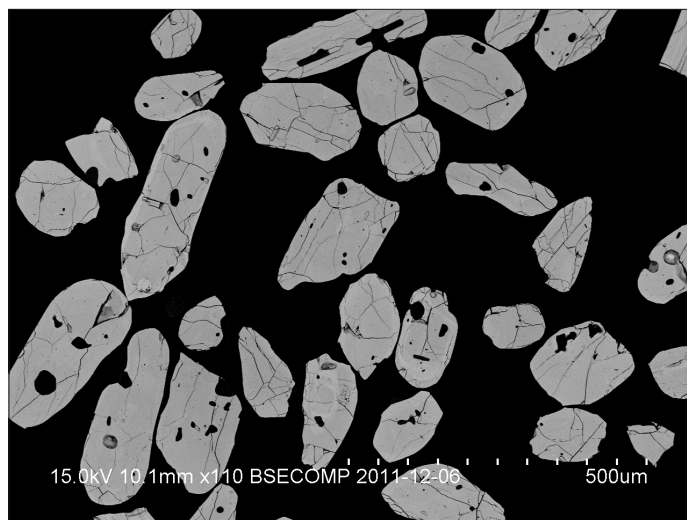


Vad kan inneslutningar i zirkon berätta om Varbergscharnockiten, SV Sverige

Simon Engström

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 362
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2013

Vad kan inneslutningar i zirkon berätta om Varbergscharnockiten, SV Sverige

Kandidatarbete
Simon Engström

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2013

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
2 Charnockit	5
2.1 Klassificering och definition	5
2.2 Geologisk förekomst	6
2.3 Magmatiska eller metamorfa	7
3 Regional geologi, SV Sverige	7
3.1 Östra Segmentet	7
4 Varbergscharnockiten	8
5 Metoder och material	9
6 Resultat	10
6.1 Inneslutningar	10
6.2 Zirkonernas texturella uppträdande i charnockit-bergarten	12
6.3 Zirkonmättnad	12
7 Diskussion	15
8 Slutsatser	16
9 Tack	16
10 Referenser	17

Vad kan inneslutningar i zirkon berätta om Varbergscharnockiten, SV Sverige

SIMON ENGSTRÖM

Engström, S., 2013: Vad kan inneslutningar i zirkon berätta om Varbergscharnockiten, SV Sverige. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 362, 18 sid. 15 hp.

Sammanfattning: Charnockit (hypersten granit), förekommer över hela världen och har beskrivits som en magmatiskt eller metamorft bildad bergart, ursprunget till charnockiter och definitionen är därför omdiskuterad. Det finns två ytterligheter bland förklaringsmodeller för charnockitbildning, antingen bildas de genom (1) kristallisation av torra magmor eller (2) i metamorfa miljöer vid lågt P_{H_2O} . Denna studie omfattar undersökning av mineralinklusioner i zirkoner från Varbergscharnockiten i svepelektronmikroskop (SEM), zirkonmättnadstermometri och en analys av zirkonernas texturella förekomst i charnockiten. Resultaten gav att Varbergscharnockiten var zirkoniummättad mellan 766 - 844°C, zirkonerna förekommer huvudsakligen i korn-gränserna utan någon särskild mineralassociation men ibland i associerade med Fe-oxider och Fe-sulfider. Inklusionsstudien visar att apatit och K-fältspat är de vanligaste mineralinklusionerna i zirkon från Varbergscharnockiten och att klinopyroxen och omvandlingsmineral av ortopyroxen förekommer som inneslutningar. Resultaten tyder klart på att Varbergscharnockiten bildades genom kristallisation från en torr magma där klino- och ortopyroxen var primära mineral.

Nyckelord: charnockit. Varberg, zirkon, mineralinneslutning, zirkoniummättnad

Handledare: Anders Scherstén, Leif Johansson

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Simon Engström, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige.

E-post: simon@engstrom.info

What do inclusions in zircon tell about the Varberg charnockite, SW Sweden

SIMON ENGSTRÖM

Engström, S., 2013: What do inclusions in zircon tell about the Varberg charnockite, SW Sweden. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 362, 18 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

Abstract: Charnockite (hypersthene granite), occurs worldwide and has been described as an igneous or metamorphic rock. The origin of charnockites and the definition of the concept has been widely debated. There are two hypotheses concerning possible formation models for charnockite: (1) crystallization from dry magmas, and (2) low P_{H_2O} during metamorphism. This study investigated mineral inclusions, saturation thermometry, and microtextures in zircons from the Varberg charnockite, using a scanning electron microscopy (SEM). The results suggest that the Varberg charnockite is zircon saturated between 766-844 °C, and the zircons are generally found along the grain boundaries of minerals; infrequently as inclusions. Although there was no apparent mineral association preference, zircons were frequently associated with Fe-oxides and Fe-sulfides. Apatite and K-feldspar are the most common occurring mineral inclusions in zircon; less frequent inclusions are clinopyroxene and alteration products of orthopyroxene. The results indicate that the Varberg charnockite was formed by crystallization from dry magma in which clino- and orthopyroxene were primary minerals.

Keywords: charnockite, Varberg, zircon, inclusion, zircon saturation thermometry.

Supervisors: Anders Scherstén, Leif Johansson

Simon Engström, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden.

E-mail: simon@engstrom.info

1 Inledning

Charnockit förekommer i flera olika geologiska miljöer, både magmatiska och metamorfa, över hela världen. I miljöer där magmatiska granitiska bergarter utsatts för granulitfaciesmetamorfos kan det vara svårt att entydigt avgöra hur en charnockit bildats. Syftet med denna studie är att identifiera mineralinklusioner i zirkon, från Varbergscharnockiten, och utreda om de kan ge information om bildandet av bergarten. I denna studie diskuteras även relationerna mellan zirkoner och övriga mineral samt en beräkning av zirkoniummättnadsnivån i Varbergscharnockiten.

Då charnockit definieras av innehållet av ortopyroxen vilka kan vara magmatiskt eller metamorft bildade är det av speciellt intresse att se vilken relation de har till de magmatiskt bildade zirkonerna. Två möjliga scenarion är:

- I: Ortopyroxen i Varbergscharnockiten bildades genom metamorft kristallisation under den Svekonorvegiska metamorfosen för 1000 Ma.
- II: Ortopyroxen i Varbergscharnockiten bildades under magmatisk kristallisation vid lågt vattentryck, P_{H_2O} .

Om ortopyroxen förekommer som mineralinneslutningar i zirkon, kommer det sista scenariot (II) att vara det mest sannolika. Möjligheten finns dock att det finns mer än en generation av ortopyroxen.

2 Charnockit

2.1 Klassificering och definition

Termen "Charnockit" föreslogs av T.H. Holland (1900) för att beskriva en gravsten av bergarten, tillhörande grundaren av Calcutta, Job Charnock. Charnockit definierades då som en hypersten (ortopyroxen)-förande granitisk bergart med ursprung från södra Indien. Holland (1900) förbjöd användningen av termen charnockit för liknande bergarter utanför Indien och bergarter som inte var granit *sensu stricto* men innehöll ortopyroxen skulle klassas som en medlem av "charnockite rock series". Holland beskrev charnockit som en bergart av plutoniskt, vulkaniskt ursprung. Senare har liknande bergarter hittats i olika geologiska miljöer på samtliga världsdelar och av både magmatiskt- och metamorft ursprung (tabell 1). Det stora vetenskapliga intresset för charnockiter har lett till olika tolkningar av charnockit i olika områden, vilket har lett till en expansion av användandet av charnockittermen och dess geologiska betydelse. Enligt Frost & Frost (2008) är charnockit en serie magmatiska bergarter med liknande mineralsammansättning som i granulitfaciesbergarter vilket kan vara en orsak till olika tolkningar av begreppet.

Enligt The International Union of Geological Sciences (IUGS) är definitionen av charnockit: "*A term now applied to any hypersthene granite of QAPF field 3. The term was originally defined as a specific type of hypersthene granite found associated with other members of what was called the charnockite rock series, ranging from granitic and intermediate members through to noritic and hypersthene peridotites and pyroxenites.*" (Le Maitre 1989, och referenser

Tabell 1. Visar global distribution och åldrar för ett antal charnockiter runt om i världen med både magmatiska och metamorfa ursprung. (Referenser: 1. Bucher & Frost 2006; 2. Maesschalck et al 1990; 3. Santosh et al 2002; 4. Bhattacharya & Chaudhary 2010; 5. Skridlaite et al 1987; 6. Duchesne et al 1987; 7. Corfu 2004; 8. Frost et al 2000; 9. Frost et al 1999; 10. McCulloch et al 1987; 11. Stern et al 1994; 12. Percival et al 1994; 13. De Janasi 2002; 14. Weiss & Troll 1989; 15. Shanguo et al 1999).

Område	Titel	Ålder	Ref
Antarktis (Queen Maud Land)	The Thor Range	500 Ma	1
Sri Lanka	Kataragama & Pottuvil	2500-2000 Ma	2
Indien	Madras block	2600-2550 Ma	3
Indien	Madurai block	750-920 Ma	3
Indien	Yaypur	2800 Ma	4
S Litauen, NÖ Polen	Mazury complex	1520-1500 Ma	5
Norge (SV)	Rogaland	1200-950 Ma	6
Norge (N)	Lofoten	1800-1790 Ma	7
USA (Wind River Range, Wyoming)	Louis Lake Batholith	2630 Ma	8
USA (SÖ Wyoming)	Sherman Batholith	1430 Ma	9
Nya Zeeland (Sydön)	Fjordland	120 Ma	10
Kanada (Norra Quebec)	Minto Block	2700 Ma	11,12
Brasilien (SÖ)	SE Brazil	625 Ma	13
Skottland	Ballachulish	412 Ma	14
Kina	Yishui	2537-2582 Ma	15

däri). Begreppet: "any hypersthene granite" kan missuppfattas och då leda till att termen "charnockit" tolkas på olika sätt. Inom charnockitserien ingår bergarter som charno-enderbite/opdalite, enderbite, mangerite, jotunite och norite. Definitionen av charnockitserien enligt Jackson (1997) är en plutonisk bergart som sammansättningsmässigt liknar granit men kännetecknas av förekomsten av ortopyroxen. Ett annat kännetecken för charnockit är förekomsten av olika typer av pertit (pertit, mesopertit och antipertit).

Nedan följer bergartsbeskrivningar för charnockitserien, enligt IUGS.

Charno-enderbite synonymt med **opdalite**: "A member of the charnockitic rock series equivalent to hypersthene granodiorite of QAPF field 4." (Le Maitre 1989, och referenser däri).

Enderbite: "A member of the charnockitic rock series consisting essentially of quartz, antiperthite, hypersthene and magnetite. It is equivalent to hypersthene tonalite of QAPF field 5." (Le Maitre 1989, och referenser däri).

Mangerite: "An intermediate member of the charnockite rock series equivalent to hypersthene monzonite of QAPF field 8 and frequently containing

mesoperthite."

Jotunite: "A member of the charnockitic rock series equivalent to hypersthene monzonite in QAPF field 9. The term is synonymous with Jotun-norite."

Bergarterna från charnockitserien har sammanfattats i tabell 2 (Le Maitre 1989).

QAP diagram omarbetad från Frost & Frost (2008) visar IUGS fältens klassificering (fig. 1).

Eftersom charnockiters ursprung fortfarande är kontroversiellt, har Frost & Frost (2008) gjorde ett försök att definiera termen "charnockit", som en magmatisk opx-förande granit med en specifik geokemi. Frost & Frost (2008) har, i sin studie använt flera exempel på charnockiter över hela världen för att klassificera charnockiten både geokemiskt och enligt geologisk förekomst. Definitionen av charnockit, enligt Frost & Frost (2008) är: "Charnockite: an Opx-(or Fayalite) bearing granitic rock that is clearly of igneous origin or that is present as an orthogneiss within a granulite terrane." De föreslår att termer för bergarter inom charnockitserien, som enderbite, charno-enderbite, mangerite, opdalite och jotunite bör elimineras. En anledning till detta är att IUGSs klassificering av vulkaniska bergarter fungerar, både för torra och våta magmor och för att inte skapa förvirring bör namn i charnockitserien tas bort från den framtida litteraturen. Frost & Frost (2008) föreslår därför att "opdalite" skulle mer logiskt kallas för "granodioritic charnockite" eller "OPX-förande granodiorit". Frost & Frost (2008) antyder också att termer som "charnockitisation", "incipient (begynnande) charnockite", "C-typ magma" och intermedian- eller felsic charnockit bör avlägsnas från framtida litteratur.

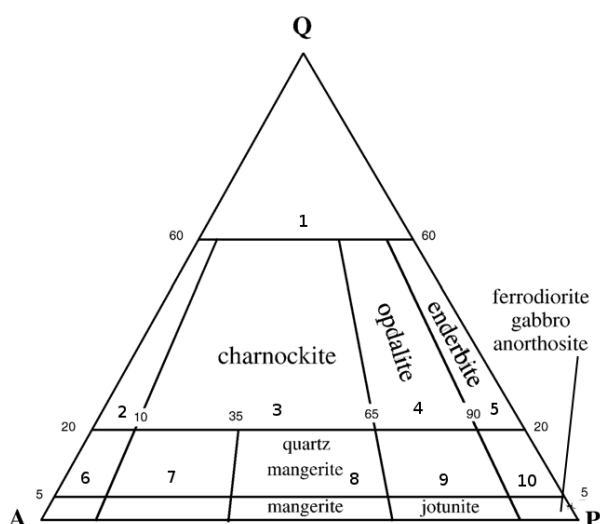


Fig. 1. QAP-diagram vilket visar olika QAP-fält (se tabell 2 för terminologi) samt charnockitseriens placering

2.2 Geologisk förekomst

Charnockit och pyroxenförande granitoider påträffas generellt i fyra olika tektoniska miljöer (Frost & Frost 2008), 1, Rift-relaterade med Fe-rik magmatism, 2, kraftigt eroderade cordilleran-typ plutoner, 3, Caledonian-typ plutoner, 4, djupsmältning av jordskorpan relaterat till granulitfaciesmetamorfos eller intrusioner av varma Fe-rika magmor, alla fyra har olika geokemiska karaktärsdrag.

Tabell 2. Terminologi för medlemmar i charnockitserien enligt IUGS, med allmänna- och särskilda termer. QAP-fält refererar till figur 1 i detta dokument.

QAPF fält	Allmän term	Special term
2	hypersthene alkali feldspar granite	alkali feldspar charnockite
3	hypersthene granite	charnockite (3b farsundite)
4	hypersthene granodiorite	opdalite or charno-enderbite
5	hypersthene tonalite	Enderbite
6	hypersthene alkali feldspar syenite	-
7	hypersthene syenite	-
8	hypersthene monzonite	Mangerite
9	monzonorite (hypersthene monzodiorite)	Jotunite
10	norite (hypersthene diorite), anorthosite (M<10)	-

Den charnockit som bildats genom Fe-dominerad magmatism är ofta en del av AMCG (Anortosit-Mangerit-Charnockit-Granit)-sviten vilken är ett viktigt och nästan uteslutande inslag i den Proterozoiska skorpan (Corfu 2004). Många av dessa plutoner är opåverkade av metamorfos (Frost & Frost 2008).

Trots att charnockiter endast utgör en liten del av alla granitbergarter, har de varit föremål för många undersökningar de senaste 25 åren. Detta beror delvis på att charnockiter vanligtvis bildas i miljöer förknippade med höga temperaturer och därför kan ge kunskap om de processer som sker djupt ner i jordskorpan eller i granitiska plutoniska bergarter (Frost & Frost 2008). Charnockiter är dessutom lämpliga för temperatur-, tryck- och syrefugacitetsberäkningar (Frost & Frost 2008).

2.3 Magmatiska eller metamorfa

Frågan om charnockiter är bildade magmatiskt eller metamorft har diskuterats av många forskare (Newton 1991, Bhattacharya 2010, Frost & Frost 2008). Förekomster av ”incipient charnockites”, ”patchy charnockites” och ”charnockitization” har lett till acceptans av ett metamorft ursprung av vissa charnockiter. De processer som leder till metamorfa charnockiter kan vara ett resultat av CO₂-inflöde eller av andra skäl sjunkande P_{H₂O}. (Santosh & Omori 2008). Ett exempel är CO₂-rika vätskeinnslutningar i mineral i charnockit från Varberg (Harlov et al. 2013) vilka kan vara bevis på CO₂-inflöde, men kan även vara en effekt av sänkt H₂O koncentration i öppna system eller på grund av plastisk deformation av kristall (Bhattacharya 2010, och referenser däri). Stort inflöde av CO₂-berikade fluider verkar orimligt enligt vissa forskare (Bhattacharya 2010, och referenser däri) vilket har lett till att koldioxidens effekt och roll vid charnockitisering har blivit debatterad. Charnockiter i Indien, Sri Lanka och på Antarktis sägs vara metamorfa och har bildas in situ under amfibolitfaciesmetamorfos (Bhattacharya 2010, och referenser däri).

Storskaliga charnockitmassiv har hittats i hela världen, oftast med ett plutoniskt ursprung. ”The Mintu block”, i Kanada, från lägre Arkeium är välkänt och en av de största höggradsmetamorfa områdena i världen (Newton 1991, och referenser däri). De magmatiska charnockiterna sägs geokemiskt kunna särskiljas på grund av att de är en fraktionerad produkt av en smälta, från metasomatiserad mantel under förhållanden likt metamorfos i granulitfacies. De magmatiska charnockiterna har beskrivits som ”Charnockite Magma type”, eller ”C-type magma”. C-typmagma sägs härledas genom smältning av torr granulit (Bhattacharya 2010), men enligt Frost & Frost (2008) finns det ingen klart urskiljbar C-typmagma för magmatiska charnockiter. C-typ magma är därigenom snarare charnockit sensu lato än sensu stricto. Saxena (1977) fann att pyroxen i charnockiter bildas, vid jämvikt inom temperaturintervallet från 800 till 900°C och vid relativt grunda djup, från 6 till 12 km.

3 Regional geologi, SV Sverige

I slutet av mesoproterozoikum kolliderade kontinenten Baltica med en annan kontinent och blev omarbetad. Denna kontinent-kontinent kollision kallas Svekonorvegiska orogensen och var aktiv från 1,14 till 0,90 Ga (Bingen et al. 2008). Effekterna av den Svekonorvegiska orogensen begränsas i öster av den Svekonorvegiska främre deformationszonen (SFDZ) vilket beskrivs som diskret spröd och duktil deformation (fig. 2). Öster om den Svekonorvegiska främre deformationszonen finns bergarter från Svekokarelska orogensen vid 1,92 till 1,81 Ga och odeformerade magmatiska bergarter tillhörande Transskandinaviska Magmatiska Bältet (TIB) från 1,81 till 1,66 Ga (Bingen et al. 2008 och referenser däri).

Det Svekonorvegiska orogenen är indelad i fem huvudsakliga litotektoniska enheter, från öst till väst: Östra segmentet, Idefjorden Terrane, Bamble Terrane, Kongsberg Terrane och Telemarkia Terrane. Segmenten är avgränsade av NS-strykande deformationszoner (fig. 2). Varbergscharnockiten förekommer i Östra Segmentet.

3.1 Östra Segmentet

Det Östra Segmentet utgör en paraautokton del av orogenen. Den norra delen av segmentet, norr om Väneren och Hammarö-skjuvzonen består av penetrativt till semi-penetrativt deformerade bergarter. U-Pb datering av titanit ger avkylningsåldrar av Svekonorvegiska metamorfosen på ca 960 Ma, i amfibolit- till grönskifferfacies (Söderlund et al. 1999). Den södra delen av Östra Segmentet (söder om Väneren) består av migmatitiska ortognejser, amfibolit, mafiska granuliter och granatamfiboliter. Tryck- och temperaturberäkningar för SV delen av Östra Segmentet ger temperaturer mellan 680 och 770°C och tryck på 9 till 12 kbar (Johansson et al. 1991, Möller 1998). U-Pb zirkondateringarna av den Svekonorvegiska metamorfosen i de Östra Segmentet varierar i intervallet mellan 990 till 960 Ma (Bingen m fl 2008, och referenser däri). Eklogiter påträffas i vissa områden i Östra Segmentet, vilka har daterats till 972 ± 14 Ma (Johansson et al. 2001, Möller 1998, Möller 1999). Avsvältningsåldern för titanit U-Pb, varierar från 960 till 920 Ma (Söderlund et al. 1999; Johansson et al. 2001). De yngsta bergarterna i den södra delen av Östra Segmentet är pegmatiter och granitiska gångbergarter i Ullared-Gällared området, daterade till 950 Ma (Möller & Söderlund 1997).

Datering av regional migmatitisering och gnejser resulterade i åldrar mellan 1460 och 1420 Ma (Söderlund et al. 2002) och är relaterat till Hallandianhändelsen som delvis inkluderar Dano-Poloniska orogensen. I slutet av Hallandian, 1400 till 1380 Ma, pågick intrusioner av delvis charnockitisk granit och syenitoid, inkluderade kristallisationen av Varbergscharnockiten och associerade graniter (Torpa, Kungssäter, Tjärnesjö) (Hubbard 1975, Welin & Gorbatschev 1978, Åhäll et al. 1997, Andersson et al.

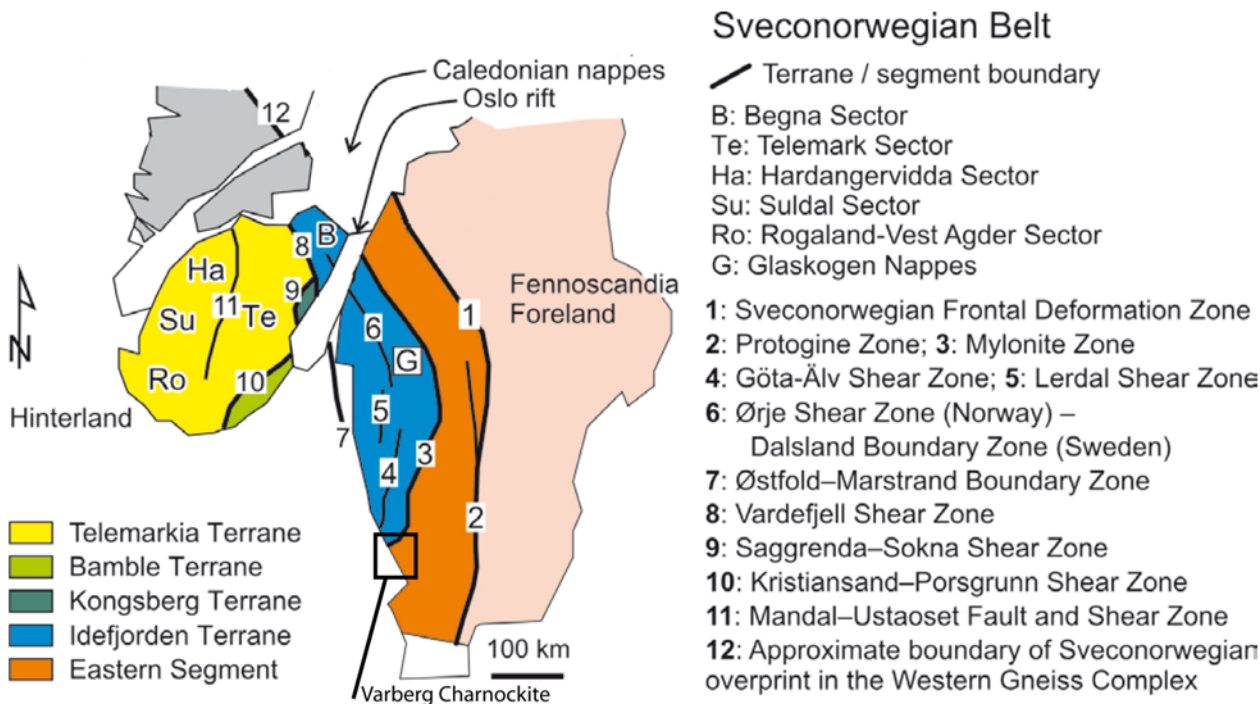


Fig. 2. Regional geologi av Svekonorwegiska bältet. Varbergscharnockiten är placerad i det Östra Segmentet direkt söder om Mylonitzonen (omarbetat från Bingen et al 2008).

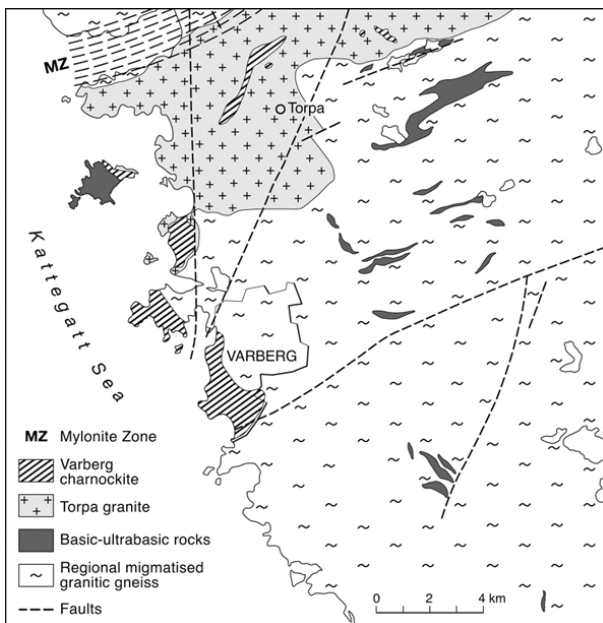


Fig. 3. Lokal geologi av Varbergsområdet, visar Varbergscharnockiten som separat enhet och som separata enheter i Torpagraniten (Harlov et al 2013).

1999). Deformation under Hallandian händelsen har föreslagits av Hubbard (1975) men senare studier har motbevisat denna hypotes på grund av brist på identifierbara deformationsstrukturer (Christoffel et al 1999).

4 Varbergscharnockiten

Förekomsten av charnockit i Varberg är den mest omfattande i Sverige och ett flertal studier har gjorts av charnockit-granitassociationen (Quensel 1951, Hubb-

bard 1975, 1989, Åhäll m fl 1997, Wellin & Gorbatshev 1978, Christoffel m fl 1999, Johansson & Kullerud 1993, Hubbard & Whitley 1979, Hubbard & Constable 1980, Harlov et al. 2013). Charnockiten förekommer i anslutning till Torpagraniten, som bildar en 30 km lång NNW-stupande skivlik intrusion (Åhäll m fl 1997), detta komplex brukar kallas "the Varberg Charnockite-Granit Association" (VCGA) (fig. 3) (Hubbard 1975). Varbergscharnockiten består av ett antal specifika charnockit-enheter med varierande kornstorlek och geokemi, namngivna efter närliggande orter eller platser (Hubbard 1989). Varbergscharnockiten (VC), är en homogen charnockitmonzonit med ett fåtal ortoklasmegacryster och har ett intrusivt förhållande till den omgivande bergarten (Hubbard 1989). Apelviken-Getteröncharnockiten (AGC), är en kvartsmonzonitiskcharnockit, som är omgiven av VC och är en mer texturrell och sammansättningsmässigt komplex. Trönningenäscharnockiten (TC) och Bromsbärs-hultcharnockiten, vilka är mycket lika varandra, är de mest grovkorniga charnockiterna i VCGA-serien. Samtliga charnockittyper innehåller mineralen ortopyroxen, klinopyroxen, plagioklas, K-fältspat, kvarts, biotit och granat samt accessoriska mineral som apatit, zirkon och opaka mineral. Hubbard (1989) visar utvecklingen av Varbergscharnockiten i en modell där AGC segregerar till TC och sedan till TG (fig. 2. I Hubbard 1989) denna modell är numera en förkastlig beskrivning av bildningen av Varbergscharnockiten (Harlov et al. 2013). Hubbard (1989) hävdade ett magmatiskt ursprung av Varbergscharnockiten, vilket vidare verifieras av data från Harlov et al. (2013). Harlov et al. (2013) visade att ett

Tabell 3. Åldersdateringar av Varbergscharnockit-granitassociation. Den nutida accepterade ålder för Varbergscharnockiten är 1399 ± 12 Ma.

Bergart	Ålder (Ma)	Metod	Ref
VCG	1420 ± 52	Rb-Sr Whole rock	Wellin & Gorbatshev 1978
Torpa	1380 ± 6	U-Pb Zircon	Åhäll et al. 1997
VC	1399 ± 12	U-Pb Zircon	Christoffel et al. 1999
VC	893 ± 5	Sm-Nd Mineral + WR	Johansson & Kullerud 1993
Söndrum	1397 ± 4	U-Pb Zircon	Rimsa et al. 2007

flertal mineral i Varbergscharnockiten innehåller vätskeinneslutningar av CO_2 samt gjorde PT beräkningar som gav $T = 750 - 850^\circ\text{C}$, och $P = 800 - 850$ Mpa för kristallisation av Varbergs charnockit-granitassociation Dess tryck och temperaturer kan också reflektera den överpräglade Svekonorvegiska metamorfosen.

Den första dateringen av VCGA gav en Rb-Sr bergartsålder av 1420 ± 52 Ma, vilket tolkades som en minimiålder för bildningen av VCGA (Wellin & Gorbatshev 1978, omräknat med 2sigma errors). Kristallisationen sägs vara en del den omdiskuterade "Hallandian orogenesis" mellan 1,44 till 1,38 Ga, som föreslagits av Hubbard (1975). En annan datering av en charnockit inom Torpagraniten gjordes av Åhäll m.fl. (1997) och gav en U-Pb zirkonålder för Torpagraniten till 1380 ± 6 Ma. Christoffel et al. (1999) daterade en charnockit från Varbergs fästning med U-Pb på zirkoner till $1399 +12/-10$ Ma. Johansson & Kullerud (1993) fick ett mineral + bergarts Sm-Nd ålder till 893 ± 5 Ma, vilket sammanfaller med Svekonorvegiska orogenesis och bevisar att Varbergscharnockiten delvis blivit påverkad av orogenesis. Men enligt datering av Christoffel m.fl. (1999), är den nuvarande accepterade åldern av Varbergscharnockiten 1399 Ma. Metamorf charnockit från Söndrum, belägen ca 70 kilometer söder om Varberg, nära Halmstad, har daterats med U-Pb till 1397 ± 4 Ma (Rimsa et al, 2007), vilket kan kopplas till bildandet av Varbergscharnockiten. Åldrar samt metoder använda för datering av Varbergscharnockiten presenteras i tabell 3.

5 Metoder och material

Storlekssorterade zirkon-korn monterade i epoxi på tunnslip (se fig. 4) studerades i svepelektronmikroskopet (SEM) vid Lunds universitet, institutionen för geologi. Proverna belades med kol, därefter identifierades mineralinneslutningarna med en energidispersiv röntgenspektrometer (INCA x-sight, Oxford Instruments) i ett Hitachi S-3400N svepelektronmikroskop. Kalibrering med kobolt genomfördes innan kvantitativa analyser utfördes vid en 15 - 20 kV accelerationsspänning och under en tid av 60 sekunder. Frekvensen av olika mineralinneslutningar bedömdes enligt en femgradig skala: 1-5, där 5 är mycket vanligt förekommande och 1 mycket ovanligt förekommande. Omkring 1000 inklusioner undersöktes och identifierades i denna studie.

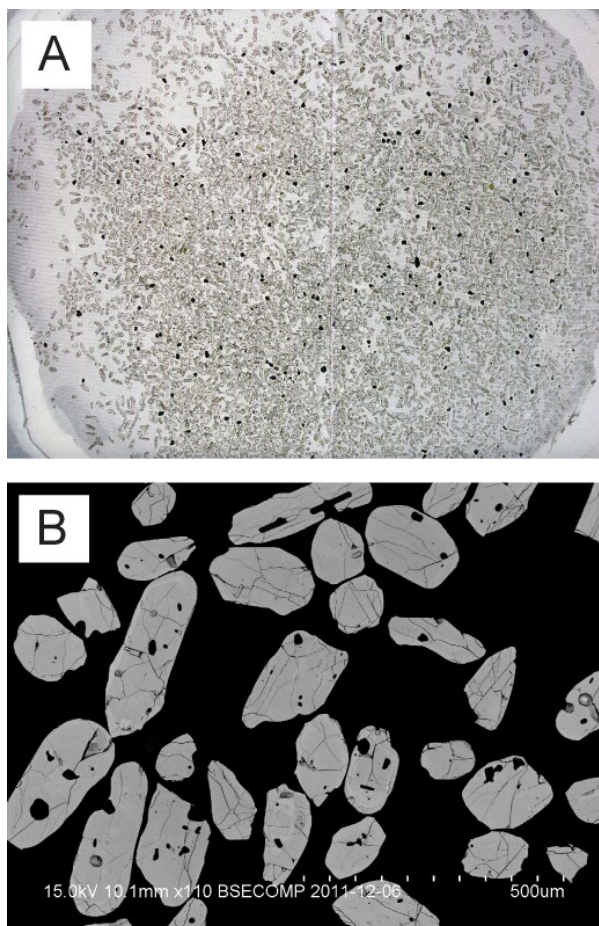


Fig. 4. Översikt för delar av det analyserade materialet, ljusfotografi (A) av ett tunnslip med zirkoner samt en översiktlig SEM bild (B) från samma prov. Notera den höga koncentrationen av zirkoner, vilket har ingått i denna studie.

Bergartsprover från fyra olika lokaler i Varbergsområdet (Apelviken, Getterön, Tröningenäs och Bromsbärshult) sågades till ca $2,5 \times 2,5 \times 0,5$ cm stora bitar och polerades. Proverna placeras på metallplattor, belades med ett tunt kollager, och zirkonernas textuella förhållanden till omgivande mineral i bergarterna analyserades.

Zirkoniummättnadstermetrin enligt Watson & Harrison (1983) ger temperaturintervallen vid vilket zirkoner i en bergart kristalliserat och mängden zirkonium (Zr) som krävs för att mätta smältan på Zr. Några frågeställningar som måste beaktas innan zirkoniummättnaden beräknas är enligt Hanchar & Watson (2003) : bildades zirkonkristallerna i ett tidigt eller sent skede av magmautvecklingen? I vilket bergarts-

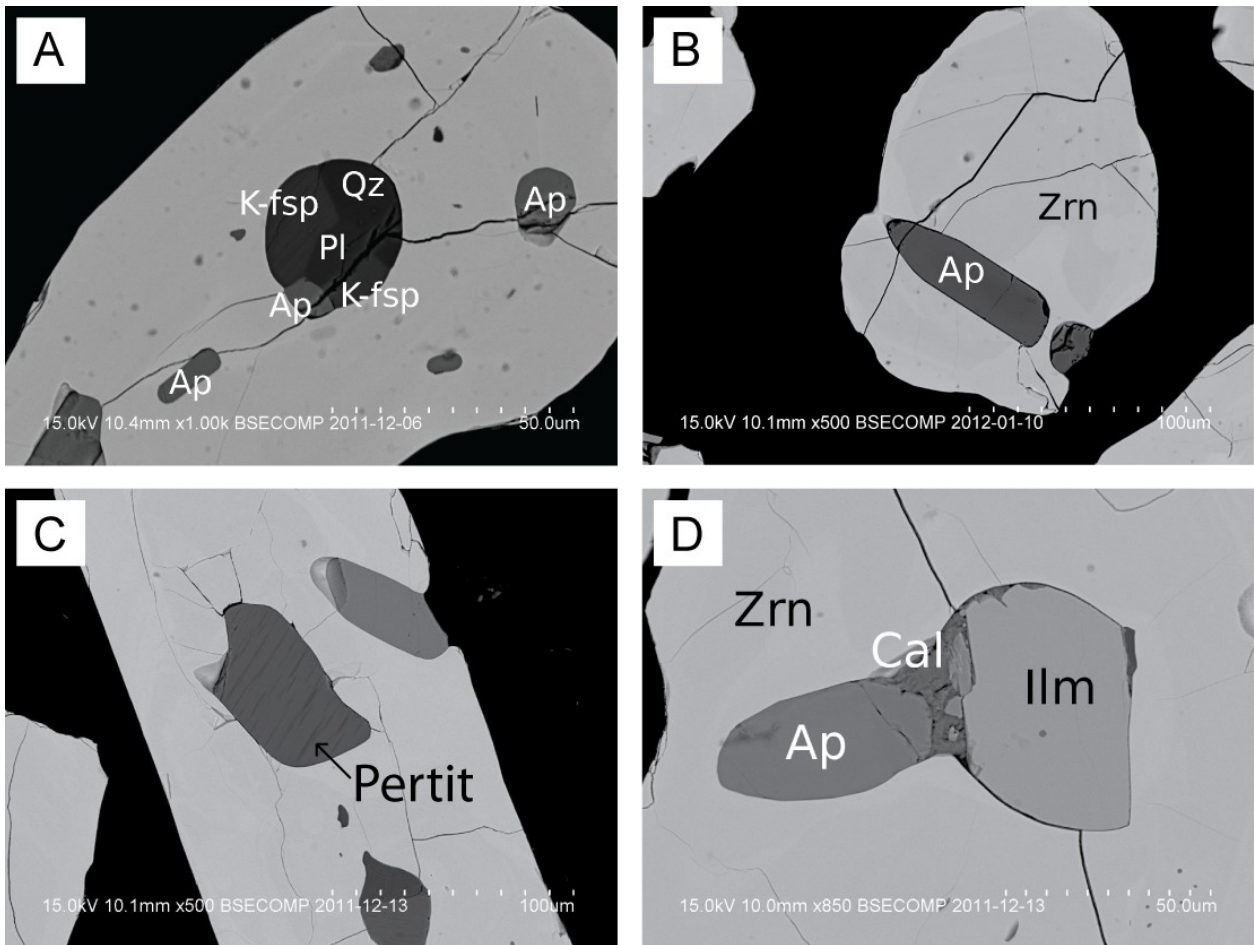


Fig. 5. A: Vanligt förekommande mineralassociation som inneslutning i zirkon (Zrn). K-fsp: Kalium fältspat, Qz: Kvarter, Pl: plagioklas, Ap: Apatit.
 B: Apatit det mest förekommande mineral som inneslutning i Varbergscharnockitens zirkoner. Storlek och form på kristaller varierar från beroende på inneslutning.
 C: Pertit existerande som inneslutningar med ett förekommande index av 2. Innehållande kalium-fältspat som grundmineral med lameller av nästan albitisk komposition.
 D: Visar förekomsten av kalcit (cal) som bildar inneslutning tillsammans med apatit och ilmenit (ilm).

bildande mineral förekommer zirkoner? Förekommer zirkonerna som inneslutningar i andra mineral eller primärt längs korngränser? Eftersom zirkoniummättnadsmätningen förutsätter att zirkoner är i kontakt med, eller kan "se" smältan, är det sista övervägandet av stor betydelse.

Zirkoniummättnadsgrad, mättnadstemperatur och katjonförhållande (M-värden) för VCGA beräknades med hjälp GeoChemical Data Toolkit (GCDkit), och bergartsgeokemiska uppgifter från Hubbard (1989) vid temperaturerna 650°C, 750°C och 850°C. Syftet var att avgöra vid vilken temperatur charnockitmagman var zirkoniummättad och vid vilken temperatur zirkonkristallerna därmed bildades.

De zirkoner som används vid analysen är magmatiska och har bildats under den primära kristalliseringen av magman. Inklusioner i zirkon är bevis på mineral bildade före zirkonkristallisering vilket ger en insikt i kristallisationsprocessen.

6 Resultat

6.1 Inneslutningar

Resultaten från inklusionsanalysen presenteras i tabell 4. Förekomstfrekvens av olika mineral som inneslutningar skedde enligt en femgradig skala, där 5 är "mycket vanligt-", 4: "vanligt-", 3: "ganska vanligt-", 2: "ovanligt-", 1: "mycket ovanligt -förekommande". Proverna från respektive lokal klassades först enskilt, därefter sammanfattades de i en gemensam grupp kallad; "Varbergscharnockiten". Inneslutningar i zirkonerna bestod vanligen av mer än ett mineral. Vanliga associationer var: kvarts, plagioklas, K-fältspat och apatit (fig 5 A).

Apatit (Ap) var det vanligaste mineralet i samtliga prover, vanligtvis förekommande som "rena" inneslutningar med endast apatit (fig 5 B), men även förekommande tillsammans med andra mineral (fig 5 A). Kalifältspat (K-fsp) var det näst mest förekommande mineralet, som enskilda inklusioner och tillsammans med andra vanligt förekommande mineral såsom plagioklas och kvarts. Pertit var ganska ovanligt

Tabell 4. Visar förekommandet av mineral som inneslutningar i zirkon från Varbergscharnockiten. Hur frekvent olika mineral förekommer som inneslutningar illustreras med hjälp av en skala av 5, där 5 är "mycket vanligt", 4: "vanliga", 3: "mellanliggande", 2: "ovanligt", 1: "mycket ovanligt"

Mineral (inneslutning)	Förekomst
Apatit	5
Kalium fältspat	5
Plagioklas	4
Kvarts	4
Biotit	3
Amfibol	3
Ilmenit	3
Hematit	2
Kalcit	2
Pyrit	2
Klinopyroxen	2
Pertit	2
Omvandlingar	1
Zinkblände	1

förekommande (fig 5 C), med K-fsp som värdmineral och lameller av albitisk sammansättning med proportionerna 10 – 20 % albit och 80 – 90 % K-fsp. Opaka mineral som hematit eller magnetit, pyrit och ilmenit var medel till ovanligt förekommande som inneslutningar i zirkon, zinkblände var däremot relativt ovanligt. Biotit och amfiboler, såsom hornblände, var intermediärt förekommande men uteslutande tillsammans med andra mineral, exempelvis ap, qz, plag, k-fsp. Kalcit var medel till ovanligt förekommande i charnockitens zirkoner. Ett exempel på en kalcitinklusion visas i figur. 5 D, där förekommer kalcit tillsammans med apatit och ilmenit. Klinopyroxen (cpx) återfanns som inneslutning i zirkon (fig. 6 C). Figur 7 visar förekomsten av klinopyroxen och K-fsp som inneslutning i zirkon, som bland andra jämfördes kemiskt med klinopyroxen i tunnslip från Varbergscharnockiten (tabell 5) . Några oidentifierade mineral (fig. 6 A-D) innehållande Al, Fe, Mg, Si och ibland K och Ca kan vara vittringsprodukter eller omvandlings mineral, kemisk data från de oidentifierade mineral inneslutningarna samt liknande mineral, existerande runt ortopyroxenkristaller (opx) från Varbergscharnockiten (fig 10 A - B) presenteras i tabell 6.

Tabell 5. Kemisk data av klinopyroxen, i Varbergscharnockiten och som inneslutning i zirkon samt ortopyroxen från bergarten..

	Na	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	O	Total %	Katjon sum
Cpx (inneslutning)										
Vikt %	0.46	5.32	0.31	23.59	14.93	0.59	13.44	40.8	99.44	
Antal joner	0.05	0.51	0.03	1.98	0.88	0.03	0.57	6		4.03
Cpx (i charnockiten)										
Vikt %	0.57	5.4	0.73	23.51	14.77	-	13.7	41.01	99.69	
Antal joner	0.06	0.52	0.06	1.96	0.86	-	0.57	6		4.04
Opx (i charnockiten)										
Vikt %	-	6.92	0.16	21.86	0.45	1.5	27.13	37.99	96.01	
Antal joner	-	0.72	0.01	1.97	0.03	0.07	1.23	6		4.03

Tabell 6. Kemisk data från omvandlingsmineral existerande i anslutning till ortopyroxen i figur 15, samt liknande omvandlingsprodukter som inneslutningar i zirkoner (figur 12). Notera att mineralen är väldigt lika i alla aspekter utom Mg- och Al-innehåll. Omvandlingsmineralen i analysen härstammar sannolikt från liknande källa.

	Na	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	O	Total %	Katjon sum
Omvandling i fig. 10										
Vikt %	-	6.09	5.18	14.76	0.23	0.59	28.14	33.75	88.725	
Antal joner	-	0.71	0.55	1.50	0.02	0.03	1.43	6		4.235
Omvandlade mineral (inneslutning)										
Vikt %	0.27	5.27	7.8	13.48	0.28	-	28.09	34.01	89.18	
Antal joner	0.03	0.61	0.82	1.35	0.02	-	1.42	6		4.25
Vikt %	0.25	5.11	7.64	13.11	0.22	0.51	27.78	33.38	88.01	
Antal joner	0.03	0.6	0.81	1.34	0.02	0.03	1.43	6		4.27

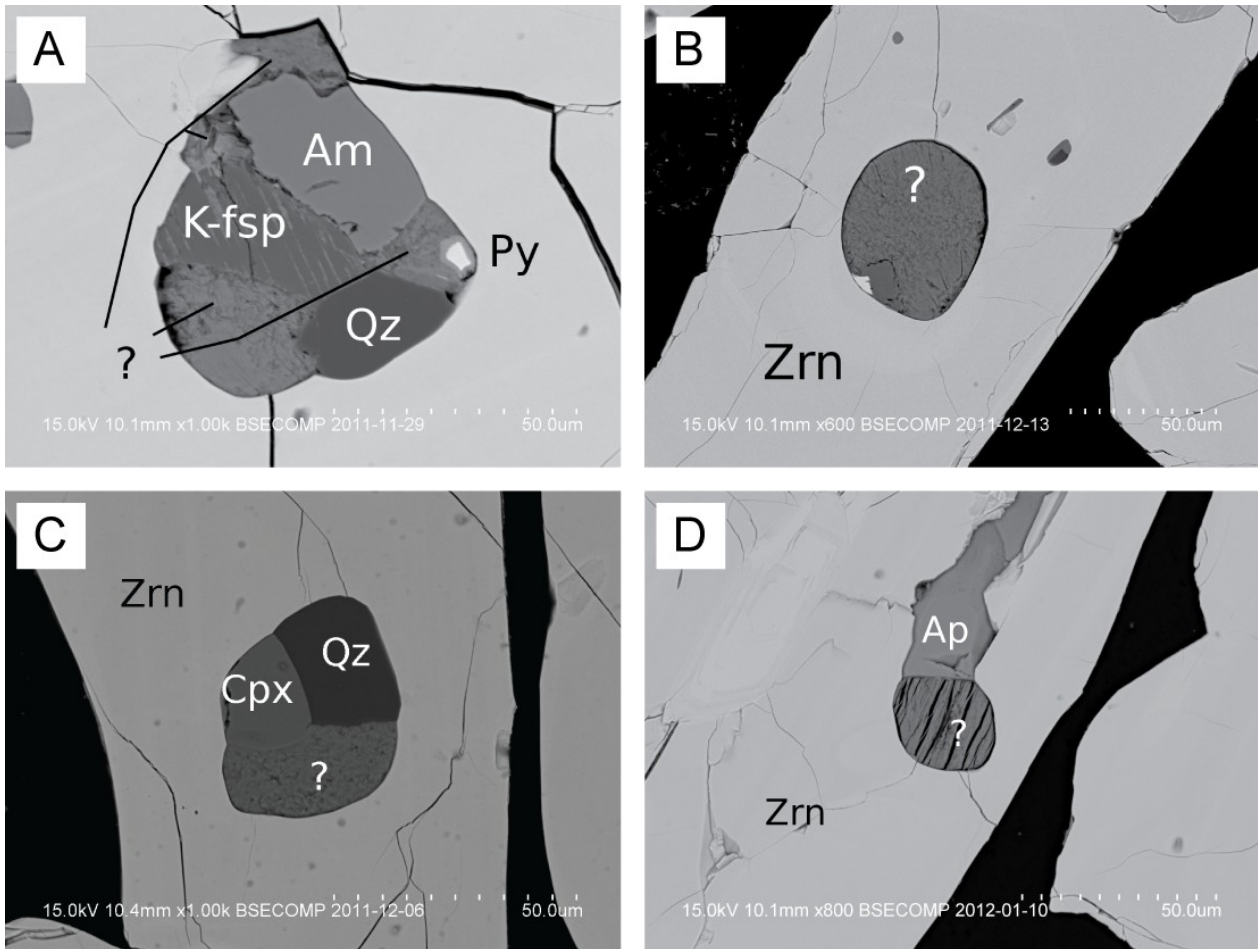


Fig. 6. A: Omvandlingsmineral (?) påträffat med amfibol (am), kali fältspat (k-fsp) kvarts (qz) och pyrit (py).
 B: Omvandlingsmineral existerande som inneslutning i zirkon.
 C: inneslutning av klinopyroxen (cpx), omvandlingsmineral och kvarts (Qz).
 D: Omvandlingsmineral med distinkt form i anslutning till apatit (Ap). Omvandlingen, i detta fall, är inte en produkt från apatit på grund texturella- och sammansättningsmässiga skillnader.

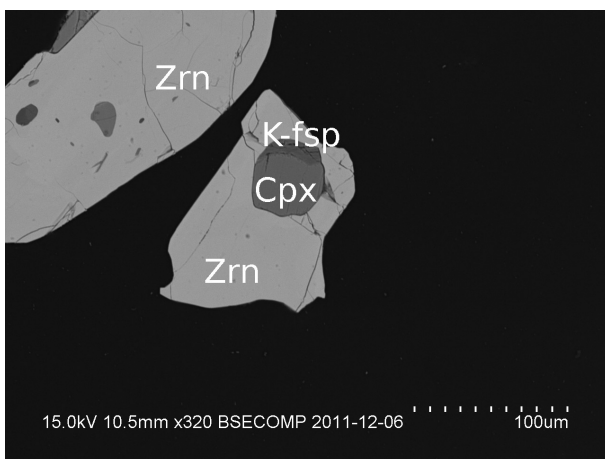


Fig. 7. Klinopyroxen (cpx) och kalium-fältspat (K-fsp) som inneslutning i zirkon.

6.2 Zirkonernas texturella uppträdande i charnockit-bergarten

Fjorton zirkoner, i tunnslip av Varbergscharnockiten, omgavs av mineral såsom, hornblände, kvarts, klinopyroxen, ortopyroxen, plagioklas, kalifältspat, biotit, apatit, ilmenit, hematit och pyrit (fig 8 - 9).

6.3 Zirkonmättnad

Resultat från zirkoniummättnadsberäkningar med GCD kit för varje enhet av VCGA vid temperaturerna 650°C, 750°C och 850°C visas i tabell 7. M-värdet är katjonförhållanden, Zr är det observerade zirkoniumkoncentration från Hubbard (1989), Zr.Sat är zirkoniummättnads nivån för varje prov vid en definierad temperatur (T) och Tzr.sat.C är temperaturen i celsius vid vilket provet är zirkoniummättat. Analysen visar på att VCGA var zirkoniummättad vid temperaturer mellan 766 - 840°C.

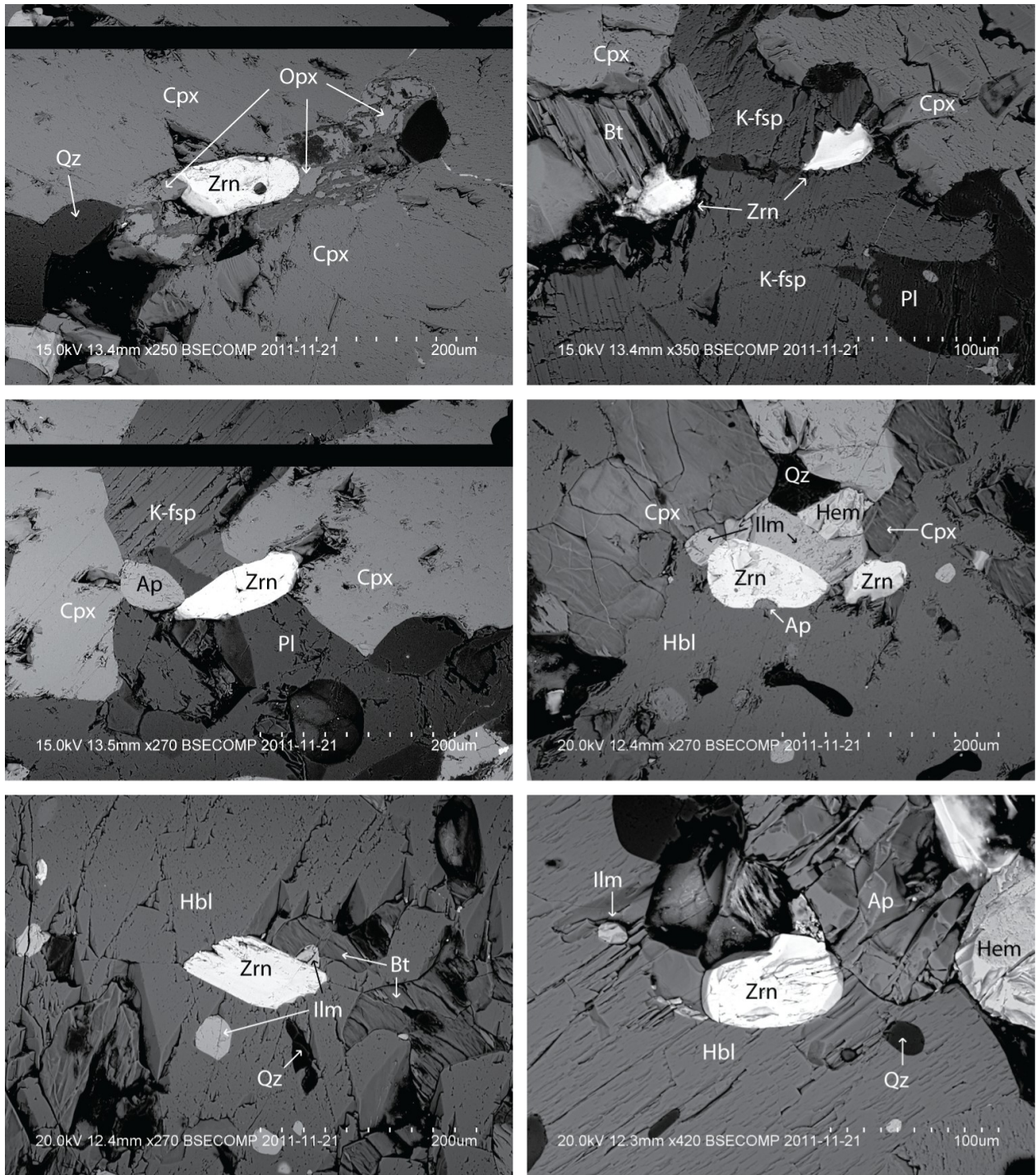


Fig 8. Polerade bergartsprover från Varbergscharnockiten i SEM, backscatter images, visar en slumpmässig fördelning av zirkonkristaller i förhållande till närliggande mineral. En dominerande förekomst i korn-gränser kan ses vilket är en förutsättning för zirkoniummättnadsberäkning. Provet längst upp till vänster visar en zirkon omgiven av omvandlingsmineral från ortopyroxen som även påträffades som inneslutning. Förkortningar: Zrn: zirkon, cpx: klinopyroxen, opx: ortopyroxen, qz: kvarts, bt: biotit, k-fsp: kali-fältspat, pl: plagioklas, ap: apatit, ilm: ilmenit, hem: hematit och hbl: hornblände. Oregelbundenheter i proverna beror på poleringsgraden.

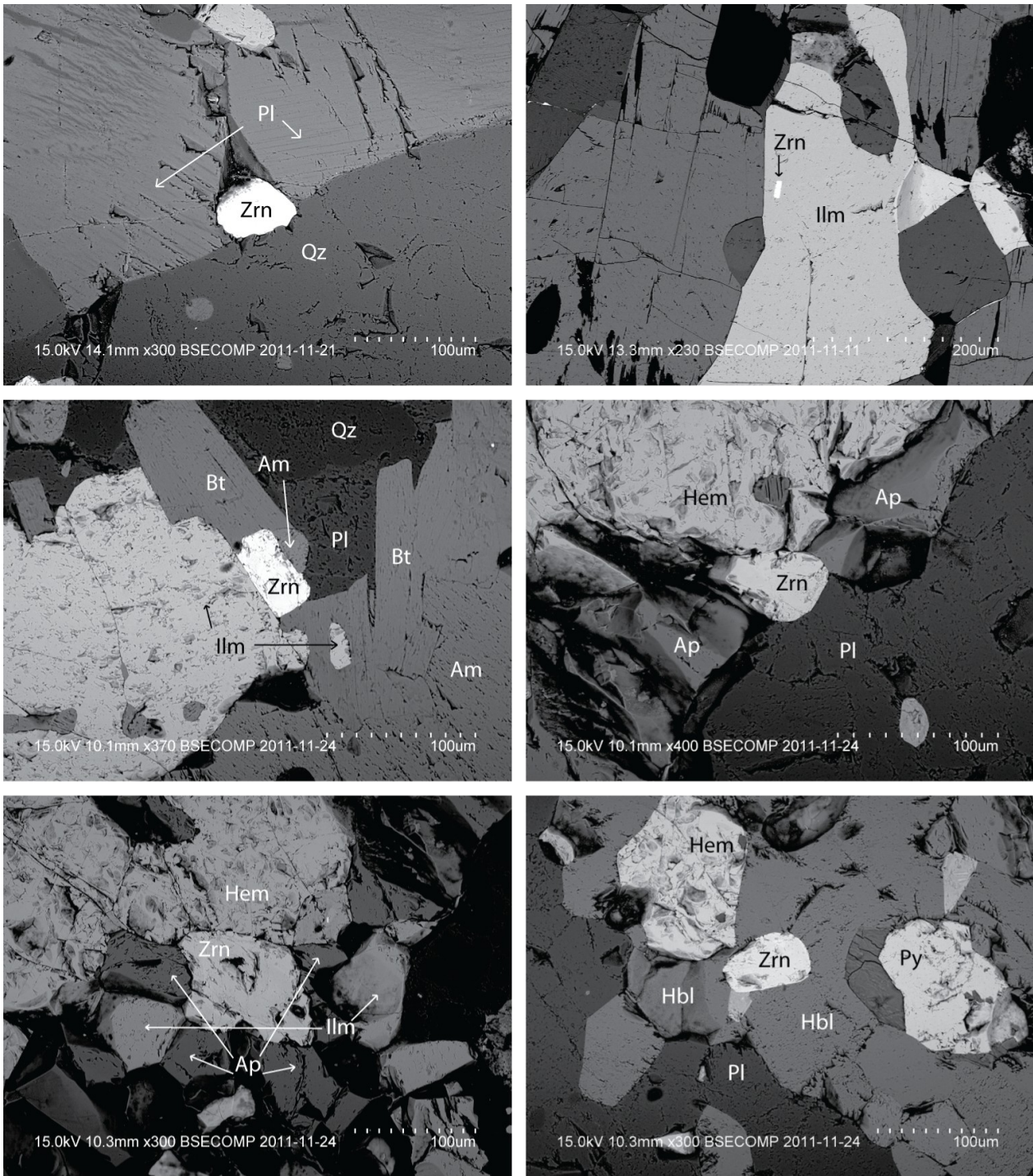


Fig. 9. Polerade bergartsprover från Varbergschamrockiten i SEM, backscatter images, visar en slumpmässig fördelning av zirkonkristaller i förhållande till närliggande mineral. En dominerande existens i korn-gränser kan ses vilket är en förutsättning för zirkoniummättnadsberäkning. Här visas en viss trend av zirkonernas förhållande till ilmenit, hematit och pyrit. Zrn: zirkon, qz: kvarts, bt: biotit, k-fsp: kali-fältspat, pl: plagioklas, ap: apatit, ilm: ilmenit, hem: hematit, hbl: hornblände och py: pyrit. Oregelbundenheter i proverna beror på poleringsgraden.

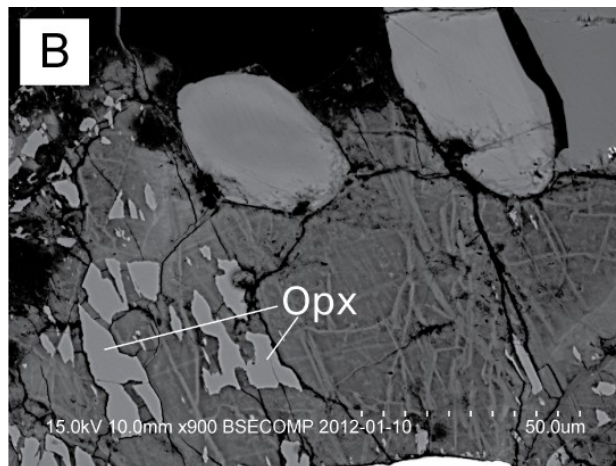
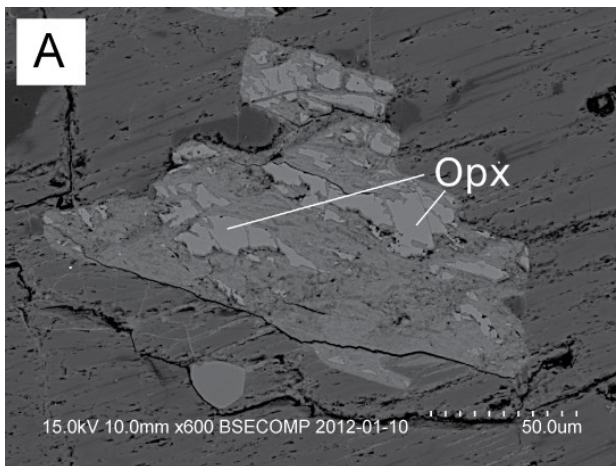


Fig. 10. Ortopyroxen och dess omvandlingsprodukter från bergartstunnslip från Varbergscharnockiten med liknande sammansättning och form som existerande inneslutningar i zirkon (tabell 6).

B: närbild på omvandlingsprodukter från ortopyroxen i bergartstunnslip från Varbergscharnockiten.

Tabell 7. Resultat från zirkonmättnadsberäkningar av VCGA, med GCDkit. Där M: katjonsförhållande, Zr: observerad zirkonkoncentration(ppm), Zr.Sat: mättnadsnivån vid en specifik temperatur, TZr.Sat.C: temperatur där prov är zirkonmättad. All data (m-värden och Zr koncentrationer) är insamlade från Hubbard (1989).

AGC: Apelviken-Getterön charnockit enheten, fin-kornig (f) och grov-korning (c). VC: Varberg charnockit enheten. TC: Trönningenäs charnockit enheten samt TG: Torpa granit enheten.

T = 650°C				
	M	Zr	Zr.sat	TZr.sat.
AGC (f)	2.037	436	45.9	827.4
AGC (c)	2.003	466	44.5	836.4
VC	2.325	281	58.5	766.7
TC	1.851	369	39.1	826.6
TG	1.513	331	29.4	843.6
T = 750°C				
	M	Zr	Zr.sat	TZr.sat.
AGC (f)	2.037	436	179.7	827.4
AGC (c)	2.003	466	174.5	836.4
VC	2.325	281	229.4	766.7
TC	1.851	369	153.4	826.6
TG	1.513	331	115	843.6
T = 850°C				
	M	Zr	Zr.sat	TZr.sat.
AGC (f)	2.037	436	552.1	827.4
AGC (c)	2.003	466	536.3	836.4
VC	2.325	281	705	766.7
TC	1.851	369	471.3	826.6
TG	1.513	331	353.5	843.6

7 Diskussion

Ett mineral inneslutet i ett annat är normalt äldre än värdmineralet. De mineral som, i denna studien, identifierats som inneslutning är därför äldre än zirkon. Detta bevisar inte att ett specifikt mineral är generellt äldre än zirkonerna i Varbergcharnockiten, eftersom mineral kan bildas under olika P-T tillstånd vilket överlappar kristallisationen av zirkon. Ett annat problem är att avgöra om en tolkad inneslutning verkligen är en inklusion och inte en kristall som växt in i zirkonen. För att minimera detta problem har kristaller som inte varit helt omgivna av zirkon, ignorerats i analysen.

Inklusionsstudien visade att de vanligaste mineralinneslutningarna var apatit, kalium-fältspat (k-fsp), plagioklas, kvarts, hornblände och biotit. Den rika förekomsten av apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH})$) visar tidig kristallisation av apatit och högt innehåll av fosfor i Varbergcharnockitens smälta, analysen kunde dock inte säkerställa förekomst av fluorapatit. Kali-fältspat (KAlSi_3O_8) är det näst vanligaste inklusionsmineralet i zirkon. Plagioklasinneslutningar ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) i zirkon från Varbergscharnockiten är relativt natriumrik (Na), nära en sammansättning av oligoklas. Kvarts (SiO_2), vilket förekommer relativt rikligt visar på en mättnad av kiseldioxid i magman. Hornblände, med den allmänna formeln: $(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, är ett vattenhaltigt mineral och ingår i amfibol-gruppen (kallas ibland "amfibol" i denna studie). Frekvensen av hornblände är ett tecken på en inte helt torr magma. Biotit, med den allmänna formeln: $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})$ är ett vattenhaltigt mineral. Biotit som inneslutning i zirkon från Varbergscharnockiten har ett förekomst-värde av 3. Den relativt höga frekvensen av biotit och hornblände kan vara tecken på att vattenhalten ökat vid en sen kristallisation av zirkoner.

Klinopyroxenen funnen som inneslutning i zirkon jämfördes kemiskt med friliggande klinopyroxen i Varbergscharnockiten. Den sammansättningsmässiga

likheten mellan klinopyroxentyperna visar att både friliggande och innesluten klinopyroxen troligen bildades innan zirkonerna i charnockiten. Resultaten av klinopyroxenanalysen visas i tabell 5. Dock kan en statistisk slutsats av analysen inte säkerställas på grund av det låga antalet analyser.

Pertit vilket bildas av avblandning, under kylning, från en fast lösning med sammansättning mellan alkalifältspat och albit, vilket är stabil vid höga temperaturer ($>700^{\circ}\text{C}$). Pertit är karakteristisk för charnockiter och förekommer dessutom som inneslutningar i zirkon. Pertitproportionerna (10-15% albite, 85-90% k-fps) ger ett temperaturintervall, då båda fältspaterna kristalliserats, mellan $620\text{-}680^{\circ}\text{C}$ vid ett tryck på 5 kbar (Morse 1970).

De oidentifierade mineral vilka påträffades som inneslutningar i zirkoner är sannolikt omvandlingsprodukter, vilka även påträffades runt opx-kristaller i tunnslip från Varbergscharnockiten (bild 15-16). Kemisk analys gjordes av inneslutningarna och de mineral som omgav opx i tunnslip, i syfte att jämföra omvandlingsprodukternas och de okända inneslutningarnas geokemi och därigenom se om de kan vara av samma ursprung. Resultaten av analysen visas i tabell 6. Vid geokemisk likhet kan omvandlingsmineralet som inneslutning direkt kopplas till omvandling av ortopyroxen pga. det strukturella sambandet mellan ortopyroxen och omvandlingsmineral i bergartstunnslip (bild 15-16). Därigenom måste opx-kristallisationen skett före kristallisation av zirkon i Varbergscharnockiten. Detta visar att magmatisk kristallisation av ortopyroxen skedde vid ca 1400 Ma. Det bör noteras att omvandlingsmineral kan ha varierande ursprung, då flera mineral kan omvandlas till sekundära mineral. Analysen visar på en likhet mellan inneslutande mineral och de mineral som omger opx i bergartsprover. En stor andel av de oidentifierade inklusionsmineralen kan därför direkt kopplas till bildningen av ortopyroxen och bildningen av Varbergscharnockiten.

Analysen om hur zirkonerna förhåller sig till andra mineral av Varbergscharnockiten resulterade i vissa trender. Zirkonerna befinner sig i hög grad vid korngränser i charnockiten, vilket är en förutsättning för zirkonmättnadsberäkningar. Ett samband kan även ses mellan Fe-oxid- och sulfidmineral (ilm, hem, py) med zirkoner, då de tenderar att vara i nära kontakt med varandra. Detta kan vara en tillfällighet eller en mänsklig felkälla under analysen. Ett exempel är en zirkon funnen som inneslutning i ilmenit, vilket betyder att zirkonen har bildats före ilmenitkristallen eftersom ilmenit saknar kisel. Zirkon kan däremot bildas vid kanter runt ilmenit som reaktionsprodukt vid metamorfos i granulitfacies (Bingen et al 2001).

Zirkonmättnadsberäkningar av VCGA-enheterna visade zirkonmättnad vid temperaturer mellan 766 till 844°C . Vilket är överensstämmande temperaturintervall för VCGA (750 till 850°C) från nyligen publicerad studie av Varbergscharnockiten från Harlov et al. (2013). Analysen visar att Var-

bergscharnockiten (VC) har den lägsta zirkonmättnadstemperatur ($766,7^{\circ}\text{C}$) av enheterna i VCGA. De andra VCGA-enheternas zirkoniummättnadstemperatur varierar från 827 till 844°C . Detta kan innebära att VC-enheten är helt zirkonmättad jämfört med de andra enheterna.

Denna studie visar att eftersom klinopyroxen, pertit samt rester av ortopyroxen, finns som inneslutningar i magmatiskt bildade zirkoner kristalliserade Varbergscharnockiten ursprungligen som en charnockit och inte är enbart resultatet av senare Svekonorvegisk granulitfaciesmetamorfos. Dock kan det inte utslutas att även den Svekonorvegiska metamorfosen ledde till bildning av ny ortopyroxen

8 Slutsatser

- Varbergscharnockiten är zirkonmättad vid temperaturer mellan 766 till 844°C .
- Zirkonerna är belägna i mineralkorngränser i VCGA.
- Apatit var det vanligaste mineral funnen som inneslutning i zirkon från VCGA.
- Pertit hittades som inneslutning, vilket är karakteristiskt för charnockiter.
- Klinopyroxen som inneslutning i zirkon har hög likhet med klinopyroxen i bergarten.
- Rena ortopyroxen kristaller kunde inte identifieras som inneslutningar i zirkon, men omvandlingsprodukter från ortopyroxen hittades som inklusioner, vilket tyder på en tidigare inneslutning av ortopyroxen.
- Scenario II: "ortopyroxenen i Varbergscharnockiten bildades under magmatisk kristallisation på grund av lågt $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ", är giltigt.

Ytterligare studier i detta ämne kan ge nya och viktiga bevis i ämnet om charnockiter är magmatiskt eller metamorft bildade. En större statistisk analys av inneslutnings frekvensen skulle kunna bidra med värdefull data till denna studie, speciellt för att jämföra mineral funna som inneslutningar med mineral från bergartstunnslip. En noggrannare och modernare datering av zirkonerna är nödvändig.

9 Tack

Först och främst vill jag tacka mina handledare, Anders Scherstén och Leif Johansson som introducerade mig till ämnet och tillgodosåg mig med material, handledning under arbetets gång samt revidering och kommentering av mina manuskript.

Jag vill även tacka Carl Alwmark för support när SEM-mikroskopet slutade fungera.

Sist men inte minst vill jag sänka ett stort tack till min familj och vänner som har stöttat mig under arbetets gång, utan er hade detta inte varit möjligt.

10 Referenser

- Bhattacharya, S. & Chaudhary, A.K., 2010: Secular evolution of continental crust: recorded from massif-type charnockites of Eastern Ghats belt, India. *Natural Science* 2, 1079-1084.
- Bhattacharya, S., 2010: Review: the charnockite problem, a twenty first century perspective. *Natural Science* 2, 402-408.
- Bingen, B., Austrheim, H. & Whitehouse, M., 2001: Ilmenite as a source for zirconium during high-grade metamorphism? Textural evidence from the caledonides of Western Norway and implications for zircon geochronology. *Journal of Petrology* 42, 355-375.
- Bingen, B., Nordgulen, Ø. & Viola, G., 2008: A four-phase model for the Sveconorwegian orogeny, SW Scandinavia. *Norwegian Journal of Geology* 88, 43-72.
- Bucher, K. & Frost, B.R., 2006: Fluid Transfer in High-grade Metamorphic Terrains Intruded by Anorogenic Granites: The Thor Range, Antarctica. *Journal of Petrology* 47, 567-593.
- Christoffel, C.A., Connelly, J.N. & Åhäll, K.-I., 1999: Timing and characterization of recurrent pre-Sveconorwegian metamorphism and deformation in the Varberg-Halmstad region of SW Sweden. *Precambrian Research* 98, 173-195.
- Corfu, F., 2004: U–Pb Age, Setting and Tectonic Significance of the Anorthosite–Mangerite–Charnockite–Granite Suite, Lofoten–Vesterålen, Norway. *Journal of Petrology* 45, 1799-1819.
- De Janasi, V.A., 2002: Elemental and Sr–Nd isotope geochemistry of two neoproterozoic mangerite suites in SE Brazil: Implications for the origin of the mangerite–charnockite–granite series. *Precambrian Research* 119, 301-327.
- De Maesschalck, A.A., Oen, I.S., Hebeda, E.H., Verschure, R.H. & Arps, C.E.S., 1990: Rubidium–strontium whole-rock ages of Kataragama and Pottuvil charnockites and East Vijayan gneiss: indication of a 2 Ga metamorphism in the highlands of southeast Sri Lanka. *Journal of Geology* 98, 772-779.
- Duchesne, J.C., Caruba, R. & Iacconi, P., 1987: Zircon in charnockitic rocks from Rogaland (southwest Norway): Petrogenetic implications. *Lithos* 20, 357-368.
- Frost, B.R. & Frost, C.D., 2008: On charnockites. *Gondwana Research* 13, 30-44.
- Frost, B.R., Frost, C.D., Hulsebosch, T.P. & Swapp, S.M., 2000: Origin of the Charnockites of the Louis Lake Batholith, Wind River Range, Wyoming. *Journal of Petrology* 41, 1759-1776.
- Frost, C.D., Frost, B.R., Chamberlain, K.R. & Edwards, B. R., 1999: Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman Batholith, SE Wyoming, USA; a reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *Journal of Petrology* 40, 1771-1802.
- Hanchar, J.M. & Watson, E.B., 2003: Zircon saturation thermometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53, 89–112.
- Harlov, D.E., Kerkhof, A.V.D. & Johansson, L., 2013: The Varberg–Torpa Charnockite–Granite Association, SW Sweden: Mineralogy, Petrology, and Fluid Inclusion Chemistry. *Journal of Petrology* 54, 3-40.
- Holland, T.H., 1900: The charnockite series, a group of Archaean hypersthene rocks in Peninsular India. *Memoirs of the Geological Survey of India* 28, 119-249.
- Hubbard, F. H., 1975: The Precambrian crystalline complex of south-western Sweden. The geology and petrogenetic development of the Varberg region. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 97, 223-236.
- Hubbard, F.H. & Constable, J.L., 1980: Geological background to the Rb–Sr age of the Varberg charnockite, Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 102, 40-42.
- Hubbard, F.H. & Whitley, J.E., 1979: REE in charnockite and associated rocks, southwest Sweden. *Lithos* 12, 1-11.
- Hubbard, F.H., 1978: Geochemistry of the Varberg granite gneisses. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 100, 31-38.
- Hubbard, F.H., 1989: The geochemistry of Proterozoic lower-crustal depletion in southwest Sweden. *Lithos* 23, 101-113.
- Jackson, J.A., 1997: Glossary of Geology. American Geological Institute. 769 pp.
- Johansson, L. & Kullerud, L., 1993: Late Sveconorwegian metamorphism and deformation in southwestern Sweden. *Precambrian Research* 64, 347-360.
- Johansson, L., Lindh, A. & Moller, C., 1991: Late Sveconorwegian (Grenville) high-pressure granulite facies metamorphism in southwest Sweden. *Journal of Metamorphic Geology* 9, 283-292.
- Le Maitre, R.W. (editor), 1989: A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell

Scientific Publications, Oxford. 193 pp.

McCulloch, M.T., Bradshaw, J.Y. & Taylor, S.R., 1987: Sm-Nd and Rb-Sr isotopic and geochemical systematics in Phanerozoic granulites from Fjordland, Southwest New Zealand. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 97, 183-195.

Möller, C. & Söderlund, U., 1997: Age constraints on the regional deformation within the Eastern Segment, S Sweden: Late Sveconorwegian granite dyke intrusion and metamorphic deformational relations. *GFF* 119, 1-12.

Möller, C., 1998: Decompressed eclogites in the Sveconorwegian (–Grenvillian) orogen of SW Sweden: petrology and tectonic implications. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 641-656.

**Tidigare skrifter i serien
”Examensarbeten i Geologi vid Lunds
universitet”:**

313. Kampmann, Tobias Christoph, 2012: U-Pb geochronology and paleomagnetism of the Westerberg sill, Kaapvaal Craton – support for a coherent Kaapvaal-Pilbara block (Vaalbara). (45 hp)
314. Eliasson, Isabelle Timms, 2012: Arsenik: förekomst, miljö och hälsoeffekter. (15 hp)
315. Badawy, Ahmed Salah, 2012: Sequence stratigraphy, palynology and biostratigraphy across the Ordovician-Silurian boundary in the Röstånga-1 core, southern Sweden. (45 hp)
316. Knut, Anna, 2012: Resistivitets- och IP-mätningar på Flishultsdeponin för lokalisering av grundvattenytor. (15 hp)
317. Nylén, Fredrik, 2012: Förädling av ballastmaterial med hydrocyklon, ett fungerande alternativ? (15 hp)
318. Younes, Hani, 2012: Carbon isotope chemostratigraphy of the Late Silurian Lau Event, Gotland, Sweden. (45 hp)
319. Weibull, David, 2012: Subsurface geological setting in the Skagerrak area – suitability for storage of carbon dioxide. (15 hp)
320. Petersson, Albin, 2012: Förutsättningar för geoenergi till idrottsanläggningar i Kallerstad, Linköpings kommun: En förstudie. (15 hp)
321. Axbom, Jonna, 2012: Klimatets och människans inverkan på tallens etablering på sydsvenska mossar under de senaste århundradena – en dendrokronologisk och torvstratigrafisk analys av tre småländska mossar. (15 hp)
322. Kumar, Pardeep, 2012: Palynological investigation of coal-bearing deposits of the Thar Coal Field Sindh, Pakistan. (45 hp)
323. Gabrielsson, Johan, 2012: Havsisen i arktiska bassängen – nutid och framtid i ett globalt uppvärmningsperspektiv. (15 hp)
324. Lundgren, Linda, 2012: Variation in rock quality between metamorphic domains in the lower levels of the Eastern Segment, Sveconorwegian Province. (45 hp)
325. Härling, Jesper, 2012: The fossil wonders of the Silurian Eramosa Lagerstätte of Canada: the jawed polychaete faunas. (15 hp)
326. Qvarnström, Martin, 2012: An interpretation of oncoïd mass-occurrence during the Late Silurian Lau Event, Gotland, Sweden. (15 hp)
327. Ulmius, Jan, 2013: P-T evolution of paragneisses and amphibolites from Romeleåsen, Scania, southernmost Sweden. (45 hp)
328. Hultin Eriksson, Elin, 2013: Resistivitetsmätningar för avgränsning av lakvattenplym från Kejsarkullens deponis infiltrationsområde. (15 hp)
329. Mozafari Amiri, Nasim, 2013: Field relations, petrography and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ cooling ages of hornblende in a part of the eclogite-bearing domain, Sveconorwegian Orogen. (45 hp)
330. Saeed, Muhammad, 2013: Sedimentology and palynofacies analysis of Jurassic rocks Eriksdal, Skåne, Sweden. (45 hp)
331. Khan, Mansoor, 2013: Relation between sediment flux variation and land use patterns along the Swedish Baltic Sea coast. (45 hp)
332. Bernhardson, Martin, 2013: Ice advance-retreat sediment successions along the Logata River, Taymyr Peninsula, Arctic Siberia. (45 hp)
333. Shrestha, Rajendra, 2013: Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of aeolian sediments of Skåne, south Sweden. (45 hp)
334. Fullerton, Wayne, 2013: The Kalgoorlie Gold: A review of factors of formation for a giant gold deposit. (15 hp)
335. Hansson, Anton, 2013: A dendroclimatic study at Store Mosse, South Sweden – climatic and hydrologic impacts on recent Scots Pine (*Pinus sylvestris*) growth dynamics. (45 hp)
336. Nilsson, Lawrence, 2013: The alteration mineralogy of Svartliden, Sweden. (30 hp)
337. Bou-Rabee, Donna, 2013: Investigations of a stalactite from Al Hota cave in Oman and its implications for palaeoclimatic reconstructions. (45 hp)
338. Florén, Sara, 2013: Geologisk guide till Söderåsen – 17 geologiskt intressanta platser att besöka. (15 hp)
339. Kullberg, Sara, 2013: Asbestkontamination av dricksvatten och associerade risker. (15 hp)
340. Kihlén, Robin, 2013: Geofysiska resistivitetsmätningar i Sjöcrona Park, Helsingborg, undersökning av områdets

- geologiska egenskaper samt 3D modellering i GeoScene3D. (15 hp)
341. Linders, Wictor, 2013: Geofysiska IP-undersökningar och 3D-modellering av geofysiska samt geotekniska resultat i GeoScene3D, Sjöcrona Park, Helsingborg, Sverige. (15 hp)
342. Sidenmark, Jessica, 2013: A reconnaissance study of Rävliiden VHMS-deposit, northern Sweden. (15 hp)
343. Adamsson, Linda, 2013: Peat stratigraphical study of hydrological conditions at Stass Mosse, southern Sweden, and the relation to Holocene bog-pine growth. (45 hp)
344. Gunterberg, Linnéa, 2013: Oil occurrences in crystalline basement rocks, southern Norway – comparison with deeply weathered basement rocks in southern Sweden. (15 hp)
345. Peterffy, Olof, 2013: Evidence of epibenthic microbial mats in Early Jurassic (Sinemurian) tidal deposits, Kulla Gunnarstorp, southern Sweden. (15 hp)
346. Sigeman, Hanna, 2013: Early life and its implications for astrobiology – a case study from Bitter Springs Chert, Australia. (15 hp)
347. Glommé, Alexandra, 2013: Texturella studier och analyser av baddeleyitombvandlingar i zirkon, exempel från sydöstra Ghana. (15 hp)
348. Brådenmark, Niklas, 2013: Alunskiffer på Öland – stratigrafi, utbredning, mäktigheter samt kemiska och fysikaliska egenskaper. (15 hp)
349. Jalnefur Andersson, Evelina, 2013: En MIFO fas 1-inventering av fyra potentiellt förorenade områden i Jönköpings län. (15 hp)
350. Eklöv Pettersson, Anna, 2013: Monazit i Obbhult-komplexet: en pilotstudie. (15 hp)
351. Acevedo Suez, Fernando, 2013: The reliability of the first generation infrared refractometers. (15 hp)
352. Murase, Takemi, 2013: Närkes alunskiffer – utbredning, beskaffenhet och oljeinnehåll. (15 hp)
353. Sjöstedt, Tony, 2013: Geoenergi – utvärdering baserad på ekonomiska och drifttekniska resultat av ett passivt geoenergisystem med värmeuttag ur berg i bostadsrättsföreningen Mandolinen i Lund. (15 hp)
354. Sigfúsdóttir, Thorbjörg, 2013: A sedimentological and stratigraphical study of Veiki moraine in northernmost Sweden. (45 hp)
355. Månsson, Anna, 2013: Hydrogeologisk kartering av Hultan, Sjöbo kommun. (15 hp)
356. Larsson, Emilie, 2013: Identifying the Cretaceous–Paleogene boundary in North Dakota, USA, using portable XRF. (15 hp)
357. Anagnostakis, Stavros, 2013: Upper Cretaceous coprolites from the Münster Basin (northwestern Germany) – a glimpse into the diet of extinct animals. (45 hp)
358. Olsson, Andreas, 2013: Monazite in metasediments from Stensjöstrand: A pilot study. (15 hp)
359. Westman, Malin, 2013: Betydelsen av raka borrhål för större geoenergisystem. (15 hp)
360. Åkesson, Christine, 2013: Pollen analytical and landscape reconstruction study at Lake Storsjön, southern Sweden, over the last 2000 years. (45 hp)
361. Andolfsson, Thomas, 2013: Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses by use of Thermal Conductivity Scanner: A study of thermal properties in Scanian rock types. (45 hp)
362. Engström, Simon, 2013: Vad kan inneslutningar i zirkon berätta om Varbergscharnockiten, SV Sverige. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund