg(5) i 5-koordinasjon.
4. **Fosfoellenbergeritt** (Raade *et al.*, 1998). [Typelokalitet: Dora Maira, Italia]  
 $\text{Mg}_{14}(\text{PO}_3\text{OH}, \text{CO}_3)_2(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_6$ . *P*<sub>63</sub>*mc.*  $R = 2,7\%$  (Raade *et al.*, 1998).  
Strukturen har samme type doble kjeder som hos holtedahllitt; i tillegg opptrer enkle kjeder av magnesium-oktaedre med felles kanter. Hydrogenfosfat-grupper på tretallige akser er delvis erstattet av karbonat (populasjonsfaktor 0,38 for karbon); samme fenomen finnes hos holtedahllitt.
5. **Raadeitt** (Chopin & Brunet, 1998).  $\text{Mg}_7(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_8$ . *P*<sub>21</sub>/*n*.  $R = 2\%$  (Chopin & Brunet, 1998).  
Mineralet er isostrukturelt med allaktitt,  $\text{Mn}_7(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_8$ .  
Strukturen er komplisert med mangan/magnesium-oktaedre knyttet sammen med felles hjørner, kanter og flater (Moore, 1968).

Althausitt og holtedahllitt har ideelle formler  $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$ . Under mitt opphold som Humboldt-stipendiat ved Universität Karlsruhe 1979-1980 utførte jeg hydrotermalsynteser i systemet  $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)(\text{OH}) - \text{Mg}_2(\text{PO}_4)\text{F}$  (Raade, 1980). Det viste seg at det finnes hele fem polymorfer av hydroksyl-endeledet, men bare én fluorfase (wagneritt) (Raade, 1990). De fem polymorfene er:  $\alpha$ -fase (lavtemperatur; struktur som olivenitt, libethenitt, etc.);  $\beta$ -fase (OH-analogen til wagneritt) (Raade & Rømming, 1986b);  $\gamma$ -fase (svarer til holtedahllitt);  $\delta$ -fase (svarer til althausitt);  $\varepsilon$ -fase (høytemperatur) (Raade & Rømming, 1986a).

To kjemisk forskjellige apatitter opptrer sammen med magnesiumfosfater i

Tingelstادتjern-forekomsten. Den ene er en klorapatitt med 4% Cl, den andre en hydroksylapatitt (Raade, 1986). En mørkebrun, thoriumrik apatitt er typisk for Overntjern. Althausitt omdannes lett til apatitt langs sprekker og spalteplan; althausitt fra Overntjern er i særlig stor grad omdannet på denne måten.

I Overntjern-forekomsten opptrer det et metamikt magnesiumfosfat med ca. 10%  $\text{ThO}_2$ . Det er brunt og glassaktig. Ved oppvarming til 1000°C dannes det en blanding av farringtonitt,  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ , og thorianitt,  $\text{ThO}_2$ . Det er umulig å si hva dette mineralet har vært opprinnelig, da det ikke opptrer med krystallflater. Det kan muligens være en metamikt holtedahllitt.

## STABILITETSFORHOLD

Mine egne undersøkelser i systemet  $\text{MgO} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{H}_2\text{O} - \text{F}$  var begrenset oppad til et trykk på 7 kbar og en temperatur på 750°C (Raade, 1990). Brunet og medarbeidere har nylig publisert resultater av faseundersøkelser i det tilsvarende fluorfrie system i områdene 500-1100°C og 2-30 kbar (Brunet *et al.*, 1998). De oppnådde å syntetisere fire av de fem polymorfene av  $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$  (unntatt  $\alpha$ -fasen, som er stabil ved lave temperaturer). Holtedahllitt er relativt sett en lavtemperaturfase (< 600°C);  $\varepsilon$ -fasen dannes ved høy temperatur og lavt trykk og  $\beta$ -fasen (tilsvarende wagneritt) ved høy temperatur og høyt trykk. Det mellomliggende stabilitetsfeltet for althausitt strekker seg fra 3kbar/500°C til omkring 12kbar/800°C. Fosfoellenbergeritt er en høytrykksfase som er stabil over 8.5 kbar ved 650°C, over 22.5 kbar ved 900°C og over 30 kbar ved 975°C. Fosfoellenbergeritt fra Tingelstادتjern inneholder karbonat, og det er usikkert hvordan dette påvirker stabilitetsforholdene. Raadeitt er blitt syntetisert fra 3 til 15 kbar ved 500°C (Chopin & Brunet, 1998). Munz (1990) fant at Modum-komplekset er metamorfosert ved 600-750°C og 6-8 kbar.

## REFERANSER

- Andersen, T. & Munz, I. A. 1995: Radiogenic whole-rock lead in Precambrian metasedimentary gneisses from South Norway: evidence of Sveconorwegian LILE mobility. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 75, 156-168.
- Brunet, F., Chopin, C. & Seifert, F. 1998: Phase relations in the  $MgO-P_2O_5-H_2O$  system and the stability of phosphoellenbergerite: petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 131, 54-70.
- Chopin, C. & Brunet, F. 1998: Raadeite,  $Mg_7(PO_4)_2(OH)_8$ : toward a humite-type series in Mg-phosphates? *Abstracts 17<sup>th</sup> General Meeting, International Mineralogical Association*, Toronto, Canada, p. A99.
- Jøsang, O. 1966: Geologiske og petrografiske undersøkelser i Modumfeltet. *Norges Geologiske Undersøkelse*, 235, 148 pp.
- Moore, P. B. 1968: Crystal chemistry of the basic manganese arsenate minerals: II. The crystal structure of allactite. *American Mineralogist*, 53, 733-741.
- Munz, I. A. 1990: Whiteschists and orthoamphibole-cordierite rocks and the *P-T-t* path of the Modum Complex, South Norway. *Lithos*, 24, 181-200.
- Raade, G. 1980: Hydrothermal-Synthesen von Wagnerit, Althausit und Hortedahlit (das System  $Mg_2PO_4F - Mg_2PO_4OH$ ). *Fortschritte der Mineralogie*, 58 (Beiheft 1), 107-108.
- Raade, G. 1986: Petrogenesis of serpentine-magnesite deposits at Modum, South Norway: A progress report. In: *Metallogeny of basic and ultrabasic rocks (regional presentations)*. Theophrastus Publications S. A., Athens, 451-479.
- Raade, G. 1990: Hydrothermal syntheses of  $Mg_2PO_4OH$  polymorphs. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, 289-300.
- Raade, G. & Mladeck, M. H. 1979: Hortedahlite, a new magnesium phosphate from Modum, Norway. *Lithos*, 12, 283-287.
- Raade, G. & Rømming, C. 1986a: The crystal structure of  $\epsilon$ - $Mg_2PO_4OH$ , a synthetic high-temperature polymorph. *Zeitschrift für Kristallographie*, 177, 1-13.
- Raade, G. & Rømming, C. 1986b: The crystal structure of  $\beta$ - $Mg_2PO_4OH$ , a synthetic hydroxyl analogue of wagnerite. *Zeitschrift für Kristallographie*, 177, 15-26.
- Raade, G. & Tyssleand, M. 1975: Althausite, a new mineral from Modum, Norway. *Lithos*, 8, 215-219.
- Raade, G., Mladeck, M. H. & Din, V. K. 1986: Heneuite,  $CaMg_5(CO_3)(PO_4)_3(OH)$ , a new mineral from Modum, Norway. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, 343-350.
- Raade, G., Rømming, C. & Medenbach, O. 1998: Carbonate-substituted phosphoellenbergerite from Modum, Norway: Description and crystal structure. *Mineralogy and Petrology*, 62, 89-101.
- Rømming, C. & Raade, G. 1980: The crystal structure of althausite,  $Mg_4(PO_4)_2(OH,O)(F,\square)$ . *American Mineralogist*, 65, 488-498.
- Rømming, C. & Raade, G. 1986: The crystal structure of heneuite,  $CaMg_5(CO_3)(PO_4)_3(OH)$ . *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, 351-359.
- Rømming, C. & Raade, G. 1989: The crystal structure of natural and synthetic hortedahlite. *Mineralogy and Petrology*, 40, 91-100.

## TILLEGG

Oppsummering av mineralopptreden

### Tingelstادتjern

Althausitt (typelokalitet)  
Holtedahllitt (typelokalitet)  
Heneuitt (typelokalitet)  
Fosfoellenbergeritt  
Raadeitt (typelokalitet)  
Klorapatitt  
Hydroksylapatitt

### Overntjern

Althausitt  
Metamikt, thoriumrikt magnesiumfosfat  
Thoriumholdig, brun apatitt  
Apatitt etter althausitt