

Høy-temperatur kontaktmetamorfose av kalkholdige sedimenter ved Flekkeren, Skien

Bjørn Jamtveit, Sven Dahlgren og Håkon Austrheim

Innledning

Kontaktmetamorfose av kalkholdige sedimentære bergarter har vært gjenstand for tallrike studier siden Goldschmidt's banebrytende avhandling fra 1911 om kontaktmetamorfosen i 'Kristiania-feltet' (Goldschmidt, 1911). Hvilke mineralselskaper som dannes under metamorfose kontrolleres primært av fire faktorer: dannelsetrykk og -temperatur; sammensetningen på den væske som til enhver tid fyller bergartens porerom; og bergartens kjemiske sammensetning. Observerte mineralselskaper i kontaktmetamorf kalksteiner reflekterer et vidt spenn i dannelsesbetingelser (se Tracy og Frost, 1991). Dannelses temperaturer på over 1000 °C er rapportert rundt mafiske dypbergarter som f.eks. gabbrointrusjoner. Bergartsmelten (magmaet) som gir opphav til gabbroiske intrusjoner er mye varmere (anslagsvis ca 1200-1300 °C) enn de som gir opphavet til surere intrusiver som monzonitter, syenitter og granitter (anslagsvis 750-900°C) og inneholder svært lite oppløst vann (H₂O). Dette er til forskjell fra de surere bergartsmelter som, avhengig av trykket, kan inneholde flere vektprosent oppløst H₂O. Mye av dette vannet frigjøres når den sure dypbergart krystalliserer og vil da også inneholde større eller mindre mengder med oppløste salter. Kontaktmetamorfose av sedimentære og andre bergarter rundt sure dypbergarter er derfor ofte ikke bare kontrollert av en temperaturøkning, men også av tilførsel av saltholdige vannløsninger fra det krystalliserende magma. Tilførsel av vannrike væsker i en karbonat-holdig bergart ved høy temperatur vil være en pådriver for mineralreaksjoner hvor karbonat-mineraler (kalkspat eller dolomitt) brytes ned ved frigivelse av karbondioksyd og metan (mengdeforholdet av disse er avhengig av redox betingelsene) og hvor kalsium-rike silikat mineraler (kalksilikater) dannes.

Kontaktmetamorfose i Oslofeltet er knyttet til en rekke sure dypbergarter som krystalliserte på relativt grunt dyp i jordskorpen i øvre karbon og permtiden (for 250-300 millioner år siden). Nyere studier (Jamtveit et al., 1992 a,b; Jamtveit og Andersen, 1993; Svensen og Jamtveit, in prep) viser at kontaktmetamorfose av skifre og kalker av kambrisk til silurisk alder ('Kambrosilur') i stor grad er påvirket og delvis drevet av vanninntrengning fra den krystalliserende bergartsmelte. Fordi bergartsmeltene som ga opphav til de sure dypbergarter hadde relativt lav temperatur og fordi de umetamorf bergartene i utgangspunktet var relativt kalde (anslagsvis ca. 100 °C), har de fleste kontaktmetamorf skifre og kalksteiner i Oslofeltet ikke

vært utsatt for høyere temperaturer enn 400-500 °C. I det følgende skal vi presentere det første vel-dokumenterte funn av høy-temperatur (T ca. 850 °C) kontaktmetamorfose av karbonater i Oslofeltet (se Jamtveit et al., in prep, for en mer fullstendig faglig dokumentasjon). Funnet er gjort ved vannet Flekkeren i Sauheradjella, ca. 30 km nord for Skien. Her finnes en stor blokk (en xenolitt) av lagdelte skifere og kalkbergarter som har falt inn i den monzonittiske bergartsmelte som ved krystallisering og avkjøling ble en larvikittisk del av Skrim batolitten. Den monzonittiske bergarten krystalliserte for ca 280 millioner år siden. Den skifre og kalkholdige blokken ble varmet opp til temperaturer over smeltepunktet for omkringliggende dypbergart, og på ulike stadier ble den også utsatt fra inntrenging både av saltholdige løsninger fra den krystalliserende bergartsmelte og senere også av meteorisk vann (grunnvann / overflatevann).

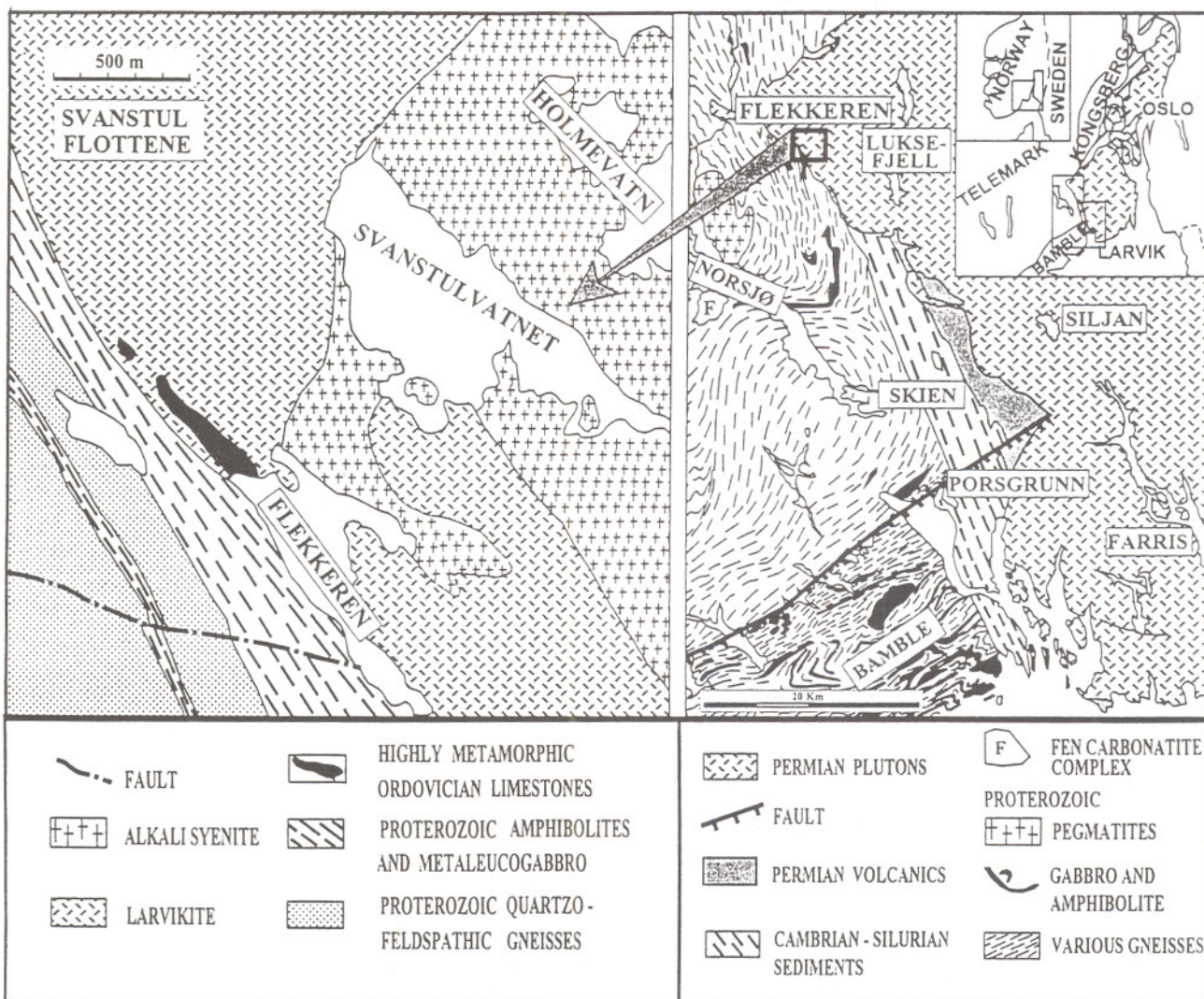
Disse prosessene førte til dannelse av en usedvanlig mineralrikdom. I de undersøkte kontaktmetamorf karbonatbergartene har vi hittil funnet ca. 65 ulike mineraler. Av disse er minst 15 ikke tidligere beskrevet fra Norge og inntil fire av disse mineralene er trolig ikke tidligere beskrevet. Tabell 1 inneholder en liste over de observerte mineral-endeledd [for noen mineralgrupper som granatene, har vi funnet stor variasjon i kjemisk sammensetning, og flere mineralnavn (-endeledd) kreves for å beskrive variasjonen innen gruppen].

Geologien i Flekkern området

Figur 1 viser et forenklet geologisk kart av Flekkern området og den sydlige del av Oslofeltet. Skifre og kalkbergartene ved Flekkern er trolig av over-ordovicisk alder. De dominerende kalkholdige bergarter har trolig vært knollekalker hørende til Steinvika formasjonen i vest og Herøya formasjonen i øst. Disse er adskilt av skifre tilhørende Venstøp formasjonen. Den kontaktmetamorf 'sediment-blokken' ved Flekkern er blottet i mindre veiskjæringer langs nordre ende av Flekkeren. Blokken er minst 500 meter lang og mindre enn 100 meter bred og er lokalt gjennomvannet av små årer som utgår fra omkringliggende dypbergart. De originale sedimentære lag er vanligvis mm til cm tykke og sammensetningen varierte fra rene karbonat (kalkspat-) lag til kalkholdige skifre (mergel).

Petrografi og mineralkjemi

Prøvene fra Flekkeren inneholder mineraler dannet på ulike stadier og ved ulike fysiske og kjemiske betingel-



Figur 1. Forenklet geologisk kart over Flekkeren området (til venstre; Dahlgren, in press) og den sydlige delen av Oslo riften (til høyre; Dahlgren, in press).

ser under den kontaktmetamorf hendelsen. De observerte mineraler er knyttet til fire ulike stadier av metamorfosen (stadium I - IV), hvor stadium I representerer forholdene under metamorfosis maksimum (d.v.s. høyest temperatur) og stadium II-IV representerer forholdene ved avtagende temperatur. Dette er i første rekke gjort for å relatere dannelsen av ulike mineraler til ulike tidspunkt i bergartens metamorfe historie og betyr ikke at man antar at den metamorfe prosess er diskontinuerlig og trinnvis.

De fleste av bergartene er relativt finkornede med kornstørrelse på 0.1-1 mm. Karbonat-rike bergarter er de mest grovkornede, ofte med kornstørrelse på flere mm. Euhedrale korn er ikke vanlig, men klinopyroksen opptrer i noen tilfeller som mm til cm store krystaller. Mineralene som ble dannet og var stabile i karbonatholdige bergarter ved stadium I betingelse er: (foruten kalkspat) wollastonitt, klinopyroksen, granat, flogopitt, melilitt, cuspidin, kalsilitt, nefelin, perovskitt, baghdaditt (kun beskrevet en gang tidligere; se Al-Hermezi et al., 1986) og et nytt Th-rikt mineral i apatitt gruppen (Figur 2). Disse mineralene er dannet ved at de originale sedimentære mineraler og metamorfe

mineraler dannet før metamorfosis maksimum (før stadium I), har reagert med kalkspat under frigivelse av CO₂ eller CH₄. Produksjonen av stadium I mineralogien kan beskrives ved en rekke såkalte 'dekarbonatiseringsreaksjoner' som f.eks. (reaksjonene er ikke balanserte):

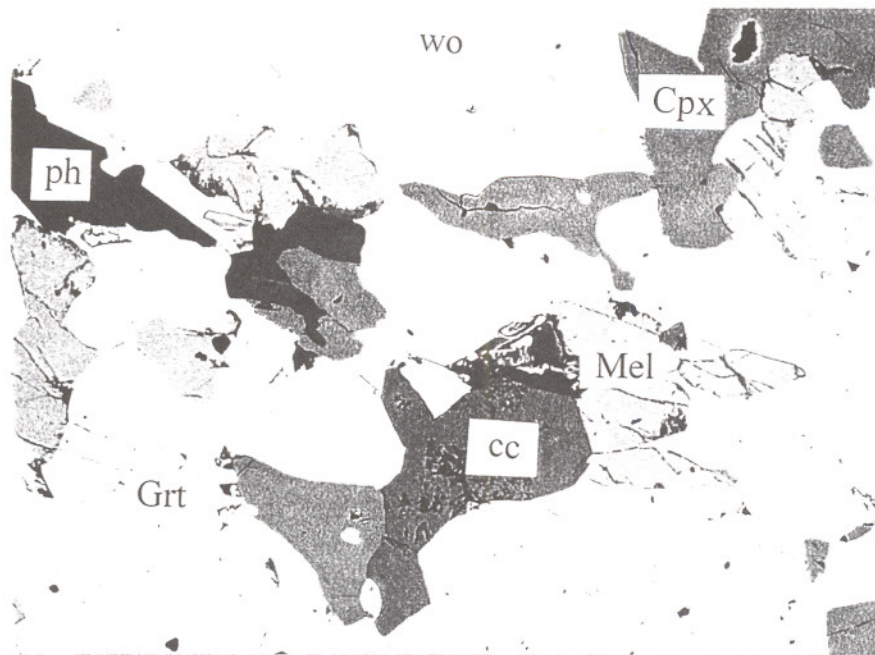
- (1) $cc + di = ak + CO_2$
- (2) $kfs + cc = ks + wo + CO_2$
- (3) $ab + cc = ne + wo + CO_2$
- (4) $ti + cc = pe + wo + CO_2$
- (5) $wo + cc + HF = cu + CO_2 + H_2O$
- (6) $zr + cc = bd + CO_2$
- (7) $ap + wo + cc + to/th = Th\text{-apatitt} + CO_2$

Tabell 1 viser formler og forkortelser av mineralnavn. De fleste av disse reaksjonene produserer Si-fattige silikat-mineraler og CO₂. Produksjon av CO₂ fører til at disse reaksjonene genererer et relativt høyt væsketrykk i bergartens porerom ved stadium I. Fordi det totale volum av faste faser synker gjennom de CO₂-produserende reaksjoner vil disse reaksjonene kunne

Table 1. Forkortelser og formler for observerte mineraler i kalksteiner og kalksilikat bergarter fra Flekkeren

	<i>navn</i>	<i>formel</i>	<i>petrografisk status</i>
ab	albit	NaAlSi ₃ O ₈	Stadium IV
ad	andraditt	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂	Stadium IV
ak	akermanitt	Ca ₃ Mg ₂ Si ₂ O ₇	Stadium I
al	alabanditt	MnS	Stadium I?
an	anorthitt	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Stadium I *
ap	apatitt	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	detritiske korn
au	augitt (fassaït)	Ca(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆	Stadium I
ba	baddeleyitt	ZrO ₂	inclusions in zircon
bg	baghdaditt	Ca ₃ ZrSi ₂ O ₉	Stadium I
br	britholitt	(LREE,Ca) ₅ (SiO ₄ ,PO ₄) ₃ (OH)	Stadium I
cc	kalsitt	CaCO ₃	all assemblages
cr	kromitt	FeCr ₂ O ₄	detritiske korn
cu	cuspidin	Ca ₃ Si ₂ O ₇ (F,OH) ₂	Stadium I
di	diopsid	CaMgSi ₂ O ₆	Stadium II
dj	djerfisheritt	K ₆ (Fe,Ni) ₂₅ S ₂₆ Cl	Stadium II
ga	blyglans	PbS	detritiske korn
gp	grafitt	C	Stadium I?
gr	grossular	Ca ₃ Al ₂ Si ₂ O ₁₂	Stadium II
gu	giuseppettitt	(Na,K,Ca) ₇₋₈ (Si,Al) ₁₂ O ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁₋₂	Stadium IV
hb	hillebranditt	Ca ₃ SiO ₃ (OH) ₂	Stadium II?
hi	hibschitt	Ca ₃ Al ₂ Si _{3-x} O ₁₂ (OH) _{4x} (x=0.2-1.5)	Stadium IV
ka	katoitt	Ca ₃ Al ₂ Si _{3-x} O ₁₂ (OH) _{4x} (x=1.5-3)	Stadium IV
kfs	kalifeltspat	KAlSi ₃ O ₈	Stadium II og III
ki	kimzeyitt	Ca ₃ (Zr,Ti) ₂ (Si,Al) ₃ O ₁₂	Stadium I
ks	kalsilitt	KAlSiO ₄	Stadium I
lö	löllingitt	FeAs ₂	detritiske korn ?
ma	marialitt	Na ₃ Al ₃ Si ₉ O ₂₄ Cl	Stadium I *
mc	markasitt	FeS ₂	Stadium IV
mg	magnetitt	Fe ₃ O ₄	detritiske korn
mo	monticellitt	CaMgSiO ₄	Stadium II
ne	nefeline	NaAlSiO ₄	Stadium I
op	opal	SiO ₂	Stadium IV
pe	perovskitt	CaTiO ₃	Stadium I
ph	flogopitt	KMg ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Stadium I
pi	phillipsitt	(K,Na,Ca) ₁₋₂ (Si,Al) ₈ O ₁₆ • 6 H ₂ O	Stadium IV
pt	pentlanditt	(Fe,Ni) ₉ S ₈	Stadium I
py	pyritt	FeS ₂	Stadium IV
pyh	pyrrhotitt	Fe _{1-x} S	Stadium I
qz	kvarts	SiO ₂	Stadium I *
rs	rasvumitt	KFe ₂ S ₃	Stadium II
sa	saponitt	(Ca/2,Na) _{0,3} (Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ • 4 H ₂ O	Stadium IV
sc	scawitt	Ca ₃ Si ₆ (CO ₃) ₂ O ₁₈ • 2H ₂ O	Stadium IV
sd	sodalitt	Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ Cl ₂	Stadium III
sh	scheelitt	CaWO ₄	detritiske korn
so	schorlomitt	Ca ₃ Ti ₂ (Fe,Si) ₃ O ₁₂	Stadium I
sph	sinkblende	ZnS	detritiske korn
ta	thaumasitt ?	Ca ₃ Si ₂ (CO ₃) ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₁₂ • 24H ₂ O	Stadium IV
tb	tobermoritt	Ca ₉ Si ₁₂ O ₃₀ (OH) ₆ • 4 H ₂ O	Stadium IV
th	thoritt	ThSiO ₄	detritiske korn
ti	titanitt	CaTiSiO ₅	Stadium I*
tm	thomsonitt	NaCa ₂ Al ₅ Si ₅ O ₂₀ • 6 H ₂ O	Stadium IV
to	thorianitt	ThO ₂	Stadium IV
ty	tilleyitt	Ca ₅ Si ₂ O ₇ (CO ₃) ₂	Stadium II
ur	uraninitt	UO ₂	detritiske korn
uv	uvarovitt	Ca ₃ Cr ₂ Si ₃ O ₁₂	Stadium I
vs	vesuvian	Ca ₁₀ Mg ₂ Al ₄ (SiO ₄) ₅ (Si ₂ O ₇) ₂ (OH) ₄	Stadium II
wo	wollastonitt	CaSiO ₃	Stadium I-III
zr	zircon	ZrSiO ₄	Stadium I *
X1	nytt mineral	Ca _{3,4} (Th,U) _{1,5} (SiO ₄) ₃ (OH)	Stadium I
X2	nytt mineral	Na ₂ Ca ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₄	Stadium IV
X3	ny zeolitt ?	Na ₂ CaAl ₄ Si ₁₆ O ₁₆ • X H ₂ O	Stadium IV
X4	nytt mineral	Ca _{40,8} Al _{40,2} Si _n (OH) _m • X H ₂ O	Stadium IV
Y1	uident. min.	LREE,Ca-Silicate (stillwellitt ?)	Stadium I??
Y2	uident. min.	Ca,LREE,Th,U,Ti,Nb-oxide	detritiske korn

* - opptre bare i kalkspat-frie bergarter



Figur 2. Elektronmikroskop bilde ('BSE-bilde') som viser stadium I mineralselskapet kalkspat-wollatonitt - melilitt- klinopyroksen(fassaitt) - flogopitt og granat (melanitt). Billedrammen er ca. 1 mm bred. Forkortelser som ikke står i Tabell 1: Cpx-clinopyroksen; Mel-melilitt; Grt-granat.

produsere økt porøsitet i bergarten med mindre denne porøsiteten kontinuerlig reduseres ved kompaksjon. Kompaksjoner er imidlertid en relativt treg prosess ved lavt trykk. Resultatet kan derfor bli en porøs bergart, med lavere karbonat- og CO₂-innhold enn utgangsbergarten.

Klinopyroksen i Flekkeren prøvene er Al-rik, med inntil 11 wt% Al₂O₃, 2.6 wt% TiO₂ og 0.75 wt% Cr₂O₃, og er en augitt (fassaitt). Stadium I granaten opptrer med svært variabel sammensetning avhengig av det lokale miljø hvor den starter å vokse. Granater som nukleerte på gamle, detritiske kromitt-korn er svært Cr-rik med inntil 90 mol % uvarovitt komponent. Enkelte Zr-rike granatkorn har nukleert i Zr-rikt miljø, rundt detritiske zirkon korn, og kan klassifiseres som kimzeyite. Kimzeyitten er Ti-rik, og de mest Ti-rike varianter klassifiseres som schorlomitt. Den vanligste stadium I granaten er imidlertid en Ti-rik grossular-andraditt granat (melanitt) med inntil 9.4 wt% TiO₂, 5.7 wt% Cr₂O₃ og 2.0 wt% ZrO₂. Melilitten er Mg-rik og er en akermanitt med inntil 45 mol% gehlenitt (Al-endeledd) substitusjon. Cuspidinen er F-rik med variabelt Zr innhold (0-1.7 wt% ZrO₂). De mest Zr-rike cuspidine kornene finnes sammen med baghdaditt som hører til i cuspidin-wöhleritt gruppen. Det synes derfor å være en viss blandbarhet mellom cuspidin og baghdaditt.

Apatittgruppens mineraler viser stor variasjon i sammensetning og beskrives v.h.j.a. endeleddene apatitt [Ca₅P₃O₁₂(OH)], britholitt [LREE₃Ca₂Si₃O₁₂(OH)] og Thapatitt (=X1) [Ca_{3.5}(Th,U)_{1.5}Si₃O₁₂(OH)]. LREE står for lette jordarter, hvor de viktigste er La, Ce og Nd. Th-endeleddet er ikke tidligere beskrevet som eget mineral. Analyserte prøver fra Flekkern varierer i sammen-

setning fra ap_{1.7}X_{1.2}br_{6.2} til ap₆X_{1.85}br₉ (som altså inneholder 85 mol% av Th-endeleddet), men de fleste analysene faller innenfor intervallet ap_{2.0}X_{1.40-4.5}br_{4.0-3.5}. Uraninnholdet varierer fra 2.3 til 6.4 wt% UO₂.

Stadium II mineraler dannes på bekostning av stadium I mineraler og finnes ofte på korgrensene mellom disse. Karakteristiske mineraler er: Clinopyroksen, granat, monticellitt, vesuvian, tilleyitt, hillebranditt, rasvumitt og djerfisheritt. Disse mineralene dannes som reaksjonsprodukt i reaksjoner som:

- (8) ak = wo + mo
- (9) wo + cc = ty + CO₂
- (9) cc + ak = ty + mo + CO₂
- (10) wo + ak + ge + CO₂ + H₂O = vs + cc
- (11) wo + ge + CO₂ = gr + cc

Noen av disse reaksjonene produserer også CO₂, selv om bergarten nå avkjøles og temperaturen synker. Andre reaksjoner konsumerer CO₂ og krever derfor en CO₂ kilde som f.eks. en av de CO₂-produserende reaksjonene. Stadium II pyroksen og granaten er henholdsvis en diopsid med lavt innhold av Al, Ti og Cr og en grossular-andraditt granat med lite Ti og Cr (< 0.5 wt% TiO₂). Rasvumitt og djerfisheritt er sjeldne K, Fe-sulfider, tidligere beskrevet fra alkaline dypbergarter. Djerfisheritt er også beskrevet fra meteoritter. Disse dannes på bekostning av magnetkis (pyrrhotitt) ved reaksjoner som:

- (12) wo + cc + ks + pyh = rs + gr + CO₂
- (13) wo + cc + ks + pyh = dj + 3gr + CO₂

Stadium III inkluderer mineraler som opptrer i diffuse årer gjennom bergartene. Det karakteristiske mineralselskapet er kalkspat + wollastonitt + kalsilitt + sanidin + sodalitt. Sodalitt opptrer her i steden for nefelin og krever tilførsel av salt (NaCl). Dette kan ha skjedd ved inntrengning av saltvann langs årer som representerer tidligere sprekker i bergarten.

Stadium IV er knyttet til sen omvandling ved relativt lav temperatur. Mineraler som var stabile under høyere temperatur brytes ned til finkornede aggregater av: zeolittmineraler som tompsonitt, phillipsitt, og en mulig ny zeolitt (X3 i tab. 1); giuseppettitt (cancrinitgruppe mineral); scawtitt og hydrogrossular. Hydrogrossularen er til tider svært Si-fattig og kan klassifiseres som katoitt og hibschitt. I tillegg opptrer et par hittil uidentifiserte kalsium-silikater (X2 og X4 i tabell 1) som reaksjonsprodukter etter bl.a. wollastonitt. Disse representerer trolig nye mineral specier.

Dannelsesbetingelser

Endringer av mineralselskap fra stadium I til IV reflekterer endringer i dannelsesbetingelser under bergartenes metamorfe historie. Dannelsesbetingelsene ved et gitt stadium kan i noen grad beregnes fra fasepetrologiske analyser. Basert på de ulike mineralers sammensetning og termodynamiske egenskaper kan en beregne (eller i det minste avgrense) trykk og temperaturforhold under dannelsen av et gitt mineralselskap. I noen tilfeller vil en også kunne anslå sammensetningen på den væskefasen som har befunnet seg i bergartens porerom. En detaljert fasepetrologisk analyse av de observerte mineralselskaper fra Flekkern er gjort ved hjelp av dataprogrammet VERTEX skrevet av J.A.D. Connolly (1990) og presentert av Jamtveit et al. (in prep). Denne analysen tyder på at stadium I mineralselskapet wollastonitt-kalkspat-melilitt-klinopyroksen-flogopitt-kalsilitt ble dannet ved en temperatur nær 870 °C. Trykket under kontaktmetamorfose i Oslofeltet er tidligere estimert til 500-1000 bar basert på antatt tykkelse av overliggende bergarter. I dette tilfellet antar vi et trykk på 1000 bar d.v.s. at metamorfosen skjedde ved et dyp på 3-4 km under den permiske overflaten. Under maksimale temperaturbetingelser (stadium I) var porevæsken karbon-rik. Dersom all karbon var til stede som CO₂, må porevæsken ha inneholdt nær 40% CO₂. Dersom vi imidlertid antar at grafitten som enkelte ganger kan finnes i bergartene, var stabil under stadium I, samt at magnetkisen som finnes i bergarten under stadium I var i likevekt med porevæsken, viser beregningene at porevæskens sammensetning var nær: 40 % H₂O, 29% CO₂, 10 % CH₄, 5 % CO, 5% H₂ og 11 % H₂S. Det siste tallet indikerer forøvrig at porevæsken var særdeles illeluktende! I tillegg innholdt porevæsken sannsynligvis betydelige mengder oppløste salter, men dette saltinnholdet kan ikke beregnes fra mineralselskapene. Bestemmelse av saltinnhold ville kreve et studium av eventuelle væskeinneslutninger som måtte finnes i stadium I mineralene.

Stadium II selskapet wollastonitt-kalkspat-monticellit-tilleyitt viser at temperaturen ved dette sta-

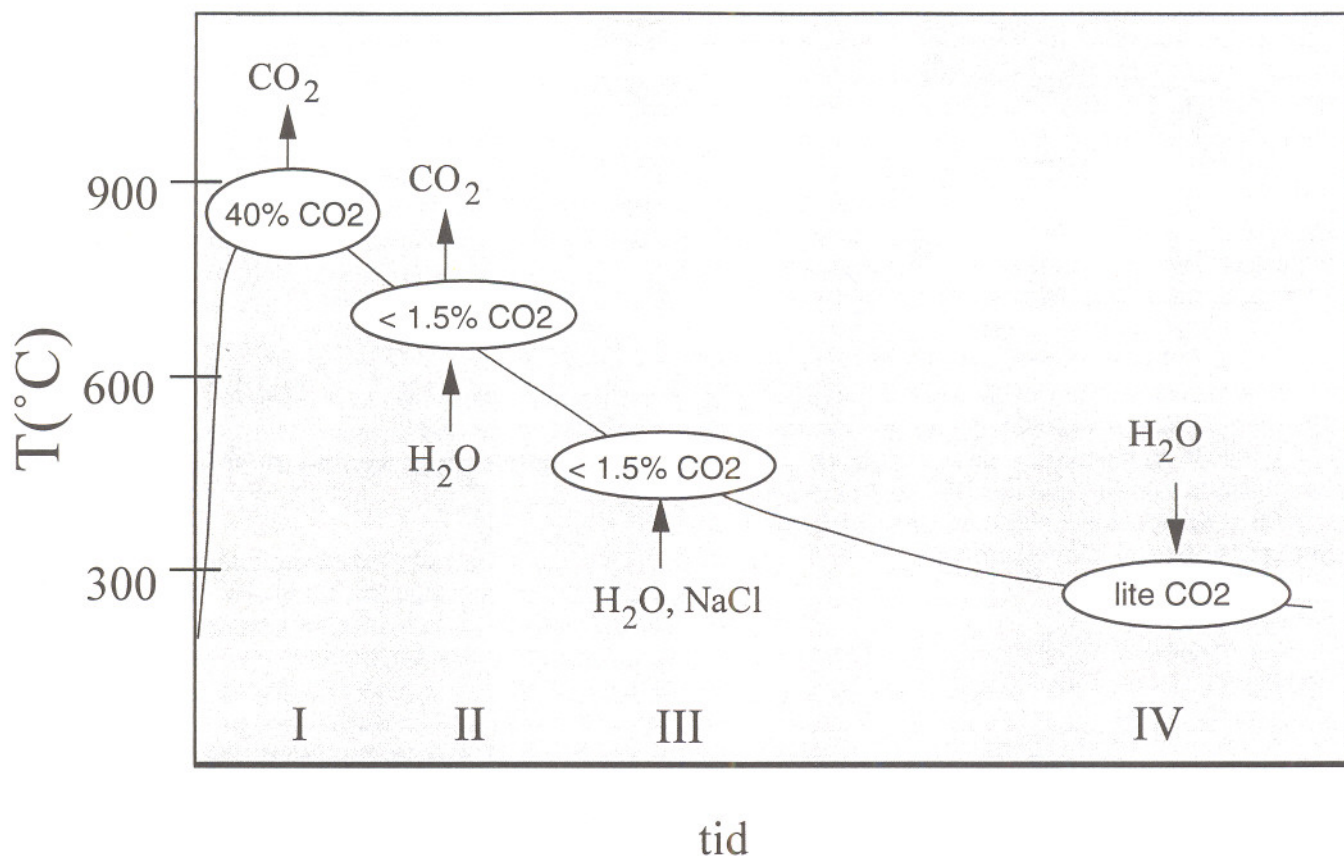
diet hadde sunket til under 710 °C. Tilstedeværelsen av tilleyitt indikerer videre at porevæsken på dette tidspunkt var svært karbon-fattig og inneholdt mindre enn 1.5 mol% CO₂. Porevæskens sammensetning har derfor endret seg kraftig i retning av å bli mer C-fattig fra stadium I til II. Stadium III selskapet wollastonitt-kalkspat-sanidin-kalsilitt indikerer en maksimum temperatur på ca. 550 °C under dannelsen av det sodalittførende stadium III selskapet. Porevæsken var også her C-fattig, men kan ha inneholdt betydelige mengder salt som indikert ved tilstedeværelsen av det klor-rike mineralet sodalitt. Dannelsesbetingelsene for lavtemperaturmineralene hørende til stadium IV er ikke kjent og kan ha variert noe fra mineral til mineral. Porevæsken var imidlertid trolig også her svært vann-rik.

Diskusjon

Mineralselskapene fra karbonat-holdige bergarter fra Flekkeren er svært uvanlige for metamorfe bergarter, hovedsakelig fordi det er uvanlig at bergarter av en slik sammensetning utsettes for så høye temperaturer kombinert med relativt lavt trykk. Mange av de observerte mineralene er derfor mer vanlige i silisiumfattige, alkaline dypbergarter og gangbergarter som iljoitt-seriens bergarter og ultramafiske lamprofyrrer. I Norge opptrer slike bergarter bl.a. i tilknytning til Fensfeltets karbonatitter (Dahlgren, 1987).

Den metamorfe historie som reflekteres ved endringer i dannelsesbetingelser fra stadium I til IV kan forklares som følger: Under oppvarming av karbonatførende bergarter dannes kontinuerlig CO₂ ved dekarbonatiseringsreaksjoner og porevæsken blir relativt CO₂-rik. Eventuell væske produsert ved avkjøling av den omgivende (delvis krystalliserte) larvikittiske bergartssmelte (magmatisk væske) er ganske sikkert CO₂-fattig, med et større eller mindre saltinnhold. Denne magmatiske væsken vil imidlertid ha vanskelig for å trenge inn i de karbonatførende bergarter så lenge disse selv produserer en porevæske, fordi trykket i porevæsken da vil være høyt. Dersom porevæsken beveger seg, vil dette være ut av karbonatbergartene og ikke inn. Derfor er porevæsken under stadium I karbonrik. Under avkjøling vil imidlertid karbonat bergartene i første omgang ikke lenger produsere porevæske. Porevæsketrykket i den nå relativt porøse bergart (se over) vil da kunne synke. Dette kan tillate vannrik (magmatisk) væske fra omgivende larvikitt å trenge inn i de metamorfe kalker og skifre. Denne tilførselen av vannrik væske vil føre til en serie av mineralreaksjoner, hvorav de fleste produserer CO₂, nå ikke lenger p.g.a. oppvarming, men p.g.a. vanntilførsel. Slik dannes stadium II og III mineralene.

Når temperaturen har sunket så langt at hele den opprinnelige bergartssmelte er krystallisert, vil videre avkjøling føre til termisk kontraksjon (sammentrekning) og sprekker vil dannes. Noen av disse kan føre overflatevann (meteorisk vann) ned til de metamorfe karbonatbergartene som inneholder en rekke mineraler som ble dannet ved høy temperatur, og som ikke



Figur 3. Skjematisk temperatur-tids utvikling for de metasedimentære bergartene fra Flekkern. Figuren viser tilførsel og tap av vann og karbondioksyd under bergartenes metamorfe historie. Pilene som peker oppover indikerer væskestrømning mot overflaten, mens nedover-pekende piler indikerer vannstrømning fra overflaten og nedover. Tallene angir mol% CO₂ i porevæsken. Formen på temperatur-tid kurven er typisk for områdene nær toppen av avkjølede dyppbergarter.

er stabile ved lav temperatur. De reagerer derfor med det tilførte overflatevannet og danner lav-temperatur mineraler tilhørende stadium IV. Flekkern bergartenes metamorfe historie er skissert i Figur 3.

Referanser

- Al-Hermezi, H.M., McKie, D., og Hall, A.J. 1986: Baghdadite, a new calcium zirconium silicate mineral from Iraq. *Mineralogical Magazine*, 50, 119-123.
- Connolly, J.A.D. 1990: Multivariable phase diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics. *American Journal of Science*, 290, 666-718.
- Dahlgren, S. 1987: The satellitic intrusions in the Fen carbonatite-alkaline rock province, Telemark, Southeastern Norway. Unpubl. Cand. Scient. thesis, University of Oslo, 350 pp.
- Dahlgren, S. (under trykking) Kartblad 1713 IV Nordagutu, berggrunnsgeologi. Skala 1:50000. Norges Geologiske Undersøkelser Goldschmidt, V.M., 1911, Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet. *Vitenskaps selskapets Skrifter. I., Matematisk Naturvitenskapelig Klasse 1911, No.1, 483 p.*
- Goldschmidt, V. M., 1911, Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet. *Vitenskaps selskapets Skrifter. I., Matematisk Naturvitenskapelig Klasse 1911, No. 1, 483 p.*
- Jamtveit, B. og Andersen, T. 1993: Contact metamorphism of layered shale-carbonate sequences in the Oslo rift: III. The nature of skarn-forming fluids. *Economic Geology*, 88, 830-849.
- Jamtveit, B., Bucher-Nurminen, K., og Stijfhoorn, D.E., 1992a: Contact metamorphism of layered shale-carbonate sequences in the Oslo rift: I. Buffering, infiltration and the mechanisms of mass transport. *Journal of Petrology*, 33, 377-422.
- Jamtveit, B., Grorud, H. F., og Bucher-Nurminen, K., 1992b, Contact metamorphism of layered shale-carbonate sequences in the Oslo rift: II. Migration of isotopic and reaction fronts around cooling plutons. *Earth and Planetary Science Letters*, 114, 131-148.
- Jamtveit, B., Grorud, H.F., og Ragnarsdottir, K.V. 1996: Flow and transport during contact metamorphism and hydrothermal activity: Examples from the Oslo rift. In: Jamtveit, B., og Yardley, B.W.D. (red.) *Fluid flow and transport in rocks: Mechanisms and effects.* Chapman and Hall, London. p. 57-82.

- Jamtveit, B., Dahlgren, S., og Austrheim, H.,
(in prep): High-grade contact metamorphism of
calcareous rocks from the Oslo Rift, Southern
Norway. *American Mineralogist* (submitted).
- Svensen, H., og Jamtveit, B. (in prep): Contact
metamorphism of shales and carbonates
from the Grua area, the Oslo rift, Norway: A
phase petrological study. *Norsk Geologisk
Tidsskrift* (submitted).
- Tracy, R.J., og Frost B.R. 1991: Phase equilibria
and thermobarometry of calcareous, ultramafic
and mafic rocks, and iron formations.
In: Kerrick, D.M. (red.): Contact metamorphism.
*Mineralogical Society of America Reviews in
Mineralogy*, 26, 207-289.