



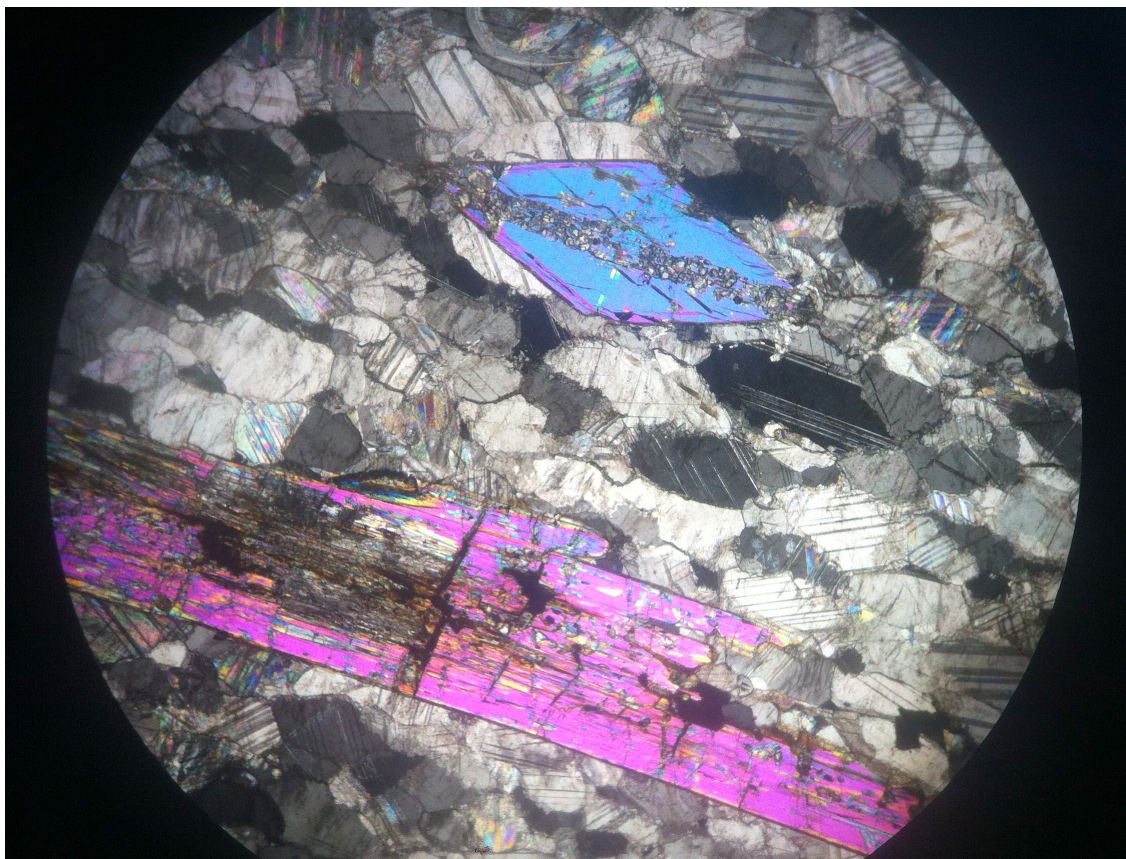
Stockholm
University

Bachelor Thesis

Degree Project in
Geology 15 hp

Analys av temperaturförhållanden samt fluidsammansättning registrerat i metakarbonater på nordvästra Utö

Mira Rundberg



Stockholm 2015

Department of Geological Sciences
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm

ABSTRACT

This thesis attempts to determine the metamorphic conditions registered in metacarbonates, found in the northwest part of Utö (Stockholm archipelago). The interpretation of temperature and fluid composition for the analyzed samples indicates that the peak metamorphism occurred in the amphibolite facie. The result points to a temperature of $551^{\circ}\text{C} \pm 30$ for a fixed pressure of 5.3kbar. The pressure value was calculated by Yngwe, (2015). The second result shows that the $X(\text{CO}_2)$ fluid composition was determined to be 0.558 which indicates a fluid containing ~56% CO_2 and the rest of H_2O . The analyzed area was mainly comprised of metacarbonates with various compositions ranging from almost pure marble to silica rich skarn, which is a type of calc-silicate that is formed through metasomatic interactions between carbonates and fluids. Furthermore, pyroclastic and volcanic bedrocks were observed in the area.

The project is based on a 10 day long field excursion with the goal to obtain a geological map for an area of $\sim 1 \text{ km}^2$ and to collect suitable rock samples for further analysis. The samples were analyzed at the Department of Geological Sciences at Stockholm University. The mineralogical content and reaction textures in the rock were determined through petrographic analysis. Geochemical analyses were performed with a X-ray fluorescence (XRF) instrument and the mineral chemistry was studied through electron microprobe analysis (EMPA). One sample was chosen where calcite and dolomite were coexisting in order to calculate temperature. This was done with the empirical formula for geothermometry that was developed by Annovotz & Essene (1986). A T-X(CO_2) diagram was created by modeling mineral data in the computer programs AX 2 and THERMOCALC 3.37, developed by Powell & Holland (1998).

INNEHÅLL

1. INLEDNING	5
1.1 MÅL OCH SYFTE.....	6
1.2 GEOLOGISK BAKGRUND	6
1.3 STUDERAT OMRÅDE.....	7
1.4 METAMORFOS AV KARBONATER.....	7
2. METOD	8
2.1 KARTERING OCH PROVTAGNING	8
2.2 PREPARERING AV PROVER	8
2.3 ANALYS AV TUNNSLIP	8
2.4 EMPA - ELEKTRONMIKROSONDANALYS.....	9
2.5 XRF - X-RAY FLUORESCENCE	9
2.6 AX & THERMOCALC.....	9
2.7 BERÄKNING AV TEMPERATUR	10
3. RESULTAT	11
3.1 BERGGRUNDSKARTA.....	11
3.2 LITOLOGISK BESKRIVNING	12
3.3 PETROGRAFISK ANALYS	14
3.4 KEMISKSAMMANSÄTTNING & TEMPERATUR.....	17
4. DISKUSSION	18
5. FELKÄLLOR	20
6. SLUTSATS	20
7. TACK TILL	21
8. REFERENSER	22

1. INLEDNING

Följande projektarbete utgår från en tio dagar lång fältstudie på nordvästra delen av Utö i Stockholms skärgård. Utö är en del av Bergslagen och tillhör den Svekofenniska provinsen, där berggrunden är ett resultat av flera geologiska processer och händelser som har ägt rum under de senaste två miljarder åren. Eftersom bergarterna är välbevarade och lättåtkomliga är det möjligt att se spår av dessa händelser. Utö är därför ett utmärkt område för geologiska fältstudier. För att förstå de geologiska processer som ägt rum på denna plats genom tiderna har de metamorfa processerna analyserats i bergarterna och en kartering över området genomförts.

Därför togs prover av huvudsakligen metakarbonater, som var de mest förekommande bergarterna i området. Vid Institutionen för geologiska vetenskaper, IGV, på Stockholms universitet genomfördes olika typer av analyser på proverna. Med hjälp av petrografisk analys bestämdes det mineralogiska innehållet och reaktionstexturer. Geokemisk analys utfördes med XRF och mineral kemin undersöktes med EMPA. Med erhållen data från analys, utfördes geotermobarometriska beräkningar med hjälp av data programmen AX och THERMOCALC, skapad av Powell & Holland (1998). Detta för att avgöra möjliga reaktioner för givet tryck under olika temperaturförhållanden och fluidsammansättningar. Temperatur för området beräknades genom den empiriska formeln för geotermometri, framtagna av Annovitz & Essene (1986).

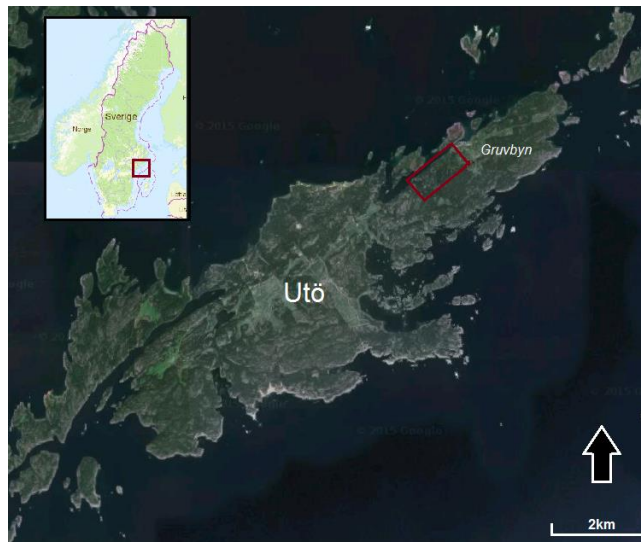


Fig.1. Sammansatt figur av satellitbild över Utö (*Google Maps, 4 juni 2015*) samt positionen i förhållande till Sverige (*Lantmäteriets topografiska karta, 4 juni 2015*). Den röda rektangeln markerar det karterade området.

1.1 MÅL OCH SYFTE

Detta examensarbete på kandidatnivå handleds av professor Alasdair Skelton och doktor Joakim Mansfeld. Arbetet är en del av projektet *The metamorphic map of Sweden*, vars syfte är att skapa en förståelse för den metamorfa historien registrerad i Sveriges berggrund. Detta projekt är finansierat av Sveriges geologiska undersökningar även kallat SGU.

Målet för projektet är:

- Att kartlägga ett område på nordvästra Utö, samt ta passande bergartsprover för geotermometriska beräkningar.
- Förbereda proverna för petrografisk och geokemisk (XRF) analys för att fastställa den metamorfa historien.
- Analysera mineralkemin genom EMPA (electron microprobe analysis)
- Att använda THERMOCALC för att uppskatta P-T-X(CO₂) under metamorfos.

1.2 GEOLOGISK BAKGRUND

Det ursprungliga intresset för Utö har främst legat i öns malmförekomster, då järnmalm har brutits sedan 1600-talet. Även äldre spår av malmbrytning tyder på att det började redan på 1100-talet. Gällande geologisk historia så anses ön vara mycket intressant då bergarterna som finns är välbevarade och exponerade till ytan sett. Det är därför möjligt att följa dess historia som sträcker sig ca 1900 Ma bakåt i tiden, då de initiala bergarterna bildades (Talbot, 2008).

Dessa skapades då klastiskt och organiskt material avsattes på havsbotten och bildade sedimentära avlagringar. Ytterligare bergarter bildades i samband med tektonisk aktivitet, då närliggande plattgränser konvergerade och bildade en subduktionszon. Det är troligt att denna tektoniska miljö låg sydost om nuvarande Utö (Talbot, 2008). I samband med detta bildades en ryolitisk vulkanisk öbåge. Dess lava och pyroklastiska material blandades med sedimentära material. Under de delvis lugna perioderna avsätts karbonater. Dessa processer resulterade i bergarter så som gråvackor, kalksten samt felsiska vulkaniter, vilka är karakteriserande för den geologiska regionen Bergslagen (Lundstöm et.al, 1998). De tidigare nämnda järnmalmerna bildades troligen under denna händelse, i samband med att järnrika lösningar innehållande kisel reagerade med syrehaltigt havsvatten och bildade så kallade bandade järn formationer, BIF, (Talbot, 2008).

Omkring 1880 Ma, upphörde vulkanismen men plattorna fortsatte att konvergera vilket resulterade i metamorfa deformations processer som kom att påverka bergarterna. Dessa processer har resulterat i en vertikalt bandad stratigrafi, vilket innebär att det går att vandra från de äldsta bergarterna på sydöstra Utö, till de yngsta i nordväst (Lundström et.al 1998). Bergskedjor bildades och formade det vi idag kallar den Svekofenniska orogenesen, som Utö är en del av. Då metamorfosen nått dess högsta grad kollapsade bergskedjan, vilket kan ses i form av intrusioner utav granitoider och pegmatiter.

1.3 STUDERAT OMRÅDE

Området som har studerats för detta arbete ligger på Utös nordvästra del, längs med kusten och ca 600m in mot öns centrala del (Se karta fig.1). Denna yta utgörs av skogsmark och en varierande topografi med hållar upp till 30m.ö.h.

Bergarterna på det karterade området utgörs av metamorfoserad sedimentära och vulkaniska bergarter. Då samtliga är påverkade av metamorfos så kommer prefixet meta att utelämnas framför bergartsnamnen framöver i texten. Berggrunden utgörs av pyroklastiska samt vulkaniska bergarter av olika slag. Dock är majoriteten karbonater med varierande komposition av silikat- och karbonatmineral. Denna typ av bergart kan klassificeras som skarn, vilket är en typ av calc-silikat som bildas genom metasomatiska interaktioner mellan karbonat- och kiselrika bergarter eller fluider (Winter, 2014). Fluiderna kan vara av magmatiskt eller hydrotermalt ursprung. Därför hittas skarn oftast i samband med plutonisk aktivitet eller i grunda geotermala system (Burt, 1977).

1.4 METAMORFOS AV KARBONATER

Vid ett tidigt stadium av metamorfos består skarn av en blandning av karbonatmineral där kalcit, dolomit och ankerit är de mest förekommande. Ofta förekommer även flinta som utfällningar, samt detritalt material såsom kvarts, fältspat och vattenhaltiga mineral från t.ex. leror (Winter 2014). Eskola (1922) var den första som beskrev sekvensen av mineral som vanligtvis utvecklas i metakarbonater under metamorfos. Han beskrev följande sekvens med ökad grad av metamorfos: Talc zonen - tremolit zonen - diopsid/fosterit zonen.

Temperatur och $X(\text{CO}_2)$ förhållandet under metamorfos, där $X(\text{CO}_2)$ är andelen koldioxid i $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ fluidblandningar kan uppskattas. Detta utifrån mineralinnehållet i karbonater. Fluider har en avgörande roll i många geologiska processer. De kan t.ex. lösa upp material, transportera värme och upplösta ämnen, fälla ut mineral, samt påskynda deformations processer. Detta innebär att metamorfos inte bara kontrolleras av ändringar i tryck och temperatur, men även av fluider (Kleine, 2015). Detta refereras som en metasomatisk reaktion, vilket involverar ändringar i den totala kemiska sammansättningen i en bergart.

2. METOD

2.1 KARTERING OCH PROVTAGNING

Fältarbetet utfördes under två perioder: 30/3-3/4 samt 6/4-10/4 2015. Eftersom området bestod av skogsmark, var det ej möjligt att göra en fullständig täckande identifikation av berggrunden. Exponerade hållar identifierades visuellt med hjälp av lupp. Skarnbergarten delades upp ytterligare i två undergrupper: karbonatrikt skarn och silikatrikt skarn. Dessa särskildes genom att analysera hårdheten, då skarn med högre silikat innehåll är hårdare än karbonatrikt skarn.

I hållar där foliation och bandning tydligt kunde observeras mättes strykning och stupning med hjälp av en kompass samt inklinometer. Då karteringen var utförd valdes sju lokaler för provtagning. Lokalerna representerade den genomsnittliga berggrunden på området. Totalt togs sju prover från olika skarn-hållar med märkbart varierande sammansättning av silikat och karbonat. Endast ett av dess prov var en vanligt förekommande vulkanit. Denna togs för att undersöka misstanke om innehållande granater. Observationerna sammanställdes i form av en berggrundskarta med hjälp av data programmet QGIS.

2.2 PREPARERING AV PROVER

Proverna preparerades under ledning av Dan Zetterberg på Stockholms universitet för att sedan kunna tillverka tunnslip av dem. Foliationerna mättes ut och ett snitt gjordes med hjälp av en diamantsåg, vinkelrätt mot foliationen. Proverna sågades sedan ned i mindre bitar. Ytorna polerades med kiselkarbid-pulver med en kornstorlek på 180 µm. Proverna skickades sedan till Vancouver Petrographic i Kanada, där tunnslip tillverkades.

2.3 ANALYS AV TUNNSLIP

Tunnslipen analyserades med ett petrografiskt ljusmikroskop. Mineral identifierades och den modala sammansättningen uppskattades visuellt. Även reaktionstexturer undersöktes för att få en inblick i de progressiva samt retrograda processer som kan ha ägt rum. Då alla prover analyserats valdes tunnslip: UÖMR-A ut för EMPA och XRF-analys. Detta prov valdes då det troddes innehålla samexisterande kalcit och dolomit så att en geotermometrisk beräkning skulle kunna utföras. Även prov UÖMR-I2 valdes för identifikation av olika amfibol och pyroxen.

2.4 EMPA – ELEKTRONMIKROSONDANALYS

De utvalda tunnslipen analyserades på Geocentrumet vid Uppsala universitet med en elektronmikroskop av märket Jeol JXA-8530F. Elektronmikroskopet skickar en stråle som träffar en punkt på tunnslipen. Röntgenstrålar bildas vid träffpunkten som sedan emitteras och når en detektor. Detektorn mäter strålarna och räknar ut koncentrationen av enskilda element i mineralet. Den kemiska sammansättningen mättes i karbonatmineralen, för att kunna avgöra dess magnesiuminnehåll och fastställa om provet innehöll kalcit och/eller dolomit. För varje utvalt mineralkorn, gjordes två mätningar i mitten, samt en i kanten på kornet. Totalt utfördes 18 mätningar fördelade på två tunnslip.

2.5 XRF – X-RAY FLUORESCENCE

För UÖMR-Aprovet mättes den totala kemiskasammansättningen med en portabel XRF av märket Delta X. Instrumentet sänder ut ett spektrum av röntgenstrålar som absorberas av provet. Provet avger i sin tur strålar som skapar ett spektrum. Olika

grundämnen ger olika spektrum, det kan då avgöras vad provet består av. Provet besköts ca 30 gånger på varierande ytor för att kunna räkna fram en snittsammansättning i viktprocent.

2.6 AX & THERMOCALC

En uppskattning av temperatur i förhållande till fluidsammansättningen för UÖMR-A provet gjordes i modelleringsprogrammen AX 2 och THERMOCALC 3.37, skapade av Powell och Holland (1998). THERMOCALC är ett program som utför termobarometriska- och fasdiagramuträkningar av metamorfa bergarter, genom mineralers kemiskasammansättningar (Powell & Holland, 1998). Programmet baseras på databaser uppbyggda av experimentell data från reaktioner mellan olika mineral som förekommer som fasta lösningar (Powell & Holland, 1998).

Den erhållna datan från mikroskopanalysen angav mineralernas kemiska sammansättning av oxiderna i viktprocent. En textfil skapades där mineralsammansättningen fördelades på följande oxider: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O & K_2O . Textfilen användes som indata för programmet AX, där programmet föreslog ett tryck på 6kbar samt 550°C för beräkningen. Programmet beräknade aktiviteten för varje ändkomponent som mineralet bestod av. Ett minerals aktivitet kan ses som ett mått på dess förmåga att reagera i det mineralogiska tillstånd det befinner sig i. Avgörande är mineralets egna sammansättning i förhållande till omgivande minerals kemiska sammansättningar. Detta resulterade i en utfil, som skrevs om och sparades som en tc-fil för att kunna läsas av THERMOCALC. Flödesschema över valen som gjordes i THERMOCALC illustreras på nästkommande sida.

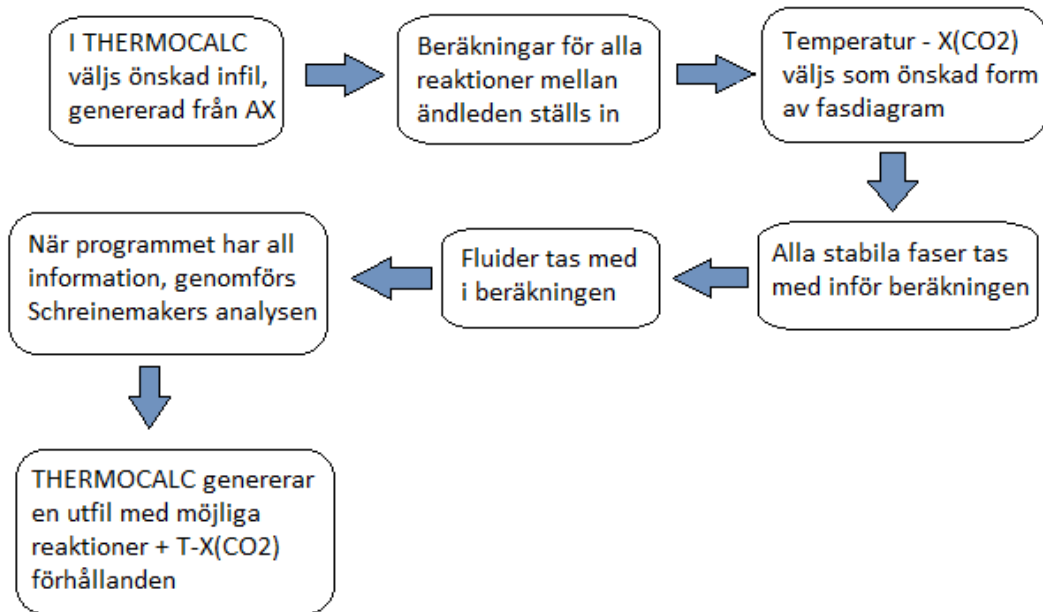


Fig.2. Flödesschema över valen i THERMOCALC

2.7 BERÄKNING AV TEMPERATUR

Temperatur vid bildandet av bergarten kan härledas genom att undersöka hur mineral är fördelade i UÖMR-Aprovet. Temperaturförhållanden under metamorfos kan fastställas genom att undersöka fördelningen av magnesium i kalcit och dolomit i ett jämviktssystem (Anovitz, et.al. 1987). Lösligheten mellan kalcit och dolomit är mycket användbar för temperaturbestämning, då magnesiumhalten i kalcit som samexisterar med dolomit ökar systematiskt med temperaturen (Philpotts et.al. 2014). Den empiriskt framtagna formeln för geotermometri (Anovitz & Essene, 1986) lyder som följande:

$$Temperatur\ K = -2360 \times -\left(\frac{0.01345}{x}\right)^2 + 2620 \times +2608 \times^{0.5} + 334$$

$x = \text{molproportionen av Mg i kalcit}$

Från EMPA erhöles värden för magnesium och kalcium som oxider, MgO & CaO, i viktprocent. Dessa konverterades till rena ämnen, Mg och Ca, för att sedan kunna beräkna molfraktionen av magnesium i kalcit. Beräkningen utfördes genom att dividera substansmängden för magnesium med summan av substansmängden för magnesium och kalcium. Då mol fraktionen av magnesium i kalcit var framtagen, användes värdet i formeln för geotermometrisk beräkning (se ovan).

$$\text{molfraktion Mg} = \frac{\left(\frac{x\ Mg}{\text{mol Mg}}\right)}{\left(\frac{x\ Mg}{\text{mol Mg}} + \frac{x\ Ca}{\text{mol Ca}}\right)}$$

3. RESULTAT

3.1 BERGGRUNDSKARTA

Från kartering identifierade följande bergarter: kvartsporfyr, vulkanit och skarn. Skarn är vidare uppdelat i karbontrikt skarn och silikatrikt skarn. Olika typer av vulkaniter observerades. En rödaktig vulkanit urskilde från de resterande pga. dess innehåll av kaliumfältspat. En annan typ av vulkanit var rik på kvarts och ljus till färgen. Generellt var det svårt att avgöra kontakt-zoner mellan de olika bergarterna. Dels pga. den tätbevuxna skogen, men även för att många bergarter förekom som band i varandra. En håll har klassificerats som en bergart om den uppskattats innehålla >70% av bergarten.

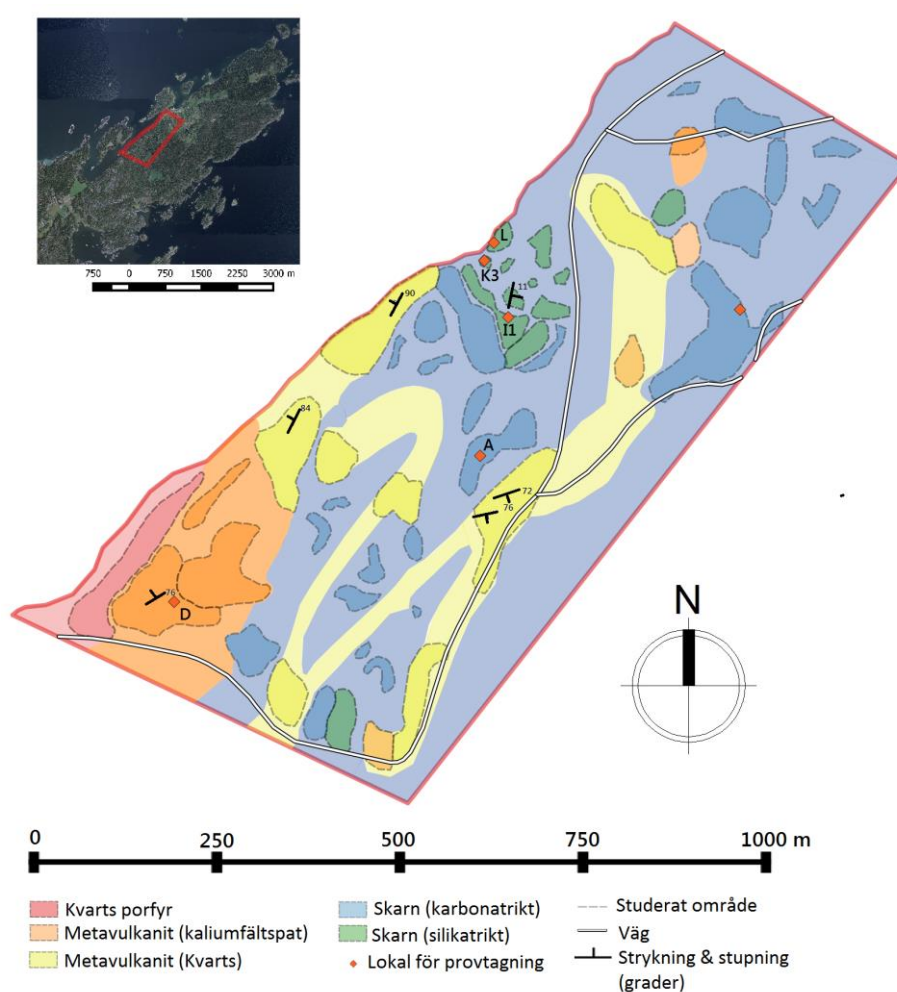


Fig.3. Kartan visar de olika litologiska zonerna. De starka färgerna markerade med streckad linje indikerar synliga hållar där observationer och identifikationer har utförts. De transparenta färgerna visar områden som har extrapolerats från de observerade lokalerna, samt tolkats baserat på Talbots, (2008) berggrundskarta (Se bilaga.1.). Kartan visar även provtagningspunkter. Det finns ingen bestämd kontaktzon mellan bergarterna markerad på kartan.

3.2 LITOLOGISK BESKRIVNING

Bergarter som analyserades var: kvartsporfyr, vulkanit och karbonater.

Kvartsporfyren bestod av en mikrokristallinmatrix som utgjordes av felsiska mineral, vilket resulterar i dess ljusa färg. Strökorn av kvarts och fältspat förekom relativt jämt fördelade i grundmassan. Dessa varierade i storlek från ett par mm upp till en cm.

Vissa partier innehöll även glimmermineral. Porfyren hittades på kanten av det undersökta områdets sydvästra del.

Metasedimentärt material från vulkaniska avsättningar, klassificerades som vulkaniter. Dessa observerades i hällar och lager spridda över hela området. Vulkaniterna varierade i sammansättning, då färgen varierade från rosa till grå beroende på den mineralogiska sammansättningen av kvarts och kaliumfältspat. Vid vissa hällar förekom gröna fält, vilket troligen indikerar innehåll av epidot. Vulkaniterna är överlag homogena.

Den mest förekommande bergarten var skarn. Skarnet klassificerades beroende på dess grad av karbonatinnehåll. Det kiselrika skarnet är betydligt hårdare och har ofta en grönaktigare färg i förhållande till det karbonatrika skarnet. Oftast förekommer bergarterna i ordningsföljden karbonatrikt skarn – silikatrikt skarn – vulkanit.

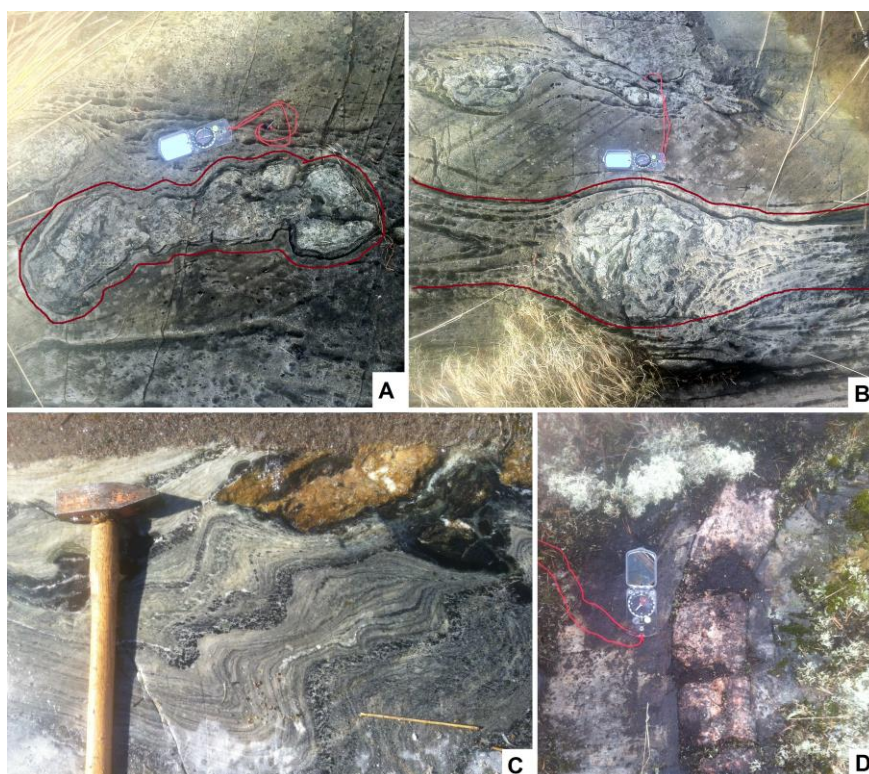


Fig.4. Observerade strukturer och formationer. **A**, boudinage av kvarts i karbonatsediment vid lokal L (se bergartskarta). **B**, deformerade siliciklastiska fragment i en karbonatrik melange, lokal L. **C**, Veckat skarn, där de mörkare partierna är rika på amfiboler, lokal K3. **D**, intrusion av en pegmatit i en vulkanisk bergart, lokal D

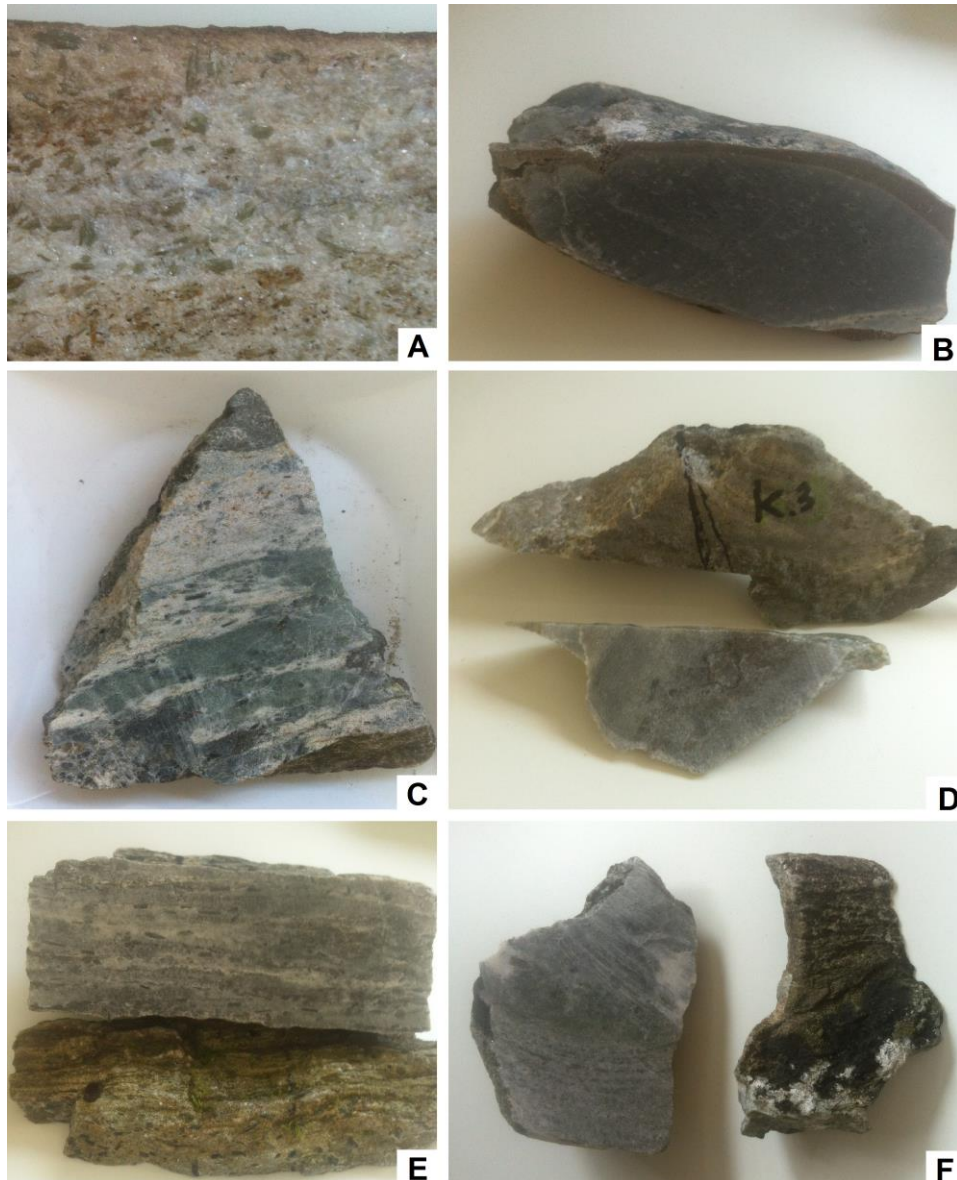


Fig.5. Prover tagna från olika lokaler. Samtliga är kategoriserade som skarn, men varierar till utseende och sammansättning. **A.** Prov: UÖMR-A. Karbonatrikt skarn bestående nästan enbart av dolomit och kalcit. Centimeter stora, ljusgröna och fibrösa tremolit kristaller. Karaktäristisk brun/orange vittringsyta. **B.** Prov:UÖMR-F. Silikatrikt skarn. Ljusa fält av karbonat mineral. Vittrad yta längs med kanten. **C.** Prov: UÖMR-I1. De ljusa fälten är stråk av karbonatmineral med få porfyroblaster av amfibol kristaller. De gröna fälten är rikare på silikat och har ett högre amfibol innehåll. **D.** Prov: UÖMR-K3. Silikatrikt skarn. Relativt homogen och mycket finkristallin. **E.** Prov: UÖMR-I1. Silikatrikt skarn. Foliation samt elongerade amfiboler med en orientation. **F.** Prov: UÖMR-L. Silikatrikt skarn. Vita fält bestående av enbart karbonatit mineral. Mittpartiet utgörs av silikater, med porfyroblaster av amfibol.

3.3 PETROGRAFISK ANALYS

Nedanför följer observationer samt beskrivningar som utfördes vid analys av tunnslip.

Prov: UÖMR-A

Matrix bestående av anhedrala karbonat mineral i varierande storlek. I matrix finns stora kristaller av subhedrala till euhedrala amfiboler. Amfiboler förekommer i två orientationer. Provet innehåller ett fåtal opaka mineral samt små kluster av kvarts.

Bergart: Skarn (Karbonatrikt)

Mineralogi	Karbonatmineral	Amfibol	Kvarts	Accesoriskt
Modal procent	~89%	~10%	~1%	<1%

Prov: UÖMR-F

Mikrokristallin matrix av huvudsakligen karbonat mineral med en tydlig foliation. Större kristaller av subhedrala amfiboler med en föredragande. I provet finns även ett fåtal ådror med anhedrala porfyroblaster av karbonatmineral. Det förekommer även några opaka mineral samt biotit, där vissa omvandlats till klorit.

Bergart: Skarn (silikatrikt)

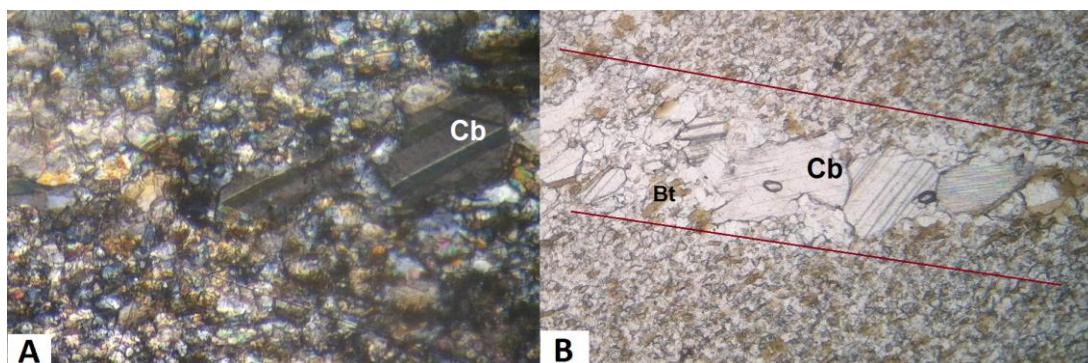


Fig.6. Stråk av karbonat kristaller som har vuxit mer i förhållande till den finkorniga matrixen. Bild A visas i XPL och bild B i PPL.

Mineralogi	Karbonatmineral	Kvarts	Biotit	Accesoriskt
Modala procent	~60%	~30%	~10%	<1%

Prov: UÖMR-D

Finkornig matrix av anhedrala plagioklas och kvarts kristaller. Matrixen innehåller elongerade glimmermineral som har en orientation, där kloritisering förekommer i vissa av biotiterna. Det finns några större ådror med kvartskristaller. Längst med ådrorna finns lager av klorit samt epidot. Provet innehåller även subhedrala amfiboler och några få opaka mineral.

Bergart: Metavulkanit

Mineralogi	Kvarts	Fältspat	Amfibol	Epidot	Klorit	Biotit	Accesoriskt
Modal procent	~40%	~30%	~10%	~5%	~10%	~5%	<1%

Prov: UÖMR-I1

Anhedrala karbonat mineral samt kvarts förekommer som en finkornig matrix. Kvartskristaller uppvisar undolös utsläckning. I matrixen finns porfyroblaster av elongerade och fibrösa amfiboler. Några av amfibolerna är altererade genom karbonat mineral som ersätter amfibolen. Provet innehåller även stråk av biotit-rika fält, samt opaka mineral.

Bergart: Skarn (Silikatrikt)

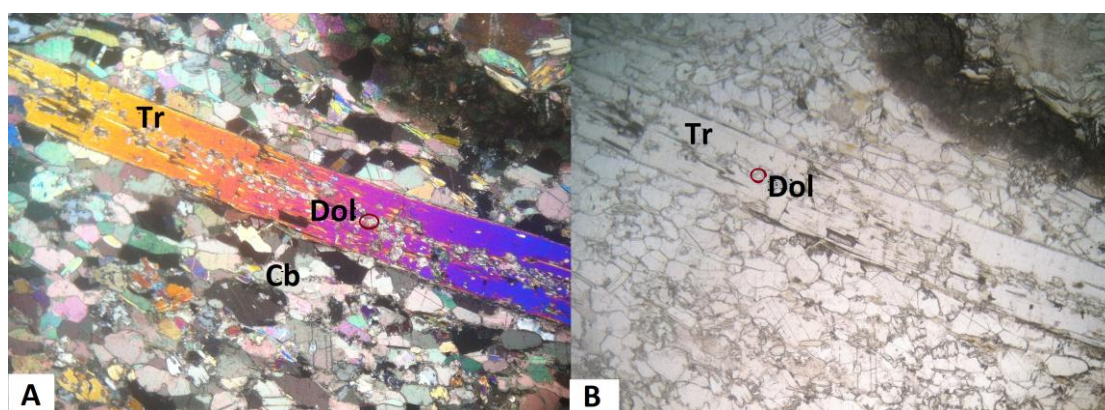


Fig. 7. Dolomit som växer inuti elongerad porfyroblast av tremolit. Bild A visas i XPL och B i PPL.

Mineralogi	Karbonatmineral	Amfibol	Kvarts	Biotit	Epidot	Accesoriskt
Modal procent	~77%	~10%	~5%	~5%	~3%	<1%

Prov: UÖMR-I2

Provet utgörs av två lager med olika sammansättning, där ena lagret består huvudsakligen av karbonat mineral. Det andra lagret är mera finkornig samt omvandlat och har ett högre innehåll av silikat mineral. Detta lager har även stråk av biotit. Opaka mineral och amfiboler i varierande grad förekommer i båda lagren.

Bergart: Skarn (silikatrikt)

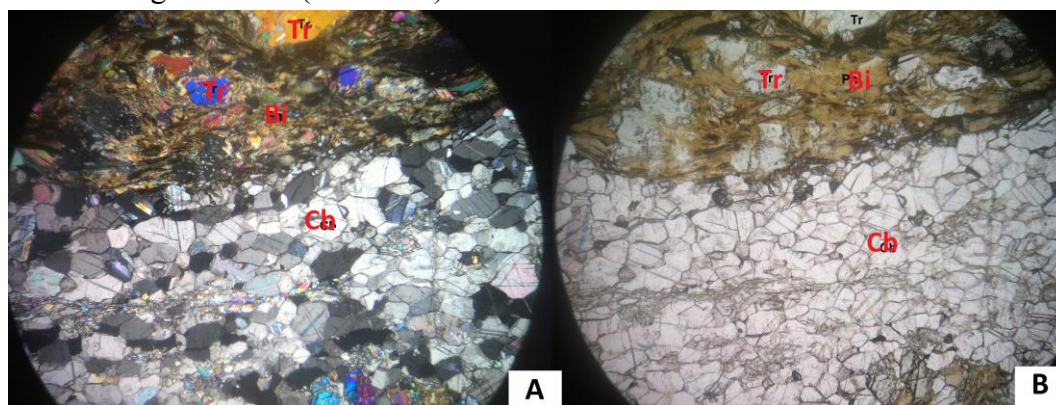


Fig 8. Karbonatrikt lager samt angränsning till silikatrikt lager där stråk av biotit innehållande amfiboler är synliga.

Mineralogi	Karbonatmineral	Kvarts	Amfibol	Biotit	Klorit	Accesoriskt
Modala procent	~43%	~15%	~20%	~15%	~7%	<1%

Prov: UÖMR-K3

Mikrokristallin matrix innehållande karbonat mineral och kvart. Matrixen innehåller större kristaller av omvandlade karbonater och amfiboler. Stråk av fältspat som seriticerats.

Bergart: Skarn (silikatrikt)

Mineralogi	Karbonatmineral	Kvarts	Amfibol	Fältspat	Accesoriskt
Modala procent	~35%	~30%	~20%	~15%	<1%

Prov: UÖMR-L

I provet finns två stycken visuellt olika lager med skarpa övergångar mellan vardera lager. Det ena lagret består av subhedrala karbonat mineral, med få porfyroblaster av amfibol. Amfibolerna förekommer i en orientation i tunna band. Det andra lagret innehåller ovan nämnda mineral, men är mera altererade samt finkornigare. Detta lager är även rikare på amfiboler.

Bergart: Skarn (Silikatrikt)

Mineralogi	Karbonatmineral	Amfibol	Kvarts	Accesoriskt
Modala procent	~50%	~20%	~30%	<1%

3.4 KEMISKSAMMANSÄTTNING & TEMPERATUR

Med EMPA fastställdes för prov UÖMR-A och UÖMR-I2 att samtliga amfiboler var tremolit, samt att inget utav proven innehöll diopsid. Detta gör tremolit till indexmineralet, vilket indikerar låg till medium grad av metamorfos (Winter, et.al. 2014). Detta enligt Eskolas modell av metamorfazoner för karbonater: talk-tremolit-diopsid-forstrit, i stigande ordning av temperatur.

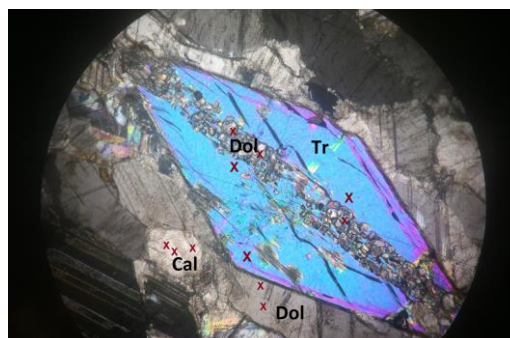


Fig. 9. Petrografisk bild för prov UÖMR-A, med identifierande mineral från mikrosondanalysen. Kryssen markerar analyspunkter.

Gällande karbonatmineralen så undersöktes prov UÖMR-A med resultatet att både dolomit och kalcit närvarar i ett jämviktsystem.

Bilden nedan visar en tremolitkristall med inklusioner av dolomit. Både kalcit och dolomit förekommer i den omkringliggande matrixen.

XRF-analys för samma prov resulterade i de mest förekommande grundämnena: Ca (31 %), Mg (28 %) och Si (3 %). Resterande ämnen så som aluminium och mangan förekom, men i mycket små mängder (<1%).

Temperaturen som räknades ut resulterade i 551°C, med en felmarginal på ±30, se beräkningar i metod delen. Denna form av beräkning är begränsad, då det är svårt att få exakta resultat för en hög grad av metamorfos (Philpotts et.al 2014). Detta har dock mindre betydelse för det analyserade provet, då den petrografiska analysen samt EMPA uppvisade att indexmineralet var tremolit.

Prov	Del Mg i kalcit	Temperatur (°C)
UÖMR-A	0.034	551 ±30

4. DISKUSSION

Resultaten från min undersökning, $551^{\circ}\text{C} \pm 30$ för ett tryck på 5.3kb, placerar graden av metamorfos i amfibolit facies. Dessa resultat går att jämföra med en liknande studie som utfördes av Yngwe (2015) i ett närbeläget område. I Yngwes undersökning uppskattades tryck och temperatur för metagråvackor på nordöstra Utö.

Undersökningen utgick från modellering av aktiveringsenergi i THERMOCALC 3.37. Vilken resulterade i en temperatur på: $580^{\circ}\text{C} \pm 14$. Då två fältexcursioner utförts på två närbelägna områden, med olika metoder, och gett liknande resultat styrker det trovärdigheten av resultatberäkningarna i denna rapport.

Det är även intressant att undersöka om progrerande fluider var CO_2 bärande. Därför har en modellering skapats för uppskattning av temperatur i förhållande till fluidsammansättningen gjorts i THERMOCALC för prov UÖMR-A. Detta bestämdes genom möjliga reaktioner baserat på aktiveringsenergi i samexisterande mineral. Två reaktioner var möjliga, men den petrografiska analysen visade på att reaktion: $5\text{Dol} + 8\text{Qtz} + \text{H}_2\text{O} = \text{Tr} + 3\text{Ca} + 7\text{CO}_2$ var den troliga. Detta har illustrerats i grafen nedan, som visar temperatur mot $X(\text{CO}_2)$. Grafen visar reaktionen för dekarbonisering, som inträffar antingen genom en ökning av temperatur eller sänkning av $X(\text{CO}_2)$, vilket kan bevisas med Le Chatelier's princip.

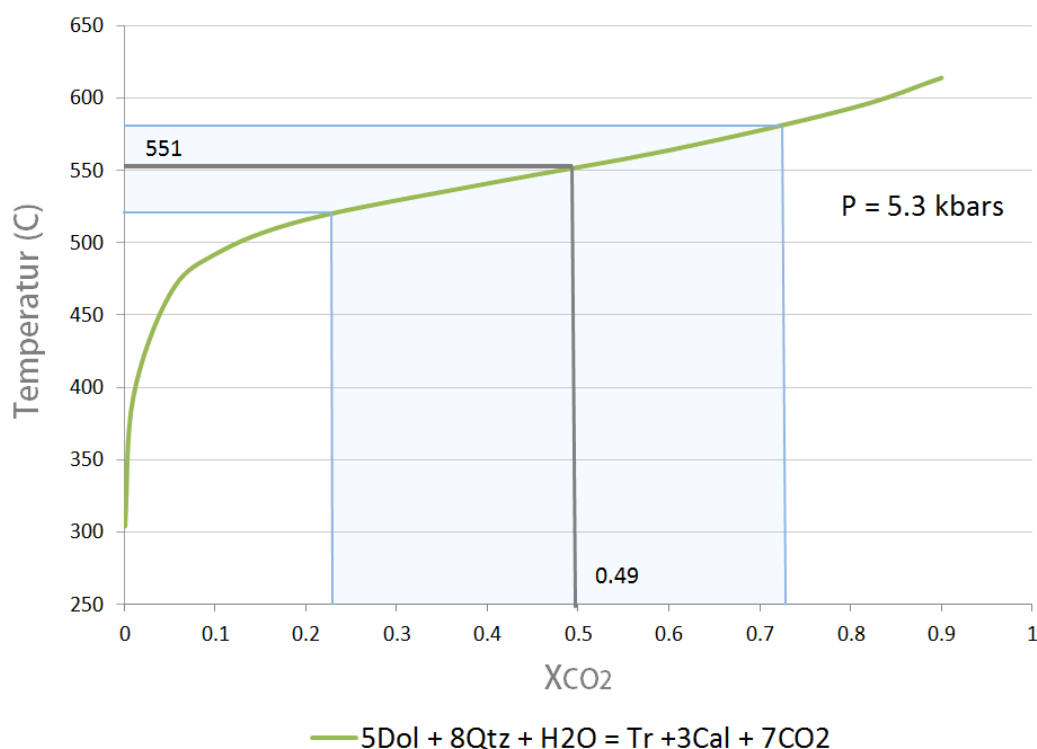


Fig. 10. T-X(CO₂) – diagram för reaktion dol + qt = tr + Cal. Temperatur och fluidsammansättning markerad för UÖMR-A. Blåa fältet visar felmarginaler för temperaturen.

Genom att använda temperaturvärdet framräknat genom geotermometrin (551°C), kan det korresponderade värdet för $X(\text{CO}_2)$ tas fram. Samtidigt är mängden $X(\text{H}_2\text{O})$ i fluiden lika med: $1-X(\text{CO}_2)$. Framräknat värde för $X(\text{CO}_2)$ resulterar i: 0.49 vilket innebär att fluidsammansättningen för prov UÖMR-A är $\sim 49\%$. Detta är ett relativt högt värde för CO_2 i jämförelse med tidigare studier på Utö (Lundin, 2013). Dock är den registrerade temperaturen också hög för området (Talbot, 2008) men inte geologiskt omöjlig. En förklaring kan vara att karbonaternas max metamorfos har analyserats. Om felmarginaler för temperaturen ($\pm 30^{\circ}$) tas med i beräkningen, så hamnar det motsvarande CO_2 -värdet mellan 0.23 – 0.72. Standardavvikelsen för CO_2 blir väldigt hög, och därför är det svårt att avgöra den egentliga mängden genom denna metod.

Reaktionen som $T-X(\text{CO}_2)$ – diagrammet illustrerar kan plottas för de stabila faserna på ett CMS-diagram. Diagrammet visar kemiska sammansättningar i systemet $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$, som är projicerat från CO_2 och H_2O . Mineralsammansättningen kan användas från EMPA till att plotta samexisterande mineral. I diagrammet så har även den totala kemiska sammansättningen för prov UÖMR-A plottats. Detta hamnar inom det lila fältet, där felmarginaler är medtagna. Provet hamnar dock utanför stabilitetsfälten. Dess position tyder på ett högt innehåll av magnesium. Resultatet kan vara en del av fel mätning genom XRF. Eftersom bergartsprovet innehöll synliga porfyroblaster av amfibol, är det möjligt att många utav mätningarna prickade in just dessa mineral och påverkade det totala resultatet. En annan teori är att provet även innehöll talk i små mängder som inte var observerade i mikroskopet.

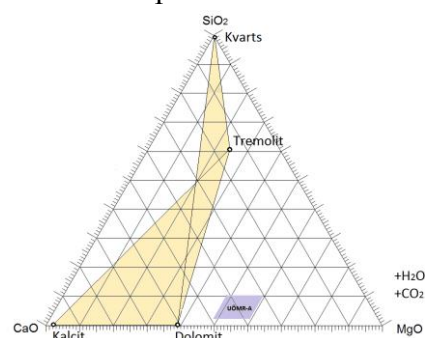


Fig.11. CMS – stabilitetsdiagram

Resultaten från undersökningen i helhet tyder på att bildningsmiljön har präglats av lågt tryck och hög temperatur vid metamorfos. Denna typ av metamorfos kan äga rum i samband med kontakt av närliggande intrusioner eller plutoner som höjer temperaturen i berggrunden, utan att bergarten smälts. Skarn formas i samband med metasomatiska interaktioner mellan karbonat- och kiselrika bergarter och fluider, där fluiderna kan vara av magmatiskt ursprung. Det är därför troligt att metamorfosen har ägt rum i samband med plutonisk aktivitet, vilket resulterar i kontaktmetamorfos samt en viss grad av regionalmetamorfos pga trycket. Det är allmänt registrerat på Utö att senare händelse av smältor i form av pegmatiter har intruderat nordvästliga delar av ön. På området fanns även en stor grad av vulkaniter. Vid en del lokaler där vulkaniter var i kontakt med närliggande karbonater kunde band av skarn observeras. En teori är att vulkaniterna som hade ett högt kiselinnehåll, har haft ett utbyte med karbonaterna med lågt kiselinnehåll.

5. FELKÄLLOR

Förarbetet innan analys av prover baserades på fältarbete, där jag självständigt har karterat ett område samt gjort mina egna tolkningar. Eftersom kartering utfördes på ett område som till stor del bestod av tät vegetation, var det svårt att skapa sig en noggrann överblickande bild av området. Istället gjordes punktobservationer där delar av hållar var exponerade. För områden som inte kunde observeras, gjordes därför en uppskattning av bergartstyp.

En annan felkälla vid kartering som kan ha påverkat resultatet är att det fanns mycket få hållar som utgjordes av endast en bergart. Oftast fanns bandade sekvenser av olika bergarter, där banden kunde variera inom 15m, vilket innebär en liten yta. Det är därför mycket möjligt att punkt observation som har gjorts för en del av en håll där den har varit exponerad, i själva verket gjordes på ett av banden och inte majoriteten av bergarten som hållen egentligen består av.

Modellering i THERMOCALC ger alla möjliga reaktioner för den givande koncentrationen. Detta förutsätter att alla reaktioner i bergprovet är i jämvikt, vilket inte behöver vara sant. Det är därför möjligt att göra feltolkningar om inte reaktionerna kontrolleras noggrant i mikroskop eller med EMPA för att fastställa stabila faser.

Formeln för geotermometrin hade en standardavvikelse på $\pm 30^{\circ}$. En så pass hög avvikelse resulterar tyvärr i en ännu högre osäkerhet för $X(\text{CO}_2)$ för ovan nämnd metod.

För att kunna styrka resultaten i denna rapport, så skulle fler analyser med t.ex. mikrosond och XRF utföras på flera delar, för att ge en mera kvantitativ data.

6. SLUTSATS

Det karterade området utgjordes av huvudsakligen av metakarbonater samt metavulkaniter. Fastställning av temperatur genom geotermometriska beräkningar för kalcit-dolomit jämvikter, resulterade i $551^{\circ}\text{C} \pm 30$ för ett tryck på 5.3kbar. Detta placerar graden av metamorfos i amfibolit facies. En modellering av T-X(CO_2) förhållandet, där det korresponderade CO_2 värdet i fluidsammansättningen för den angivna temperaturen resulterade i 0.49 $X(\text{CO}_2)$. Detta innebär en fluidsammansättning bestående av $\sim 49\%$ CO_2 vid metamorfos.

7. TACK TILL

Jag vill framförallt tacka mina handledare Alasdair Skelton och Joakim Mansfeld, som har väglett mig genom projektets gång. Jag vill även tacka Richard Gyllencreutz för introduktion till QGIS, samt Dan Zetterberg och Jaroslaw Majka för assistanse vid preparering och analys av prover.

8. REFERENSER

Artiklar:

Anovitz, L. M. Essene, E.J. (1986). *Phase Equilibria in the system CaCO₃-MgCO₃-FeCO₃*. Dept. of Geological Sciences, University of Michigan. Journal of petrology, Vol 28, p389-414.

Burt, D.M. (1977). *Mineralogy and petrology of skarn deposits*. Tempe USA: Arizona State University, dept. Of Geology.

Kleine, I.B. (2015). *How do metamorphic fluids move through rocks? An investigation of timescales, infiltration mechanisms and mineralogical controls*. Stockholm University.

Lundin, L. (2013). *Interpretation of the P-T-XCO₂ environment during metamorphism of carbonates, central Utö, Stockholm archipelago*. Bachelor thesis, Department of geological Sciences, Stockholm University.

Lundström, I. Allen, R.L. Persson, P.O & Ripa, M. (1998). *Stratigraphies and depositional ages of Svecofennian, Palaeoproterozoic metavulcanic rocks in E. Sveland and Berslagen, south central Sweden*. GFF, 20:3, p315-320.

Mansfeld, J. (2012). *Geology of Utö – excursion guide*. Dianium Science

Reed, S.J.B. (2005). *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. 2nd ed. New York USA: Cambridge University Press, P1-2.

Talbot, C.J. (2008). *Palaeoproterozoic crustal building in NE Utö, southern Svecofennides, Sweden*. GFF, 130:2, P49-70

Yngwe, F. (2015). *Pressure and Temperature determination of metamorphism on the eastern shore of northern utö, Stockholm archipelago*. Bachelor thesis, department of geological Sciences, Stockholm University.

Böcker:

Philpotts, A. Ague, J. (2014). *Principles of igneous and metamorphic petrology*. 2nd ed. United Kingdom: Cambridge University Press, p414-556.

Winter, J. D. (2014). *Principles of igneous and metamorphic petrology*. 2nd ed. New Jersey USA: Pearson Education Limited, p663-711.

Webbsidor:

THERMOCALC

<http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/> (Maj. 26, 2015, 16:45)

Figurer:

Fig.1. Google Maps, 4 juni 2015 -

(<https://www.google.se/maps/@58.9639699,18.3510481,10385m/data=!3m1!1e3> Lantmäteriets topografiska karta, 4 juni 2015 - (<http://kso.lantmateriet.se/?e=464350&n=6974879&z=1>

Bilaga 2. Data genererad från EMPA (wt%)

SAMPLE	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	F	MnO	TiO2	K2O	CaO
A-1-amph1	0.1058	57.88	0.6862	22.76	0.1752	0.0966	0.0373	0.0085	13.64
A-1-amph2	0.0834	58.37	0.5195	22.95	0.0967	0.1378	0	0.0041	13.74
A-1-amph3	0.1638	57.45	1.3515	22.42	0.1808	0.0218	0.0044	0.0056	13.4
A-1-cal1	0	0	0	19.683	0	0.279	0	0	30.534
A-1-cal2	0	0	0	19.115	0	0.421	0	0	30.493
A-1-cal3	0	0	0	19.369	0	0.337	0	0	30.446
A-1-cal4	0	0	0	1.415	0	0.13	0	0	55.056
A-1-cal5	0	0	0	1.222	0	0.289	0	0	55.099
A-1-cal6	0	0	0	1.605	0	0.151	0	0	54.215
A-1-dol4	0	0	0	20.438	0	0.117	0	0	30.642
A-1-dol5	0	0	0	19.201	0	0.339	0	0	30.173
A-1-cal7	0	0	0	0.445	0	0.262	0	0	56.252
A-1-cal8	0	0	0	0.908	0	0.272	0	0	55.314
A-1-cal9	0	0	0	1.369	0	0.214	0	0	54.048
	Cl	NiO	FeO	Cr2O3	V2O3	SrO	BaO	CO2	Total
A-1-amph1	0.0039	0.0774	2.03	0	0.0366	0	0	0	97.5376
A-1-amph2	0.0084	0	1.9	0	0.0471	0	0	0	97.857
A-1-amph3	0.0141	0.0061	2.04	0.0432	0.0105	0	0	0	97.1119
A-1-cal1	0	0	1.739	0	0	0	0	46.691	98.9261
A-1-cal2	0	0	1.819	0	0	0	0	46.175	98.023
A-1-cal3	0	0	1.505	0	0	0	0.034	46.18	97.8711
A-1-cal4	0	0	0.287	0	0	0	0	45.008	101.8959
A-1-cal5	0	0	0.333	0	0	0.244	0.043	45.073	102.3029
A-1-cal6	0	0	0.494	0	0	0	0	44.695	101.16
A-1-dol4	0	0	1.296	0	0	0.572	0.049	47.485	100.5989
A-1-dol5	0	0	2.172	0	0	0	0	46.183	98.0681
A-1-cal7	0	0	0.257	0	0	0.108	0	44.996	102.3199
A-1-cal8	0	0	0.237	0	0	0	0	44.715	101.4459
A-1-cal9	0	0	0.421	0	0	0.199	0.025	44.393	100.669

Bilaga 3. XRF-data (wt%)

Reading	Mg	Mg +/-	Si	Si +/-	Ca	Ca +/-
#1						
#2	21.41	1.3	1.7895	0.048	32.09	0.54
#3	26.07	1.14	8.63	0.15	28.75	0.45
#4	22.14	1.28	3.26	0.07	31.57	0.53
#5	26.31	1.16	3.41	0.07	31.13	0.5
#6	26.56	1.16	5.63	0.11	29.12	0.47
#7	22.52	1.19	6.61	0.12	33.45	0.52
#8	30.51	1.11	1.1399	0.0378	30.48	0.49
#9	32.78	1.04	3.05	0.06	30.37	0.47
#10	31.3	1.06	3.2	0.07	29.99	0.47
#11	30.59	1.05	3.76	0.07	30.55	0.47
#12	27.19	1.13	3.12	0.07	31.94	0.5
#13	29.55	1.08	1.8674	0.0471	31.12	0.48
#14	29.68	1.08	2.07	0.05	30.54	0.48
#15	30.41	1.1	1.9017	0.0485	31.18	0.5
#16	30.11	1.07	1.5571	0.0427	29.97	0.47
#17	29.72	1.09	1.5375	0.0424	30.19	0.47
#18	29.9	1.07	1.2984	0.039	30.81	0.48
#19	29.49	1.06	3.51	0.07	30.13	0.46
#20	31.96	1.03	1.6732	0.044	30.67	0.47
#21	32.55	1.02	1.6871	0.0442	30.74	0.47
#22	27.59	1.12	1.9614	0.0485	32.81	0.51
#23	26.75	1.11	2.54	0.06	30.94	0.48
#24	25.56	1.22	2.74	0.06	29.04	0.48
#25	28.46	1.09	2.0455	0.0492	30.35	0.47
#26	33.28	1	1.6845	0.0439	30.35	0.46
Average	28.4956		2.866928		30.7312	
Standard deviation	3.254144		1.770271		1.080271	

Bilaga 4. Beräkningar för CMS-diagram

	Average wt%	New wt%	StanDev	Average - stanDev	Average + stanDev
Mg	28.4956	46	3.254143615	42.63712579	49.14541302
Si	2.866928	5	1.770271146	2.846826414	6.387368705
Ca	30.7312	49	1.080271262	48.41136177	50.5719043
Oxide wt%	-standev	+standev	New wt% -stdv	New wt% + stdv	
MgO	70.7034239	81.4958538	49	49	
SiO2	6.090292733	13.6646706	4	8	
CaO	67.73701118	70.7600349	47	43	
SUM	144.5307278	165.920559	100	100	

Bilaga 5. AX genererad utfil.

Calculations for P = 6.0 kbar and T = 550degC

amph MRA1/amph

Mixing model of Dale et al. (2005)

Ferric from: Av from max and min constraints. Holland & Blundy 1993

oxide	wt %	cations	sd	activity	sd	%
SiO2	58.37	7.947	0.054	tr	0.77	0.097 13
TiO2	0.00	0.000	0.000	fact	-	- -
Al2O3	0.52	0.083	0.009	ts	-	- -
Cr2O3	0.00	0.000	0.000	parg	-	- -
Fe2O3	1.48	0.151	0.038	gl	-	- -
FeO	0.57	0.065	0.017			
MnO	0.14	0.016	0.006			
MgO	22.95	4.657	0.083			
CaO	13.74	2.004	0.041			
Na2O	0.08	0.022	0.014			
K2O	0.00	0.001	0.009			

totals 97.85 14.947

carb MRA1/carb

disordered calcite structure, 1-site mixing. WFeMg=4, WCaFe=18, WCaMg=22 (kJ)

Ferric from: all ferrous

oxide	wt %	cations	sd	activity	sd	%
SiO2	0.00	0.000	0.000	mag	0.653	0.0163 2
TiO2	0.00	0.000	0.000	sid	-	- -
Al2O3	0.00	0.000	0.000	cc	0.96	0.0241 2
Cr2O3	0.00	0.000	0.000	rho	-	- -
Fe2O3	0.00	0.000	0.000	dol	-	- -
FeO	0.42	0.012	0.002	ank	-	- -
MnO	0.21	0.006	0.001			
MgO	1.37	0.067	0.004			
CaO	54.05	1.915	0.004			
Na2O	0.00	0.000	0.000			
K2O	0.00	0.000	0.000			

totals 56.05 2.000

carb MRA1inclus/carb

dolomite structure, 2 site mixing. WFeMg=3 (kJ)

Ferric from: all ferrous

oxide	wt %	cations	sd	activity	sd	%
SiO2	0.00	0.000	0.000	mag	-	-
TiO2	0.00	0.000	0.000	sid	-	-
Al2O3	0.00	0.000	0.000	cc	-	-
Cr2O3	0.00	0.000	0.000	rho	-	-
Fe2O3	0.00	0.000	0.000	dol	0.96	0.0482
FeO	1.30	0.034	0.002	ank	0.052	0.0092
MnO	0.12	0.003	0.001			5
MgO	20.44	0.945	0.012			18
CaO	30.64	1.018	0.012			
Na2O	0.00	0.000	0.000			
K2O	0.00	0.000	0.000			

totals 52.49 2.000

carb MRA1matrix/carb

dolomite structure, 2 site mixing. WFeMg=3 (kJ)

Ferric from: all ferrous

oxide	wt %	cations	sd	activity	sd	%
SiO2	0.00	0.000	0.000	mag	-	-
TiO2	0.00	0.000	0.000	sid	-	-
Al2O3	0.00	0.000	0.000	cc	-	-
Cr2O3	0.00	0.000	0.000	rho	-	-
Fe2O3	0.00	0.000	0.000	dol	0.95	0.0473
FeO	1.74	0.046	0.002	ank	0.070	0.0113
MnO	0.28	0.007	0.001			5
MgO	19.68	0.920	0.012			16
CaO	30.53	1.027	0.012			
Na2O	0.00	0.000	0.000			
K2O	0.00	0.000	0.000			

totals 52.23 2.000

Bilaga 6. Utfil från THERMOCALC.

calcs use:

temperature-x(CO2) calculations

	tr	mag	cc	dol	ank	dol	ank	q	
a	0.770	0.653	0.960	0.960	0.0520	0.950	0.0700	1.00	
sd(ln a)	0.12597	0.05000	0.05000	0.05021	0.26961	0.05000	0.25947		0

excluded assemblages | dol | ank | mag cc |

no of reactions = 2, no of intersections = 0

- 1) 3mag + 2dol + 8q + H2O = tr + 7CO2
- 2) 5dol + 8q + H2O = tr + 3cc + 7CO2

Thermodynamics of reactions (0 = a + bT + cP + RT ln K)

linearised at T = 600, P = 5.3, x(CO2) = 0.451

(a, b and c includes fluid fugacities; ln K includes x(CO2), x(H2O))

	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	335.38	1.08	-0.48653	15.846	-3.863	0.220
2	349.75	1.91	-0.48799	15.992	-5.110	0.318

Temperatures in the range 300 <-> 900;C; for P = 5.3 kbar

uncertainties at or near x(CO2) = 0.4505

	x(CO2)	0.001	0.01	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	sdT
1	-	384	454	482	506	531	554	583	604	604		3
2	304	393	464	492	516	541	564	593	614	614		5

=====