Stockholm University

Bachelor Thesis

Degree Project in Geology 15 hp

Temperaturförhållande och fluidsammansättning vid metamorfos registrerat i karbonatbergarter på nordöstra Utö

Jonas Nilsson

Stockholm 2013

Department of Geological Sciences
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm

Innehåll

Sammanfattning 2
Introduktion 3
Syfte 3
Geologisk bakgrund 3
Metod 4
Kartering 4
Provtagning och preparering 4
Petrografisk analys 5
Röntgenfluorescens (XRF)-analys 5
Elektronmikrosond (EMPA)-analys 6
Fluider i kalciumkarbonater 6
Flödesschema av metoder och datahantering 7
Resultat 8
Kartering 8
Petrografi 10
Elektronmikrosond (EMPA)-analys 14
Geotermometer 14
Felkällor 15
Diskussion 17
Slutsats 18
Tack 18
Referenser 19
Bilagor 20

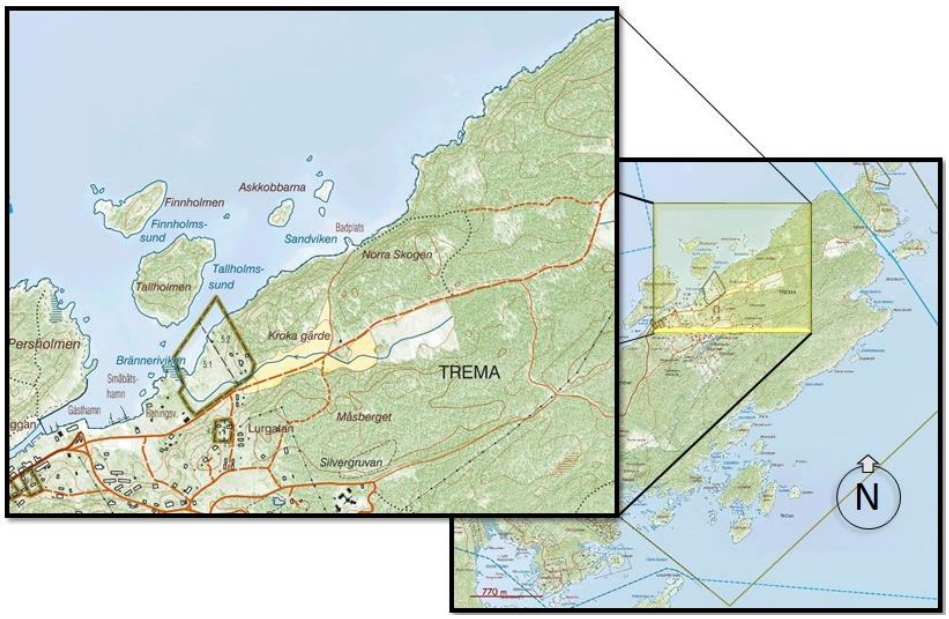
Sammanfattning

Kartering av bergarter genomfördes på nordöstra Utö, Stockholms skärgård, i syfte att kategorisera bergarter och dess respektive utbredning. Samtidigt genomfördes provtagning för vidare analyser i syfte att bestämma tryck- och temperaturföhållanden samt fluidsammansättning under metamorfos/metasomatism vid bergarternas bildande. Denna undersökning är en del i projektet 'Metamorphic Map of Sweden' som finansieras av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och leds av Alasdair Skelton, professor vid Institutionen för Geologiska Vetenskaper (IGV), Stockholms Universitet.

Utö är en del av Bergslagen lokaliserat i den sydliga delen av den Svekofenniska orogenesen (Andersson, et al. 2006). Bergartsbildningen var initialt en ansamling sediment i en ackretion över en subduktionszon som genom vulkanism, magmatiska intrusioner och höga temperaturer litifierades. Intrusionerna på Utö har daterats till 1904 ± 4 Ma (Talbot, 2008; Lundström, et al. 1998). Området kring Utö har genomgått minst två huvudsakliga tektoniska händelser som veckat berggrunden samt altererat mineralogin genom metamorfos (Talbot, 2008). Bergarter på nordöstra Utö är således metasedimentära, med protoliter av gråvacka, vulkaniskt pyroklastiskt sediment, kalk-silikater (skarn) samt pegmatiter och granitiska intrusioner (Talbot, 2008; Lundström, et al. 1998; Allen, et al. 1996).

Vid kartering och med hjälp av petrografisk analys i kombination med Röntgenfluorescens har de metasedimentära bergarterna kategoriserats till att vara metagråvacka, metavulkanit samt två teoretiskt möjliga ändsammansättningar av skarn; silikatrik och karbonatrik.

Med Elektronmikrosond har sammansättning av grundämnen i enskilda mineral erhållits. Vidare beräkningar i databehandlingsprogrammen *AX 2* och *Thermocalc 3.36* har erhållit aktivitetsenergi hos mineral respektive reaktioner mellan mineral i ett jämnviktsförhållande. Reaktionen som innehöll kalcit, talk, kvarts och tremolit och som hade producerat CO_2 till systemet användes för att erhålla en temperatur vid metamorfos på ca 440 ± 30 °C, enligt geotermometern från Anovitz & Essene (1986).



Karta över nordöstra Utö med karterat område utlyft ur bilden. Källa: Lantmäteriet

Introduktion

Som examensarbete på kandidatnivå i geologi genomfördes kartering av nordöstra Utö i Stockholms skärgård i syfte att kartlägga bergarter och förutsättningarna för hur de bildades. Detta skedde under handledning av Prof. Alasdair Skelton och Dr. Joakim Mansfeld vid Stockholms Universitet, Institutionen för Geologiska Vetenskaper (IGV) och är en del i projektet *Metamorphic Map of Sweden* som finansieras av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och leds av Skelton.

Syfte

Syftet med detta projekt är att kategorisera, beskriva och kartera bergarter inom område 1 på nordöstra Utö samt genomföra provtagningar och en serie analyser. Detta görs för att bestämma tryck- och temperatur-förhållanden vid metasomatism/metamorfos samt fluidsammansättningen som kan ha påverkat mineralogin vi ser idag.

Geologisk bakgrund

Under paleoproterozoikum kolliderade en arkeisk berggrund och en vulkanisk öbåge och formade början på den Svekofenniska orogenesen (Zhao, et al. 2002) då en ackretion formades över en subduktionszon. Svekofenniska orogenesen består av minst fyra mikrokontinenter samt öbågar som genom subduktion blev sammanslagna med den arkeiska kareliska plattan (Lahtinen, et al. 2009; Andersson, et al. 2006). Utös berggrund är en del av Bergslagen i den sydliga Svekofenniska orogenesen (Andersson, et al. 2006). Sedimenten som ansamlades under ackretionen var i huvudsak lager av lera och sand samt turbiditer som deponerades i branta sluttningar, gravar och sänkor. Under höga temperaturer, genom magmatiska intrusioner, litifierades ackretionen med öbågarna till en shelf. Den första intrusionen samt samtida pyroklstiska flöden har daterats till ca 1904 ± 4 Ma på Utö (Talbot, 2008; Lundström, et al. 1998).

Shelfen var instabil genom sin formation, troligtvis på grund av magmatiska intrusioner, jordbävningar, och stress genom en sned subduktion som varade mellan 1.85 – 1.75 Ga, kanske längre (Andersson, et al. 2006). Bevis för detta hittas i sedimentlager, frakturer med breccia, skjuvat material samt turbiditer (Talbot, 2008).

Sedimenten som ansamlades på shelfen var av olika sammansättning. En av de dominerande bergarterna som hittats på Utö är metagråvacka vars protolit i huvudsak består av sand och lera i lagringar eller som turbiditer. Andra typer av metasediment som hittas på Utö är vulkaniskt pyroklastiskt material, karbonatrika lager och flinta med höga halter oxidmineral (Allen, et al. 1996). Utöver metasediment hittas också magmatiska intrusioner (Talbot, 2008).

De deponerade sedimenten varierar i frekvens och tjocklek. Det har varit perioder med kraftig deponering av mer karbonatrika sediment till skillnad från de mer sandiga och leriga lagren. Tjocklek på de karbonatrika lagren är ojämna men tenderar att bli tjockare längre upp i stratigrafin (Talbot, 2008).

Olika strukturer i relation till veckning och foliering tyder på att lagringen av sedimenten har varit syntektonisk. Två huvudsakliga tektoniska händelser har skapat Utö samtidigt som sediment deponerats. Första tektoniska händelsen veckade hela shelfen och förde några av gråvackorna uppåt. Detta kan observeras på foliationen i dessa bergarter. Andra tektoniska händelsen veckade hela

shelfen ännu en gång och ny foliation bildades. Mycket av foliationstrukturena är synliga i de mer kompetenta lagren, dock ej i de mjukare karbonatrika lagren. Veckningen eller foliationen är inte synlig i de magmatiska intrusionerna då dessa intruderade längs med veckningens plan (Talbot, 2008).

Metamorfos följde som ett resultat av de tektoniska händelserna. Zonering av kordierit, andalusit och granat i de leriga lagren av metagråvackorna är ett resultat av två tillväxtfaser under metamorfos (Andersson, et al. 2006; Talbot, 2008). Vissa amfiboler uppvisar en delvis parrallell riktning i relation till varandra och foliation av övriga mineral. Detta tyder på syntektonisk tillväxt av metamorfa mineral. Övriga bevis på syntektonisk metamorfos är flamstruktur i leriga lager som troligtvis bildats genom dehydrering av leriga mineral (Talbot, 2008).

Metod

Kartering

Karteringen genomfördes 3-17 april 2013. Resa gjordes med kollektivtrafik och transport mellan fastlandet (Årsta Brygga) och Utö Gruvbrygga gjordes med båt i linjetrafik. Gällande logi, bodde gruppen av studenter i stugor erhållna av Utö Värdshus. I fält användes förutom fältdagbok, topografiska kartor från lantmäteriet samt kompass och klinometer.

I fält ritades bergshällar in för hand på den topografiska kartan efter att ha undersökts visuellt med lupp. Efter tolkning av hela området, bestämning av avgränsningar, kategorisering och korrelering mellan bergarterna interpolarades bergarternas utbredning och ritades in för hand. Strykning och stupning av lagring mättes med kompass och klinometer och angavs som grader enligt azimuth-systemet. Dessa värden ritades in med bildbehandlingprogram.

Provtagning och preparering

Provtagning i fält genomfördes med geologhammare av finsk modell samt kil om nödvändigt. Detta skedde med största möjliga hänsyn till djurliv och vegetation. Proverna tvättades och sågades i syfte att göra tunnslip och krossades samt pulveriserades i syfte att göra XRF-analys. Sågning och krossning genomfördes på IGV under ledning av Dan Zetterberg.

Proverna sågades till lämplig storlek, rektangulära klossar med ca 2-3 cm långa sidor, och slipades med kiselkarbid-pulver på en storlek av 180 µm för att göra ytorna släta samt avlägsna eventuella föroreningar i form av metaller och oxider. Pulverisering inför XRF-analys gjordes med en stenmal. Proverna var torra men hade inte genomgått förbränning av additivt vatten eller kol genom ’Loss On Ignition’ (LOI).

Petrografisk analys

Tunnslip av proverna gjordes hos *Vancouver Petrographics LTD,* Kanada, och undersöktes visuellt i mikroskop på IGV, både med polariserat och korspolariserat ljus. Mikroskop som användes var *Leica DM LSP.* Detta gjordes i syfte att bestämma mineralogi, bekräfta fältobservationer gällande bergart samt att bestämma delar av proverna för vidare analyser. Särskilda mineral som uppvisade zonering och/eller inklusioner med närliggande mineral var särskilt intressanta för mikrsond-analys.

Prov 5B -2, -3, -4, -5 preparerades med 1 mol concentrerad saltsyra (HCl) för att se vilka områden som uppvisade frätande ytor. Kalcit fräter normalt mer intensivt än dolomit under liknande förutsättninger gällande vittring, etc (Dickson, 1966). Mönstret av hur intensivt saltsyran frätte på provernas tillsågade klossar jämfördes sedan med tunnsliparna från exakt samma område i stenprovet. Detta gjordes för att bekräfta förekomsten av kalcit samt avfärda förekomsten av dolomit.

Röntgenfluorescens (XRF)-analys

Förkortningen XRF används på grund av den engelska benämningen *X-Ray Fluorescense*. Glasdiskar för XRF-analys tillverkades under ledning av Runa Jacobsson på IGV. Denna enhet benämns senare i rapporten som ’XRF(IGV)’ och var av märket *XRF Scientific, WDF 4000 Phoenix*. Denna metod misslyckades då proverna innehöll för höga koncentrationer av kalciumkarbonater. Att prepareringen misslyckades tros bero på att fluxen inte fungerade till kalciumkarbonater. Detta resulterade i att proverna ’kokade över’ vid tillverkningen av glasskivor. Endast ett prov, 5B – 1, lyckades och detta användes till att jämföra med resultaten från en annan XRF-enhet.

Den andra metoden som användes för XRF-analys var en portabel enhet, *Delta X Professional,* som användes direkt på opreparerade stenprover. Denna enhet benämns senare i rapporten som ’XRF(port)’. Med den tekniken erhölls lyckade resultat av alla prover (prov: 5B – 1, - 2, - 3, - 4, - 5 samt 8E-a och 8E-b). Resultatet var viktprocenten av alla ’tunga’ grundämnen, magnesuim (Mg) och tyngre. Varje stenprov beskjöts tio gånger på slumpmässigt utvalda punkter över områden på några få kvadratcentimeter och ett genomsnitt räknades fram. Data överfördes från den portabla enheten till dator för vidare databehandling.

Försök gjordes att analysera krossade stenprover som pulver i förslutna plastpåsar i syfte att få proverna homogena. XRF(port) antogs bortse från plastpåsen då den inte analyserar lättare ämnen och dessutom penetrerar proven 1 - 2 millimeter. Tyvärr var resultaten intuitivt orimliga och denna metod förkastades.

XRF-analysen gjordes för att i detalj bestämma proportionerna av olika grundämnen i deras naturliga oxiderade form som förväntas vara normala proportioner i olika mineral (Winter, 2010). Från XRF-resultaten kunde korrelationer mellan ämnessamansättning, mineralsammansättning och bergartskategorisering bekräftas eller förkastas. Resultat erhölls ej i oxidform och detaljerad data om mängden syre i proverna framgick inte då alla lättare ämnen presenterades som ’light elements’ (LE). All annan data som var i oxidform konverterades istället till grundämnen om jämförelse behövdes.

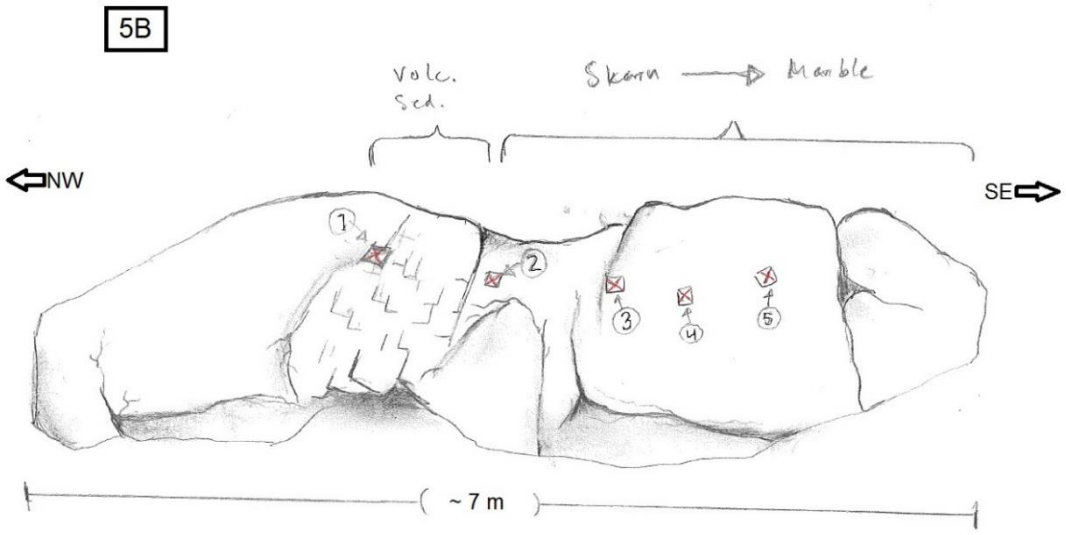
Elektronmikrosond (EMPA)-analys

Efter petrografisk analys genomfördes elektronmikrosond-analys (EMPA) för att bestämma ämnessammansättning i olika delar av enskilda mineral, i detta fall amfibol (tremolit), talk, kalcit och dolomit från provtagningspunkt 5B. Detta gjordes i Uppsala på Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala Universitet under ledning av Jaroslaw Majka, efter att enskilda mineral valts ut från tunnslip. Maskinen var av fabrikat *JEOL* och modell *JXA 8530F*. Elektronmikrosond-analys förkortas EMPA i rapporten på grund av den engelska benämningen *Electron Micro-Probe Analysis*.

Under olika tryck och temperaturförhållanden är fördelningen av grundämnen i mineral olika. Laboratorieexperiment har bidragit till emiriska värden för hur dessa ämnen fördelas i mineralen vid olika temperaturer utan att influeras av fluider (Ferry, et al. 1978). Undersökningen gjordes för att hitta exakt ämnessamansättning i olika närliggande mineral. Datan erhölls som oxider och användes sedan för att räkna fram möjliga reaktioner mellan mineral vid metamorfos.

Fluider i kalciumkarbonater

Vid provtagningpunkt 5B togs 5 st prover (samma prover som analyserades med XRF-metoden) i en profil i syfte att fastställa mineralogi i bergarterna samt sammansättning av fluider som kan ha påverkat bergarternas mineralogi under metamorfos. Fluider spelar extra stor roll i metamorfosen av kalciumkarbonater till skillnad från peliter (Winter, 2010) och därför undersöks här temperaturförhållanden i relation till fluidsammansättningen. Enligt empiriska modeller över hur koldioxid (CO_2) i initialt närliggande porvatten påverkar mineralsammansättningen i karbonater under metamorfosen, kan man härleda temperaturen vid bergarternas bildande genom fördelningen av mineral i proverna. Detta är på grund av att olika mineral är stabila under olika förutsättningar som till stor del beror på hur mycket CO_2 respektive H_2O som kan buffras i mineralen samt i närliggande fluider (Winter, 2010). Temperaturförhållanden under metamorfos kan erhållas genom att undersöka fördelningen av kalcit och dolomit i ett jämnviktssystem (Bickle, et al. 1977; Anovitz, et al. 1987). Geotermometer för kalcit och dolomit (Anovitz & Essene, 1987) är svår att få tillräckligt exakt när det gäller hög metamorfos (Mizuochi, et al. 2010) men proverna från Utö uppvisade i huvudsak endast talk och tremolit som indexmineral vilket indikerar låg till mellan metamorf grad. Detta enligt Winter (2010) som genom gamla modeller av *Eskola* och *Bowen* presentar zoner av metamorfos: *talk – tremolit – diopsid - forsterit* (i stigande ordning av temperatur).



Profil av berghäll 5B med markerade provtagningspunkter.

För att räkna fram andelen CO_2 i fluiderna som påverkat bergartsbildningen användes mineralsammansättningen som analyserats med EMPA. Denna data användes för att ta fram aktivitetsenergin då närliggande mineral reagerar med varandra. Databehandlingen gjordes i programmet *AX 2* från *TJB Holland* (2008) som arbetar efter empiriskt framtagna modeller. Datan över aktivitetsenergin kalkylerades sedan med *Thermocalc v. 3.36* av *Powell & Holland* (1998) som erhöll alla möjliga reaktioner som kan ske i ett jämnviktssystem med de identifierade mineral som hittades i proverna. Den reaktion som stämde överens med observationer korrelerades sedan med en empiriskt framtagen geotermometer (Anovitz & Essene, 1987) med en felmarginal på ± 30 °C:

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

$$där\ x = mol\ proportion\ av\ Mg\ i\ kalcit$$

Mängden Mg i kalcit var i relation till mängden Ca i samma mineral. Det antogs vara korrelerat till hur stor del av ett kalcit-mineral som egentligen är dolomit. Det räknades fram genom följande ekvation:

$$\text{Fraktion}_{Mg} = \left(\frac{x\ Mg}{Mol\ Mg}\right) / \left(\frac{x\ Mg}{Mol\ Mg}\right) + \left(\frac{x\ Ca}{Mol\ Ca}\right)$$

För att räkna fram mängden CO_2 i ett intervall av temperaturer krävdes en uppskattning av tryck. Detta tryckvärde var en uppskattning av data från andra arbeten gällande tryck- och temperaturmätningar i närliggande område på Utö, mindre än 1 km från provtagningpunkt 5B. *Thermocalc* kördes flera gånger med olika potentiella mineralsammansättningar och tryckförhållanden. Temperaturer erhållna av geotermometern korrelerades med de kurvor som representerade stabila och mineralogiskt möjliga reaktioner. För att korrelera temperaturen med kurvan togs en ekvation fram från trendlinjen av kurvan vid det område som antogs vara rimligt. Detta gjordes i *Microsoft Excel.*

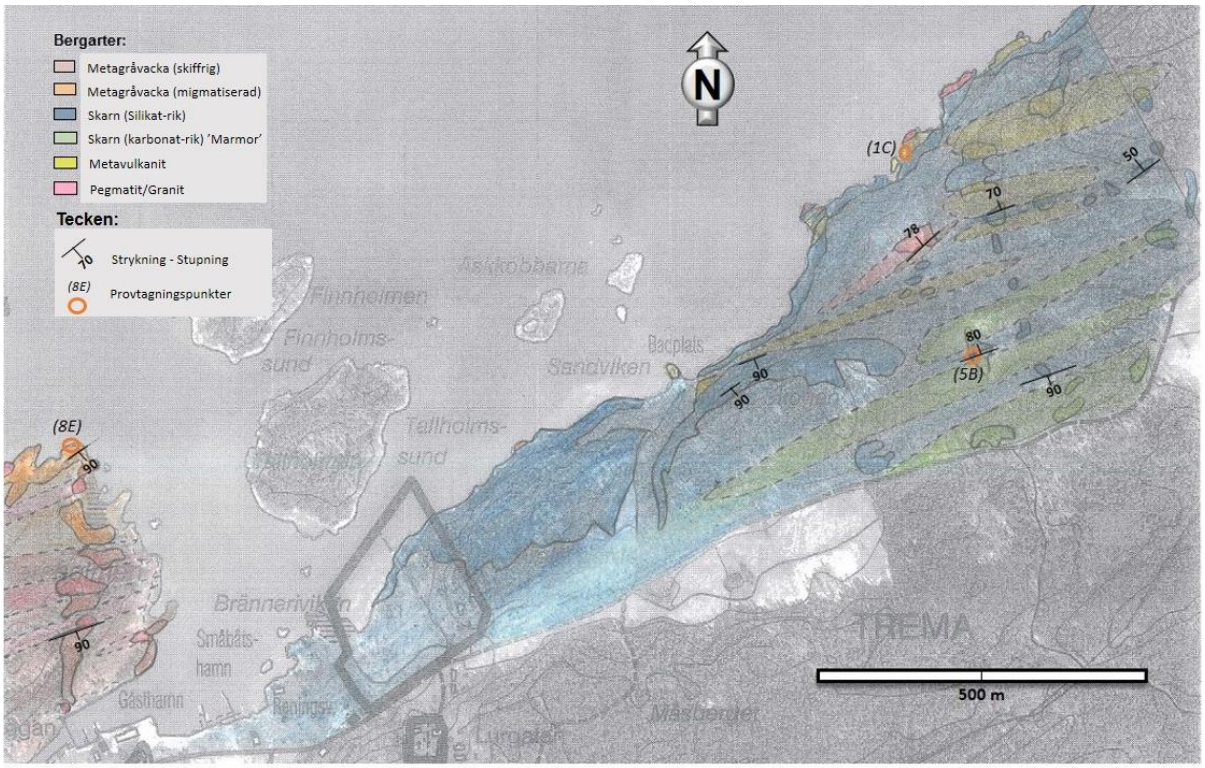
Resultatet från beräkningen av mängden CO_2 i fluiderna kan sedan användas för att beräkna propageringen av fluider samt mängden H_2O som altererat initiala fluidsammansättningen. Vid metamorfos/metasomatism av kalk-silkater (i detta fall, skarn) produceras först CO_2 då karbonater bryts ner. Vid infiltration av H_2O från exempelvis en magmatisk intrusion ändras fluidsammansättninigen, således också mineralogin, under metamorfosen/metasomatosen (Nabelek, 2007). Vidare undersökningar om fluidpropagering genomförs inte i denna rapport.

Flödesschema av metoder och datahantering

Metoder och hantering av olika resultat visualiseras i ett flödesschema i bilaga *f*.

Resultat

Kartering



Karta över område 1, Nordöstra Utö.

Bergarter

Området består i huvudsak av tre typer av metasedimentära bergarter med variationer i mineralsammansättning och struktur: metagråvacka, metavulkanit och skarn. Utöver metasedimentära bergarter hittas också pegmatit och granitiska intrusioner. Dessa typer av bergarter är alla inritade som bergshällar i kartan. Då bergshällarna till stor del var lagrade och laminerade av olika bergarter, kategoriseras de på kartan av den dominerande bergarten på bergshällen. Se bilaga *a* för större karta.

Metagråvackan delas upp i 'lätt skiffrig' bandad metagråvacka med fin till väldigt fin kornstorlek av ljusbrun färg samt en migmatitisk metagråvacka. Inga visuellt synliga mineral i den lätt skiffriga metagråvackan hittas i fält. Den är veckad med öppna veck av en frekvens på decimeter till meter. Denna bergart hittas på södra Persholmen. Den andra typen av metagråvacka är migmatitisk och kornstorleken varierar från väldigt fin till medium. De mediumstora mineralen är biotit, muskovit, turmalin och hornblände. Färgen på denna bergart är svart (leriga lager) till ljusgul (migmatit). Veckning finns, och den är isoklin med laminering och lagring på skalor av millimeter till några få centimeter. Denna gråvacka hittas på norra Persholmen.

Metavulkanit räknas här som den mest homogena finkorniga metasedimentära bergarten och är till synes oskiljbar från flinta. I fält kan ej mineralogin bestämmas pga finkorningheten men den ljusa färgen och den homogena strukturen indikerar vulkanit som protolit. Denna bergart finns som lager i

Skarn med varierande frekvens på millimeter till tiotals meter samt varierande tjocklek på millimeter till upp till ca 4 meter.

Skarn är i detta sammanhang, som namnet antyder, en blandning av silikatmineral och kalciumkarbonater i varierande proportioner (Winter, Mansfeld, 2012). I denna rapport är skarn uppdelad i två teoretiskt möjliga ändsammansättninger; Ren silkat (ex. Kvartsit) och ren kalciumkarbonat (Marmor). Att protoliten av skarn är en mix av siliciklastiskt sediment och karbonater är rimligt med tanke på sedimentens depositionsmiljö som normalt är grund, delvis subaerial shelf (Boggs, 2011; Winter, 2010; Allen, et al. 1996). Silikatdelen har en 'sockrig' struktur och gråblå färg med fin till medium kornstorlek med sporadiskt porfyrisk kvarts. Marmorn är grönvit med fin till medium kornstorlek och porfyrisk tremolit som i många fall står ut vid den vittrade ytan likt en glasyr på tårta. Det ser ut som att matrixen av kalciumrika mineral vittrat bort och lämnat kvar de mer motståndskraftiga tremolitmineralen. Skarn, både silikatskarn och marmor, uppvisar tydlig mineralisation på ytan i form av oxider.

Utöver de trehuvudsakliga metasedimentära bergarterna hittas också pegmatiter karaktäriserade av stora fältspatkristaller samt granitiska intrusioner med liten till stor kristallstorlek, båda med mindre kristaller av kvarts, muskovit, biotit och turmalin.

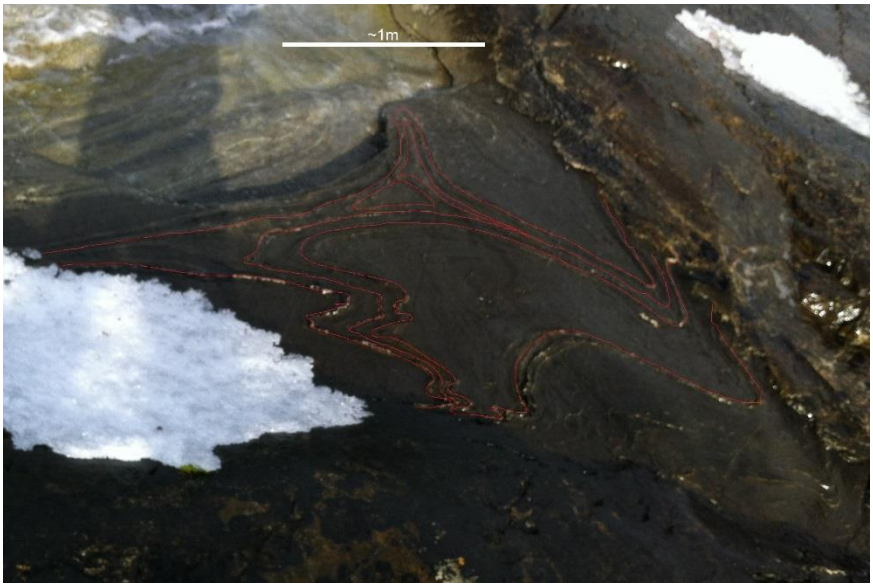
Struktur

Inom skarn hittas foliation parrallellt med lagringen där sammansättningsskillnaderna är abrupta samt i de silikatrika lagren i den norra delen av område 1. Denna foliation är tydlig vid vittring samt vid spaltning när bergarten krossas. Foliation hittas inte i den rena marmorn i södra delen av område 1, längs med vägen. Boudinage av vulkanit och kvartsådror är synliga längs med kuststräckan.

Boudinage av kvartsven. Geologhammare för skala.

Lagring av de olika bergarterna följer generellt 230° till 250° azimuth och är i huvudsak vertikal. Lagring av ändsammansättningerna i skarn hittas i sporadiska delar av område 1 där lagren är centimeter till decimeter tjocka och följer en jämn frekvens. Inlagringen av vulkanit ökar i frekvens och tjocklek norrut mot kusten och är nästan obefintlig i de södra 'marmor-skarn' delarna vid vägen.

Bergarterna som hittas längs med kuststräckan uppvisar kraftig veckning från minst två tektoniska händelser och är väldigt komplex. Bland annat hittas vad som ser ut att vara trippel föreningspunkt av veckning i alternerade skarn- och vulkanitlager, diskontinuitet av strata samt breccia av gråvacka inkorporerade i skarn.



Bilden till vänster visar ett exempel av komplex veckning av berggrunden. Veckningen är spårad genom ett lager med hög relief och markerad med röda linjer i bilden för att tydliggöra strukturen.

Komplex veckning

Vittring

Bland skarn kan man se tydlig carbonat-vittring med håligheter där det är mer kalciumkarbonater. Denna vittring är inte lika tydlig där skarn är mer silikatrik. Detta är viktigt då det gett en första indikation på bergarterns sammansättning, och i senare skede även klassifcering. Där skarn är lagrad tillsammans med metavulkanit är det en tydlig relief där metavulkaniten är mer motståndskraftig mot kemisk vittring. Pegmatiter och metavulkaniter dominerar uddarna längs kusten medans skarn hittas i vikar och stränder.

Alternerade lager av vulkanit och skarn. Geologhammare för skala.

Petrografi

Nedan följer kortfattad, detaljerad information om tunnsliparna från samtliga provtagningpunkter.

5B-1 (Metavulkanit):

Matrix är mikrokristallin kvarts med fläckar av anhedral kalcit som skurits av kalcit/dolomit-ådror. Små, subhedrala kristaller av muskovit följer ådrornas riktingar. Reliefen är positiv hos kalcit/dolomit-kristallerna i relation till kvartsmatrixen. Utöver nämnda mineral hittas också isotropiska fläckar/bubblor (angivet som accesoriskt mineral) som är röda med polariserat ljus. Dessa är antingen föroreningar (lim) eller metalloxider, troligtvis båda.

Mineral:	Kvarts	Kalcit/Dolomit	Muskovit	Accesoriskt
Mängd:	~ 90 %	~ 5 %	~ 5 %	< 1 %

5B-2 (Karbonatrik skarn):

Matrix är mikrokristallin och innehåller i huvudsak kalcit/dolomit och fläckar av kvarts. Talk förekommer även längs ådror med tydlig generell mineralorientering. Fenokryster av kalcit/dolomit uppvisar tydliga lameller i höga indexfärger. Amfiboler hittas i små kluster. De är radierande och fibrösa.

Mineral:	Kvarts	Kalcit/Dolomit	Talk	Amfibol
Mängd:	< 1 %	~ 85 %	~ 10 %	~ 5 %

5B-3 (Karbonatrik skarn):

Detta prov innehåller i huvudsak euhedrala amfiboler som uppvisar en mängd olika storlekar och relief i förhållande till varandra. Anhedrala kalcit/dolimit-kristaller hittas i oregelbunden utsträckning i hela provet och på flera ställen inte i jämnvikt med amfiboler. Reaktioner sker mellan dessa mineral och kanterna är diffusa.

Mineral:	Kvarts	Kalcit/Dolomit	Talk	Amfibol
Mängd:	~ 15 %	~ 20 %	~ 15 %	~ 50 %

5B-4 (Karbonatrik skarn):

Även i detta prov hittas en mängd storlekar och orienteringar av mineral. Kalcit/dolomit är dominerande och uppvisar intensiva färger och lameller både i polariserat och korspolariserat ljus. Utöver kalcit/dolomit hittas amfiboler samt accesoriskt oxidmineral.

Mineral:	Accesoriskt	Kalcit/Dolomit	Amfibol
Mängd:	< 1 %	~ 80 %	~ 20 %

5B-5 (Silikatrik skarn):

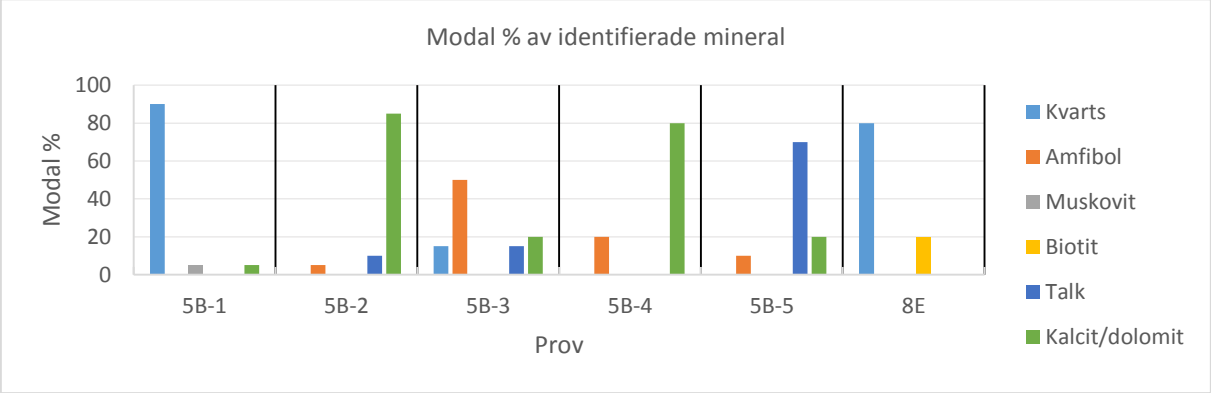
I detta prov hittas fenokryster av muskovit som är i reaktion med kalcit/dolomit, således inte i jämnvikt. Även i detta prov hittas euhedrala amfiboler samt opaka mineral, troligtvis oxider (anges som accesoriskt mineral).

Mineral:	Accesoriskt	Kalcit/Dolomit	Talk	Amfibol
Mängd:	< 1 %	~ 20 %	~ 70 %	~ 10 %

8E a – b (Metagråvacka ,migmatitisk):

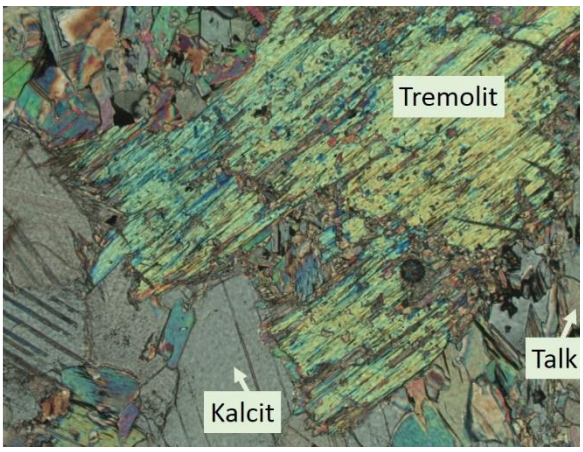
Två prover från 8E (norra Persholmen) uppvisade båda en matrix av kvarts med fenokryster av biotit i väl orienterade lager med frekvens på 1 -2 mm och en tjocklek av två till tre stycken kristaller.

Mineral:	Kvarts	Biotit
Mängd:	~ 80 %	~ 20 %

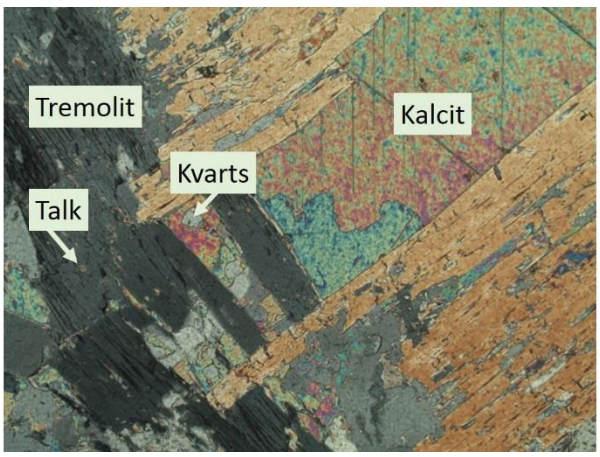


Amfibol i proverna är till synes tremolit men kan i avvikande fall vara andra typer av amfibol, troligtvis actinolit.

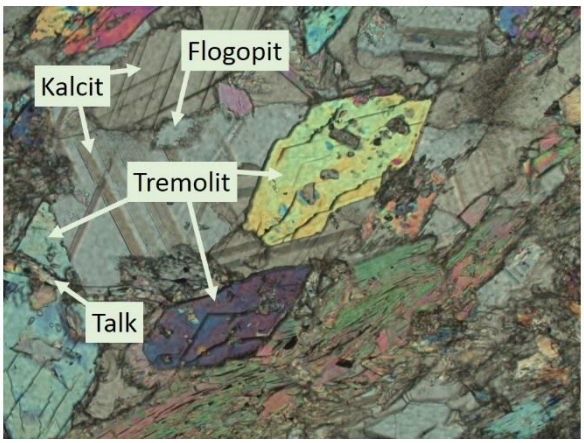
Tre stycken prover valdes ut under petrografin för vidare analys med EMPA. De tillsågade stenklossarna som tunnslipen kom från hade preparerats med salstsyra och resultatet av reaktionen kunde visuellt jämföras med särskilda områden i tunnslipen där förekomsten av närliggande dolomit/kalcit-kristaller till synes var i jämnvikt med varandra.



Tunnslip Prov 5B-2



Tunnslip Prov 5B-3



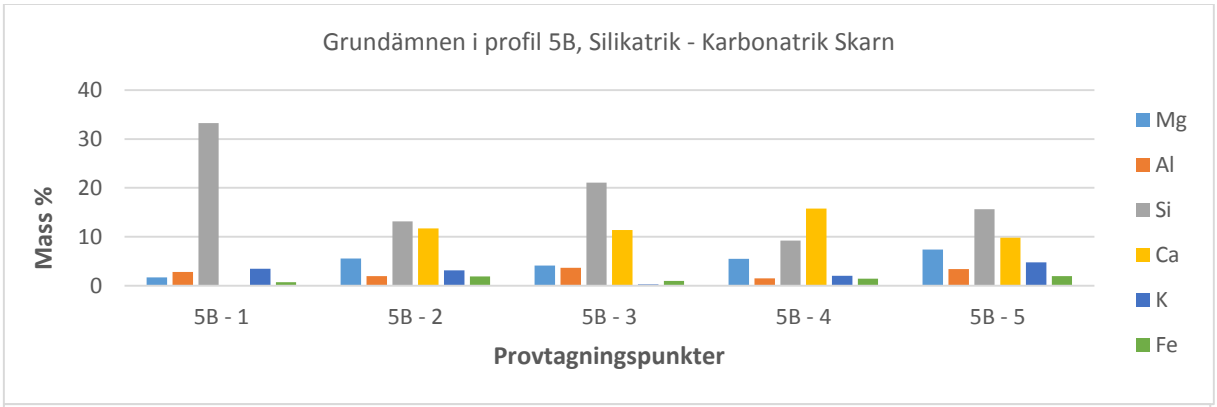
Tunnslip Prov 5B-5

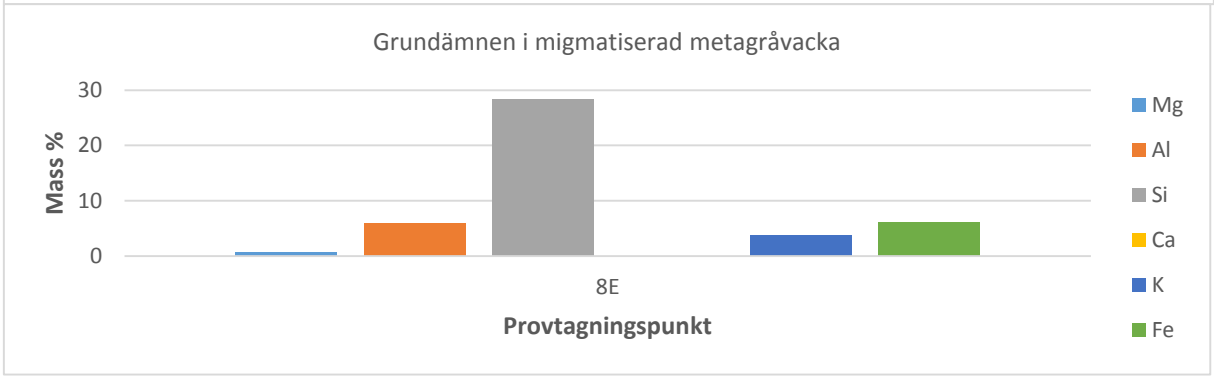
Tunnslip 5B-2, 5B-3 och 5B-5

Här presenteras tre exempel på tunnslip med några identifierade mineral. Bilderna är tagna under korspolariserat ljus och 10x förstoringslins med ett mikroskop från Nikon. Bilderna saknar skala men representerar ett område på lite mindre än 800x600 µm. Prov 5B-2 uppvisar reaktion mellan tremolit och talk.

Röntgenfluorescens (XRF)-analys

Nedan presenteras resultaten av XRF-analysen. Endast ämnen som är mineralbyggande för visuellt observerade mineral syns i grafen. Lättare ämnen än Mg, såsom natrium (Na) och syre (O) syns inte då dessa inte kunde detekteras med XRF(port). Spårämnen, såsom zirkon (Zr) och fosfor (P), etc., representeras inte heller. Graferna är uppdelade i de två provtagningsområdena 5B och 8E.





Elektronmikrosond (EMPA)-analys

De flesta mineral indentifierade vid visuell analys bekräftades vid EMPA-analysen och utöver dessa hittades fler accessoriska mineral. Till exempel, blev vissa mineral identifierade som flogopit. Vid analysen kunde särskilda mineral identieras som antingen kalcit eller dolomit och efter ett flertal undersökningar var det uppenbart att alla prover i huvudsak innehöll kalcit endast med accessorisk dolomit, mest som inklusioner. Endast ett prov (5B-2) innehöll både kalcit och dolomit, samt tremolit och talk. Se bilaga *b* för EMPA-data. Datan är i viktprocent oxider och når inte 100 % då kol (C) och vatten (H_2O), (H_3O) inte räknas med i analysen.

Geotermometer

Geotermometern från Anovitz och Essene (1986) applicerades på det enda prov där både kalcit och dolomit med säkerhet hade identifierats, prov 5B-2. Men för att jämföra resultat och ha fler temperaturer för vidare analyser applicerades geotermometern även på prov 5B-3 samt 5B-5 där ingen dolomit med säkerhet hade identifierats. Samtliga prov hade undersökts med EMPA. Mol-koncentrationen av Mg i kalcit räknades ut och sattes in i ekvationen. Nedan följer respektive temperaturer.

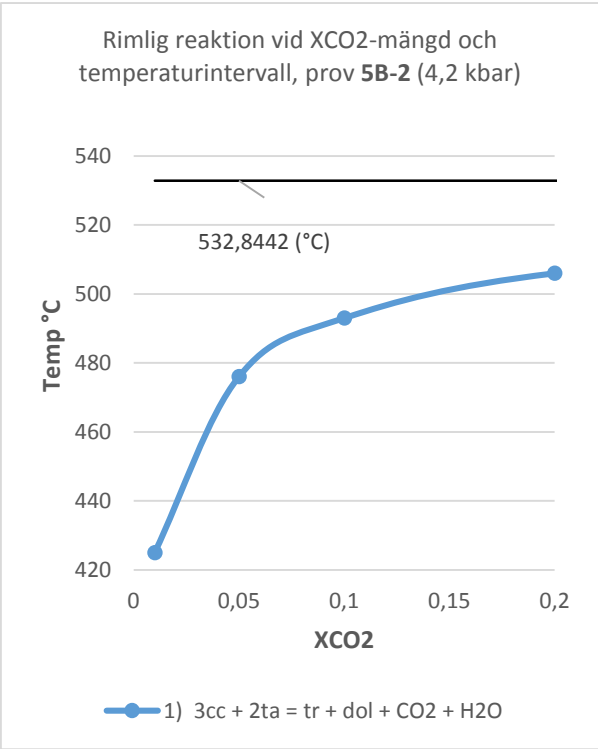
Prov:	**Del Mg i kalcit:**	**Temperatur (°C):**
5B-2	*0.05*	*533 ± 30*
5B-3	*0.02*	*388 ± 30*
5B-5	*0.03*	*440 ± 30*

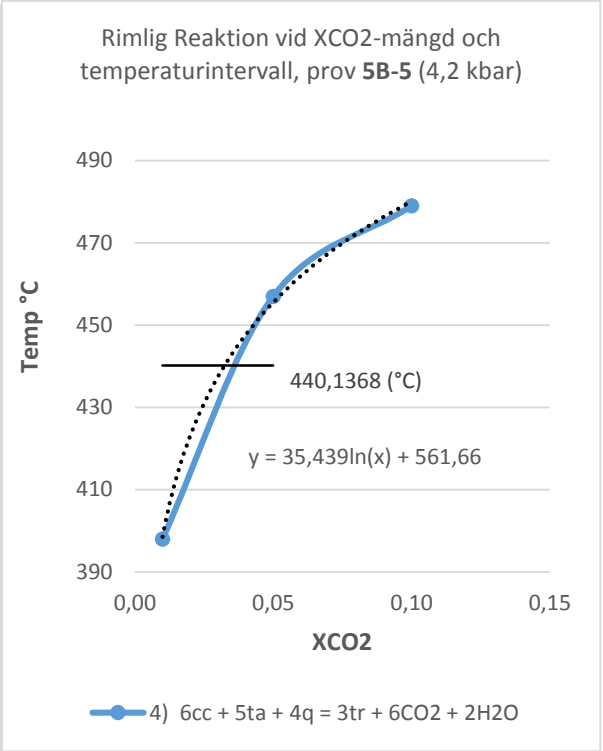
Temperaturer applicerades på reaktionskurvorna på graferna. Enligt ekvationerna erhållna av trendlinjerna kunde halten CO_2 räknas fram. Den reaktion som innehöll alla de säkert identifierade mineral i prov 5B-2 passade inte med temperaturen. I prov 5B-5 erhölls däremot en reaktion från Thermocalc som passade den framräknade temperaturen. Detta prov uppvisade inte dolomit vid visuell analys eller vid EMPA-analys men antas här ändå innehålla kalcit och dolomit i ett jämnviktssytem då reaktionskurvan skär temperaturlinjen. Efter kalkylering av den erhållna ekvationen från trendlinjen kunde halten CO_2 i fluiderna bestämmas.

$$y = 35{,}439ln(x) + 561{,}66$$

Där y = temperaturen från Anovitz & Essene's ekvation (1986) och x = halten CO_2 som fraktion av hela mängden fluider. Resultatet är ca 0.03, vilket är ca 3 %.

Nedan presenteras kurvorna med temperaturer samt halten av CO_2 i fluiderna.



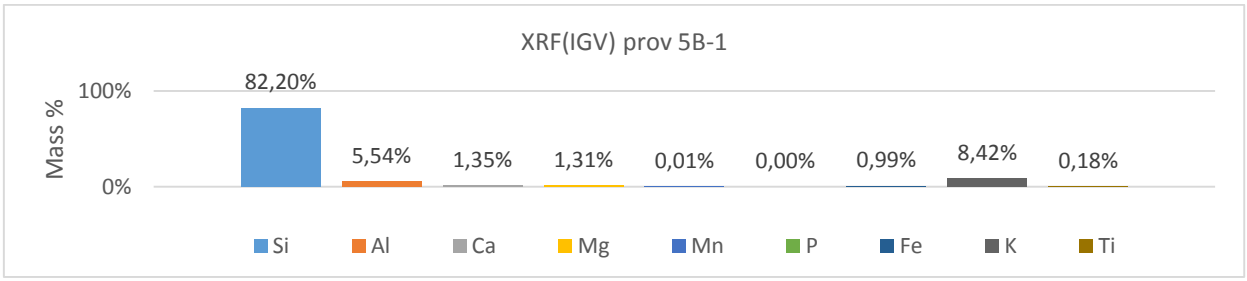


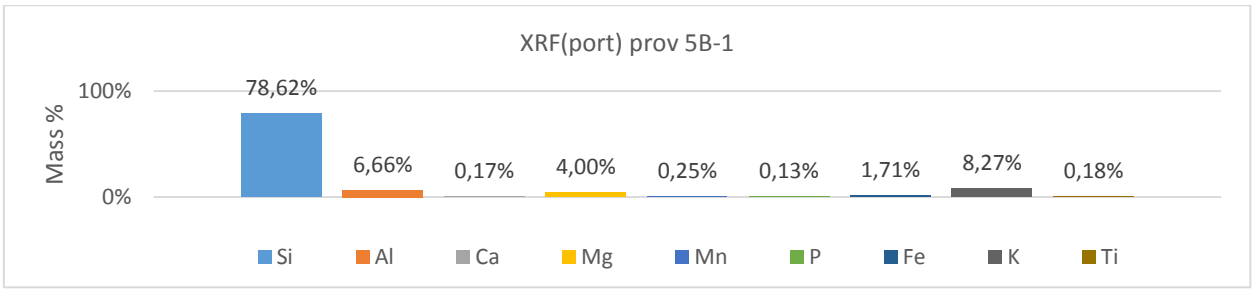
Felkällor

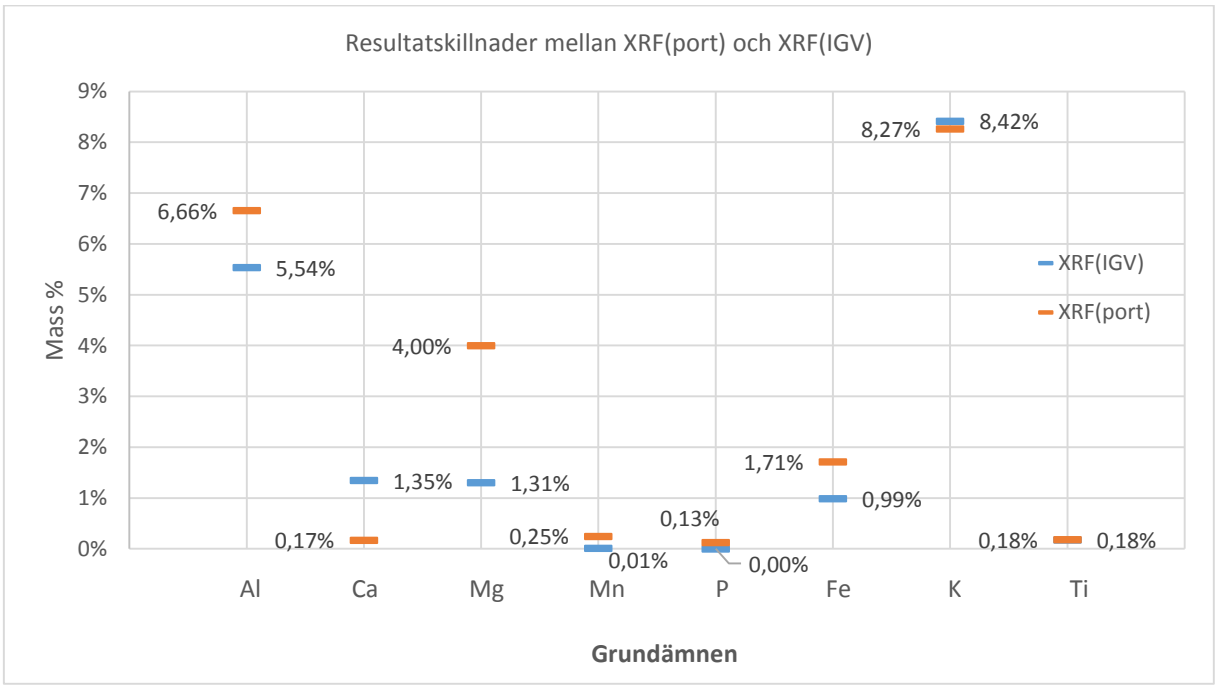
Förutom de felkällor man vet om, exempelvis felmarginaler vid kalibrering och körning av intrument, finns också de aspekter som handlar om ren intuition och tolkning av visuella intryck. Detta är i stor utsträckning påverkat av erfarenhet och vad som förväntas identifieras i fält. Under arbetet togs dessa aspekter i beaktning.

För att minimera felkällorna vid kartering och provtagning i fält undersöktes samma område flera gånger under olika väderförutsättningar samt efter noggranna omkategoriseringar av bergarter tillsammans med de andra studenterna på plats. Eftersom stora delar av berggrunden var kraftigt vittrad samt gömd under vegetation, is och snö är mycket av området interpolerat på kartan. Flera ’steniga’ ställen på området åsidosattes från karteringen då de inte kunde bekräftas vara berggrund till skillnad från morän/flyttblock.

Vid ämnesanalyserna, XRF samt EMPA, erhölls standardvärden för avvikelse. Dessa värden var fullt tillräckliga då flera prover som jämfördes med varandra också analyserades med samma metod/utrustning. Dock var det intressant att se hur stor skillnad det var mellan olika typer av XRF-analyser. Resultat från XRF(IGV) räknades om till ren grundämnessammansättning, ej som oxider, då resultat från XRF(port) endast erhölls som grundämnen, ej som oxider. Resultaten kunde normaliseras till 100 % (mass- /vikt- %) och standardavvikelser från XRF(port) jämfördes med faktiska avvikelser XRF-metoderna emellan. Det var mindre avvikelser mellan de olika XRF-metoderna än vad XRF(port) erhöll som standard. XRF(port) anses erhålla tillräckligt noggranna värden. Nedan följer jämförelser av XRF-metoder från prov 5B-1.







Gällande kalkylering av stabila reaktioner och temperaturer i databehandlingsprogrammen AX 2, Thermocalc och Microsoft Excel görs en mängd antaganden. Detta är en felkälla då antaganden kan vara felaktiga. Som exempel var tryckvärden en mängd uppskattningar beroende på vedertagna föreställningar om vilket tryck som ’verkar rimligt’. I fallen som tas upp i denna rapport hade inte trycket betydelse då samma reaktioner och snarlika temperaturer räknades fram vid olika tryckvärden. Ett viktigt antagande som görs är att mineralen är i jämnvikt med varandra och att inga energier är inbyggda i ett system. Detta kan man inte säkert veta, och för att försäkra sig om att resultat är tillräckligt exakta krävs kartläggning av felkällor genom hela processen. Winter (2010) listar en mängd felkällor under hela datainsamlings- och databehandlingsprocessen. Under detta arbete har endast ett fåtal tagits i beaktning och ingen har undersökt noggrant.

Diskussion

Kartering av område 1 på Utö har delvis varit en metod att hitta lämpliga provtagningspunkter men också för att få en helhetsbild av bergarternas utbredning för vidare undersökningar. Då Utö tidigare blivit karterat i stor omfattning var det av intresse att bekräfta eller falsifiera delar av tidigare vedertagna geologiska kartor, särskilt den som publicerats av Talbot (2008). Gällande bergartsbeskrivning stämmer observationerna och analyserna i denna rapport bra överens med tidigare vedertagna bergartsbeskrivningar trots den komplexitet som råder.

Svårigheter med att identifiera mineral har varit omfattande och det har visat sig nödvändigt att kombinera petrografiska analyser med mer sofistikerade analysmetoder som XRF och EMPA för att säkerställa mineralogin.

XRF-data visade tyvärr ingen trend i mineralogin. Förhoppningen var att se tydlig förändring i mineralogin längs profil 5B som kunde korreleras med eventuell diffusion av fluider och förändring av reaktioner. Däremot visade dessa resultat en blandning av kalk-rika och silikat-rika bergarter som bekräftar kategoriseringen 'skarn'. Vidare undersökningar i större geografisk skala vore av intresse.

Vid applicering av geotermometern på reaktionskurvan gjordes två antaganden; ett tryck på 4.2 kbar samt förekomsten av dolomit i provet. Dessa antaganden gjordes för att ha en rimlig utgångspunkt. I profilen 5B vore det osannolikt om det endast förekom dolomit vid en punkt/lager på bara några centimeter då hela profilen uppvisade typisk skarn-sammansättning. Trycket har diskuterats mellan flera personer som gjorde undersökningar vid närliggande områden och som bestämde tryck och temperatur av metapeliter via andra kalkyleringar genom AX 2 och Thermocalc. Dessa resultat har varit inkonsekventa med betydande felmarginaler, men med indexmineral har ändå trycket uppskattats till ett mindre intervall där 4.2 kbar kan inkluderas. Således finner jag mätningar samt uppskattningar av tryck och temperatur vid metamorfos rimliga.

Att räkna fram mängden CO_2 i fluiderna i det initiala systemet är intressant då det kan användas till att jämföra med andra närliggande bergarter och således veta huruvida fluider diffuserade genom berget, var CO_2-bärande och om de påverkades av dehydrering av närliggande lermineral eller magmatiska intrusioner. Då detta inte undersökts i denna rapport finns förhoppningar om en sådan framtida undersökning. Det vore dessutom av intresse att göra om hela processen med mer EMPA-data i syfte att presentera reaktionskurvor som är mer konsekventa och dessutom stabila vid den angivna temperaturen.

Slutsats

Beräkningarna visar att temperaturen vid metamorfos nådde 440 ± 30 °C med en reaktion där dolomit inte längre var stabil. Som resultat av reaktionen frigjordes CO_2 till fluiderna upp till en halt av ca 3 %. Temperaturen och förekomsten av tremolit och talk, samt frånvaron av diopsid och wollastonit, placerar graden av metamorfos som låg. Andra samtida undersökningar presenterar andalusit som indexmineral vilket tillåter ett tryck på högst ca 4 kbar, men troligtvis högre då andalusiterna kan varit metastabila. Därför verkar det troligt att metamorf fas är mellan amfibolit och grönskiffer, kanske i hornfelsfasen.

Tack till...

Alasdair Skelton och Joakim Mansfeld för projektutformning och handledning, både i fält, laboratorium och inom litteraturstudier.

Dan Zetterberg, Runa Jacobsson, Jaroslaw Majka och Curt Broman för assistans vid preparering och analys av prover.

Linnéa Lundin för litteraturreferenser.

Adam Engström för diskussioner.

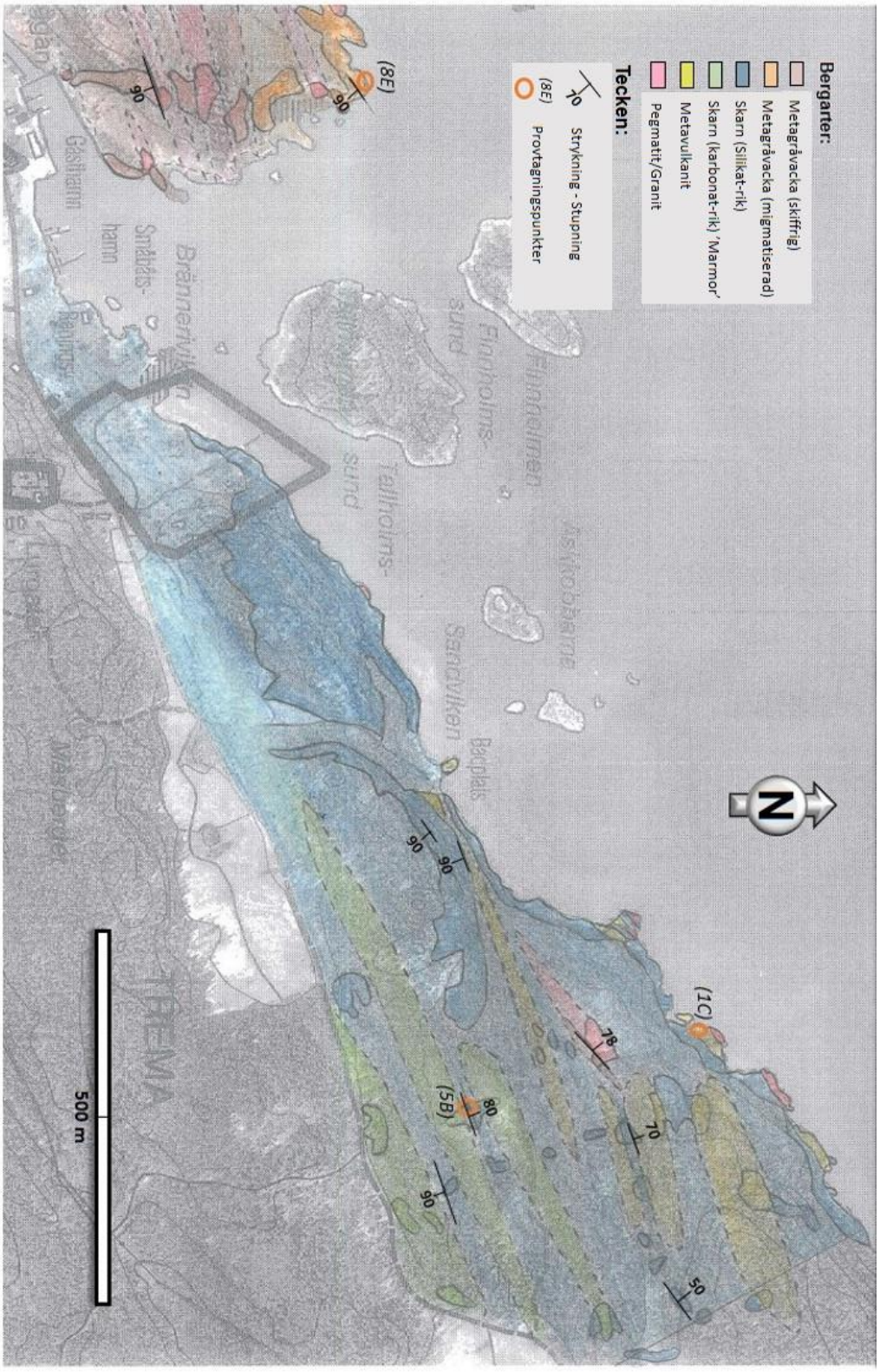
Josefin Linde, Fredrik Antevik, Johanna Bornsjö, Anton Lidström och Måns Daniel för sällskap och vägledning under hela projektet.

Referenser

- Zhao G. , Cawood P. A. , Wilde S. A. , Sun M. , *Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent*, Elsevier Earth Science Reviews 59 (2002), 125-162
- Talbot C. J. *, Palaeoproterozoic crustal building in NE Utö, southern Svecofennides,*
- *Sweden*, GFF, 130:2 (2008), 49-70
- Lahtinen R. , Huhma H. , Kähkönen Y. , Mänttäri I. , *Paleoproterozoic sediment recycling during multiphase orogenic evolution in Fennoscandia, the Tampere and Pirkanmaa belts, Finland,* Elsevier Precambrian Research 174 (2009) 310–336
- Lundström I., Allen R. L. , Persson P. O. , Ripa M. *, Stratigraphies and depositional ages of Svecofennian, Palaeoproterozoic metavolcanic rocks in E. Svealand and Bergslagen, south central Sweden*, GFF, Vol. 120 (1998), pages 315-320
- Mansfeld J. , *Geology of Utö – excursion guide,* Dianium Science (2012)
- Andersson U. B. , Högdahl K. , Sjöström H. , Bergman S. , *Multistage growth and reworking of the Palaeoproterozoic crust in the Bergslagen area, southern Sweden: evidence from U–Pb geochronology*, Geol. Mag. 143 (5), (2006), pp. 679–697.
- Winter J. D. , *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*, 2nd ed, Int. ed, Pearson, New Jersey USA (2010), pp 136 -142, 635 - 646, Appendix B
- Boggs Jr. S. , *Principles of sedimentology and stratigraphy*, 5th ed, Int. ed, Pearson, New Jersey USA (2011), pp 328
- Ferry J. M. , Spear F. S. , *Experimental Calibration of the Partitioning of Fe and Mg between Biotite and Garnet*, Contributions to Mineralogy and Petrology 66, 113 - 117, Springer – Verlag (1978)
- Bickle M. J. , Powell R. , *Calcite – Dolomite Geothermometry for Iron-Bearing Carbonates*, Contributions to Mineralogy and Petrology 59, 281 – 292, Springer – Verlag (1977)
- Mizuochi H. , Satish-Kumar M. , Motoyoshi Y. , Michibayashi K. , *Exsolution of dolomite and application of Calcite–dolomite solvus geothermometry in high-grade marbles: an example from Skallevikshalsen, East Antarctica,* Journal of Metamorphic Geology 28, 509 – 526, Wiley – Blackwell (2010)
- Anovitz L. M. , Essene E. J. , *Phase Equilibria in the System $CaCO_3$ – $MgCO_3$ – $FeCO_3$,* Dept. of Geological Sciences, The University of Michigan (1986)
- Allen R. L. , Lundström I. , Ripa M. , Christoffersson H. , *Facies analysisof a 1.9 Ga, continental margin, back-arc, felsic caldera province with diverse Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) sulfide and Fe oxide deposits, Bergslagen region, Sweden*, Economic Geology (1996), V. 91, 979 - 1008
- Dickson J. A. D. , *Carbonate Identification and Genesis as Revealed by Staining*, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 36 (1966), abstract
- Holland T. J. B. , Powell R. , *An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest*, Journal of Metamorphic Geology (1998), 309 – 343
- Nabelek P. I. , *Fluid evolution and kinetics of metamorphic reactions in calc-silicate contact aureoles – From H_2O to CO_2 and back*, Geology (2007) 35, 927 - 930

Bilagor

a) Karta



b) EMPA-data (Mass %)

SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	Fe2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	total	Prov_mineral
56,43	0,01	1,41	0,00	0,00	1,93	0,23	22,90	13,75	0,16	0,08	96,9018	JN5B_2_a_tre
40,77	0,34	14,13	0,00	0,00	3,39	0,15	24,42	0,01	0,07	9,77	93,0592	JN5B_2_a_phl
0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,31	0,49	2,07	55,00	0,00	0,00	57,9011	JN5B_2_a_cc
0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	1,34	0,90	18,88	31,79	0,00	0,00	52,9562	JN5B_2_a_dol
55,47	0,02	3,32	0,03	0,00	2,11	0,00	30,10	1,54	0,06	0,03	92,6859	JN5B_2_a_ta
0,213	0,000	0,025	0,000	0,000	0,172	0,306	0,840	55,670	0,029	0,031	57,2856	JN5B_3_cc
43,720	0,010	0,292	0,026	0,000	1,560	0,148	20,530	16,050	0,136	0,186	82,6584	JN5B_3_tre(bad)
57,470	0,054	0,539	0,000	0,000	2,180	0,241	22,540	13,490	0,060	0,052	96,6267	JN5B_3_tre(good)
44,180	0,002	5,190	0,050	0,000	1,620	0,047	23,240	1,440	0,644	0,466	76,8784	JN5B_3_ta
52,900	0,037	5,940	0,033	0,000	2,580	0,056	32,360	0,335	0,094	0,043	94,3772	JN5B_5_ta
55,750	0,051	2,630	0,065	0,000	1,660	0,153	22,490	13,350	0,246	0,134	96,5283	JN5B_5_tre
0,045	0,017	0,024	0,041	0,000	0,143	0,300	1,179	54,740	0,000	0,006	56,4944	JN5B_5_cc
41,470	0,324	#####	0,000	0,000	2,680	0,043	24,440	0,194	0,089	9,600	93,8795	JN5B_5_phl

c) AX 2 – input file (.txt) för prov 5B-5

SiO2 TiO2 Al2O3 Cr2O3 Fe2O3 FeO MnO MgO CaO Na2O K2O
ta
52.90 0.04 5.94 0.03 0.00 2.58 0.06 32.36 0.33 0.09 0.04
amph
55.75 0.05 2.63 0.06 0.00 1.66 0.15 22.49 13.35 0.25 0.13
carb
0.04 0.02 0.02 0.04 0.00 0.14 0.30 1.18 54.74 0.00 0.01
mu
41.47 0.32 15.04 0.00 0.00 2.68 0.04 24.44 0.19 0.09 9.60

d) AX2 – output file / Thermocalc – input file (.txt) för prov 5B-5

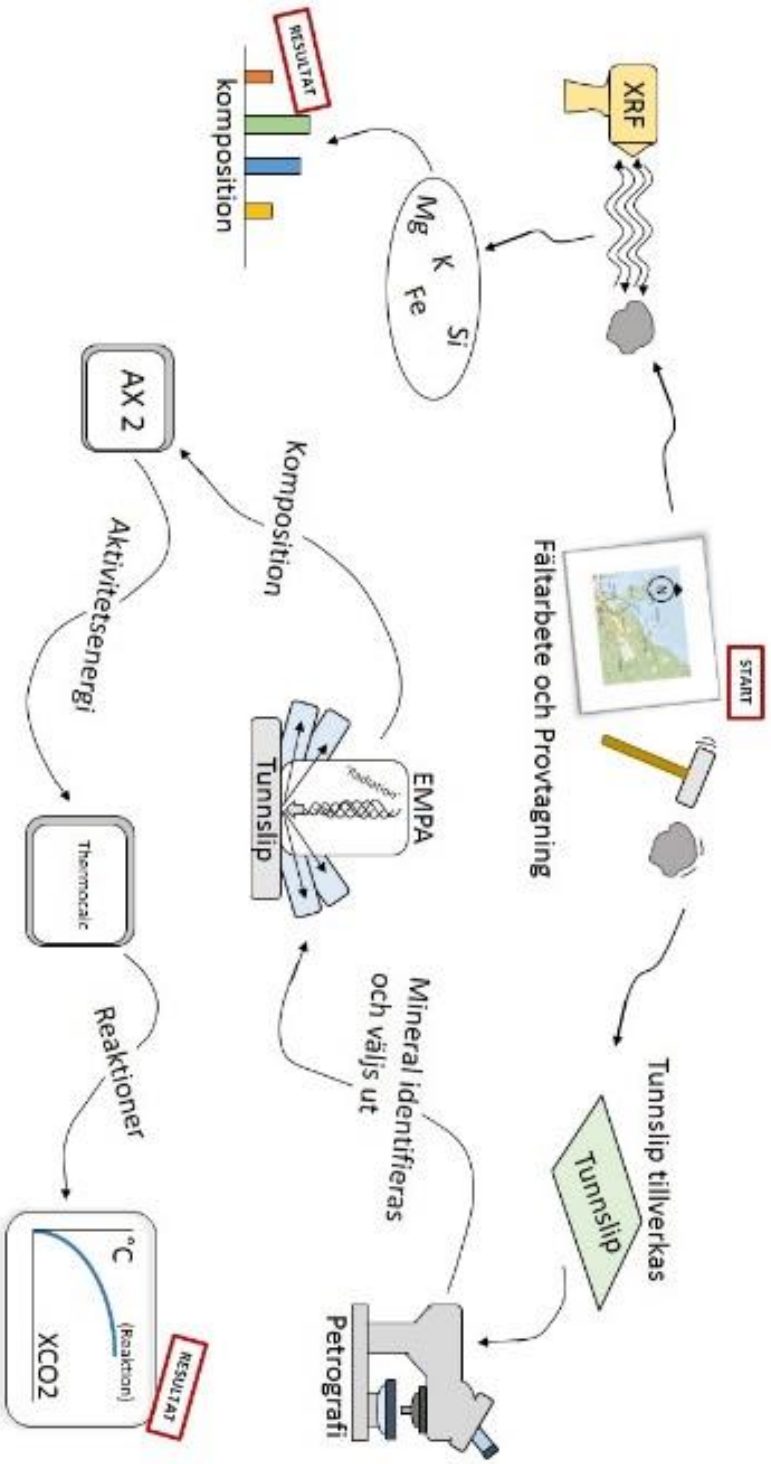
% thermocalc file (requires editing before use)
ta 0.63 0.0470 fta 0.000041 0.0000172
tr 0.69 0.086 ts 0.0109 0.0029 parg 0.3312 0.0414
mag 0.706 0.0177 cc 0.97 0.0242

q H2O CO2 dol
% add your other end-members here (dol är tillagt)
*

e) Thermocalc – output data (delar av log-filen) för prov 5B-5

¥ stable intersection 1 involving tr,mag,cc,ta,q + (CO2,H2O)			
	low T	high T	dx/dt
4) 6cc + 5ta + 4q = 3tr + 6CO2 + 2H2O [mag]		stable	-0,0282
2) 2cc + 2ta = tr + mag + CO2 + H2O [q]		stable	-0,00806
1) 3mag + 4q + H2O = ta + 3CO2 [tr,cc]	stable	stable	0,00566
3) 5mag + 2cc + 8q + H2O = tr + 7CO2 [ta]		stable	0,011

T = 522 ¡C , x(CO2) = 0,854

	x(CO2)	0,01	0,05	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	0,90	0,95	0,99	sdT
1) 3mag + 4q + H2O = ta + 3CO2	1	317	380	403	422	443	468	506	541	574	657	5
2) 2cc + 2ta = tr + mag + CO2 + H2O	2			525	539	549	548	533				14
3) 5mag + 2cc + 8q + H2O = tr + 7CO2	3								531	546	573	4
4) 6cc + 5ta + 4q = 3tr + 6CO2 + 2H2O	4	398	457	479	496	512	522	525	518	507	477	8

f) Flödesschema av metod och resultathantering