Sammanfattning

Berggrunden på norra Utö har karterats i fält som en del av projektet Metamorphic map of Sweden. Vidare har stuffer analyserats i tunnslip och mikrosond, för att med datorprogrammen THERMOCALC, AX samt Anovitz & Essenses kalcit-dolomit-geotermometer (1987) för kunna fastställa vilken grad av metamorfos området utsatts för. Berggrunden visade sig utgöras främst av pelagiska metasediment som karbonatbergarter och gråvackor, med avbrott i form av felsiska vulkaniter som följer lagringen. I fält såväl som mikroskop indikerade resultaten en relativt låg grad av metamorfos. De geotermobarymetriska uträkningarna som utförs i rapporten stöder detta resultat och bestämmer temperaturen till mellan 430 och 697°C samt trycket 4.5±2.3Kbar, vilket placerar metamorfosen inom ”Amphibolite facies”. Undersökningar kring XCO_2-värdet i den fluid som verkat under metamorfosen uppvisade resultat med stora osäkerheter.

Innehållsförteckning

Sammanfattning 1

Inledning 3

Geologisk bakgrund 4

Metod 4

Kartering 4

Provtagning och analysförberedelse 5

Beräkningar 5

Resultat 6

Berggrundskarta 6

Lithologisk beskrivning 8

Shelfrelaterade metasediment 8

Kvartsporfyr 8

Karbonatregionen 8

Provresultat 9

Prov 1: 9

Prov 2: 9

Prov 3 9

Mikrosonddata 10

Tryck, temperatur och XCO_2 11

Felkällor 13

Diskussion 13

Slutsats 14

Referenser 15

Appendix A 16

Prov 2 16

Körning 1 16

Körning 2 17

Körning 3 18

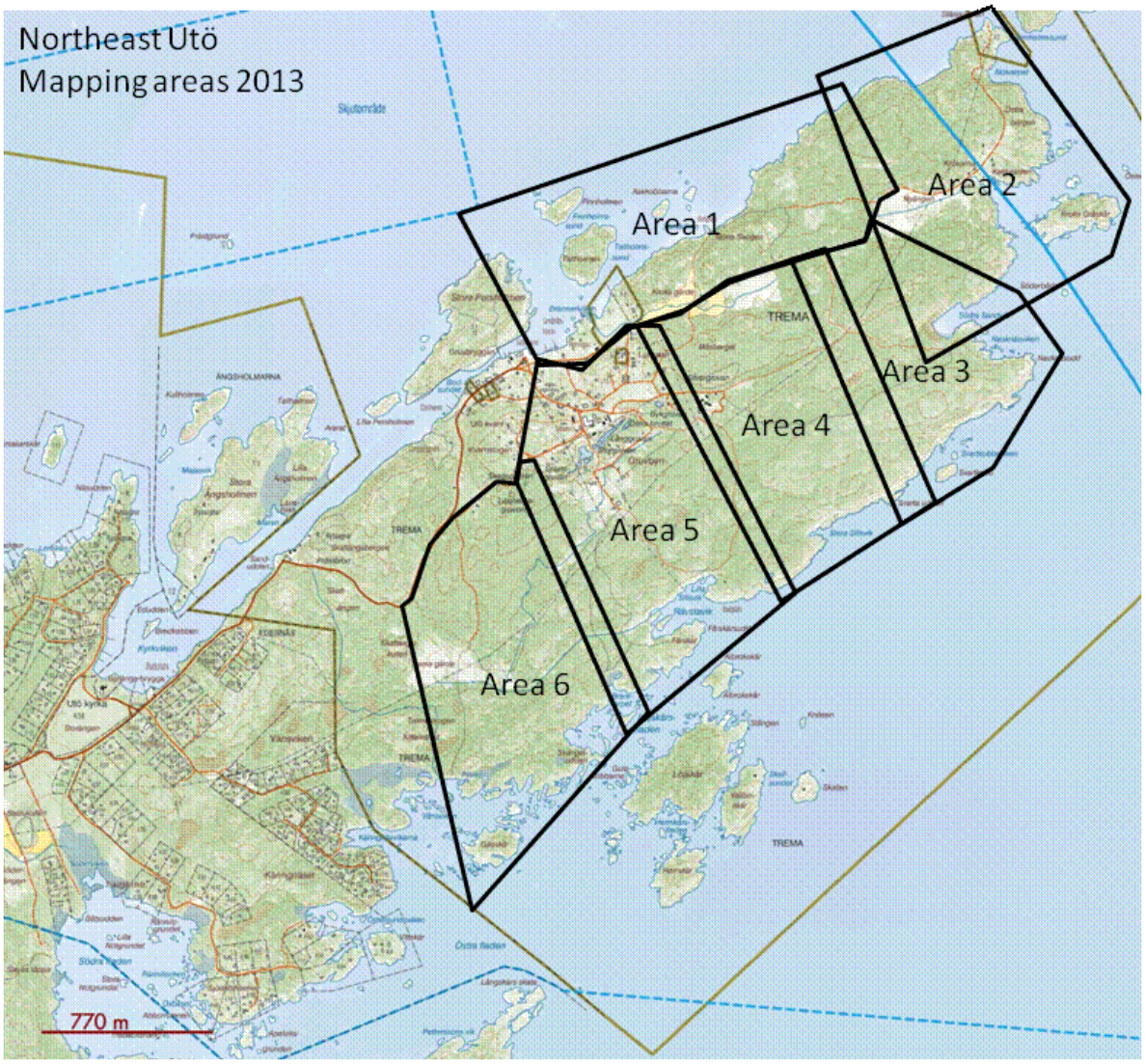
Prov 3 19

Appendix B 21

Appendix C 22

Inledning

Metamorphic map of sweden är ett SGU finansierat projekt, initierat av Alasdair Skelton, med målet att kartlägga de metamorfa förhållanden som rått i Sverige med avseende för tryck, temperatur och tid. Denna rapport utgör en del i en gren av detta projekt där sex studenter från Stockholms universitet arbetat med att kartlägga och undersöka varsitt område på norra Utö. Den här rapporten utgör den del av undersökningen som behandlar område 6 på kartan nedan. Övriga arbeten utfördes av Johanna Bornsjö, Fredrik Antevik, Jonas Nilsson, Josefin Linde och Måns Danel. Syftet med rapporten är således att fastställa de tryck, temperatur och fluidförhållanden som rått under metamorfosen av område 6.



Figur 1: karta över norra Utö. (Lantmäteriet)

Geologisk bakgrund

Utö är en mycket välbevarad och väldokumenterad del av den svekofenniska berggrunden i Sverige. Den är belägen i Stockholms sydöstra skärgård, i den större geologiska regionen Bergslagen. Bergslagen karakteriseras av bergarter relaterade till skapandet och nedbrytningen av bergarter bildade vid en subduktionszon, där Utö är kvarlevor från ett ackretionsprisma (Talbot, 2008). Subduktionen tros ha påbörjats för ca 1900 miljoner år sedan (Lundström et al. 1998) och ägt rum söder om ekvatorn där Bergslagen vid denna tidpunkt var belägen. (Lundström & Koyi 2003)

Stratigrafin på utö ligger vertikalt bandad vilket gör det enkelt att vandra över de spår i berget som berättar om öns historia. De äldsta lagren ligger på öns sydöstra del och de yngsta i nordväst (Lundström et al. 1998). De tidigast avsatta sedimenten är gråvackor med varvade finkorniga sediment och korsskiktning vilket antyder relativt djupa vattenförhållanden. Dessa blir mer och mer grovkorniga och bildar sandstenar och konglomerat längre in mot land. Denna utveckling, med karakteristiska kustnära sediment, tros vara resultatet av en landhöjning till följd av stigande magmor och expanderande krusta. Detta tros ha skett i samband med vulkanismen i området (Lundström & Koyi 2003). När vulkanöarna i området samlat tillräckligt med styrka vidtog våldsamma utbrott och jordskalv, vilket syns på de porfyriska vulkaniter som efterföljer sandstenen i stratigrafin. När utbrotten avtagit en aning och vulkanerna börjat kollapsa för att bilda kalderor, sjönk havsbotten något. Detta ledde till att grunda och lugna vattenförhållanden uppstod. Möjligen i form av en forearc basin (Talbot 2008). I dessa vatten avsattes karbonatbergarter varvat med silikatbergarter i form av tefra och pyroklastiska flöden från sporadiska närliggande utbrott.

i ett senare skede pressades alla lager som utgör Utös berggrund ihop och veckades till en gigantisk synform när den Svecofenniska orogenesen inleddes. Det finns idag inga exakta dateringar av denna händelse, men man tror att det rör sig om någon gång för mellan 1.9 och 1.8 miljarder år sedan. (Stephens et al, 2009) I samband med detta metamorfoserades Utös berggrund under lågt tryck och hög temperatur, något som är typiskt i äldre metamorfa terränger. Mineral som andalusit, granat och sillimanit bildades vid detta tillfälle. När den Svecofenniska orogenesen nått sin termala maximum började de sedimentära bergarter som utgör Utös grund att smälta upp. Detta ledde till att granitiska fluider och pegmatiter steg upp genom berggrunden. Dessa kan synas på flertalet platser på Utö än idag. (Lundström & Koyi, 2003)

Metod

Kartering

Karteringen av det utvalda området på utö ägde rum mellan den tredje och sjuttonde april, 2013. Området (Area6, Figur 1) på ca 1km delades in i sex transekter (Figur 3) med den generella riktningen NNW-SSE för att på ett effektivt och noggrannt sätt kartlägga berggrunden. Anledningen till att just denna riktning valdes är att den skär den kronologiska stratigrafin med nära rät vinkel. Transekterna stegades sedan upp för att få ett exakt värde att relatera observationer med. På så vis skapades 6 stratigrafiska kolumner, som sedan kunde härledas till varandra och extrapoleras över hela området. Alla hällar inom synhåll från transekterna har undersökts. Anledningen till denna begränsning sattes var för att undvika att hamna ur kurs.

Tolkningen av hällar genomfördes med hjälp av lupp, geologhammare och nycklar av stål. Nycklarna användes för att ta reda på bergets hårdhet, som kan vara ett gott komplement till andra visuella tolkningar. Speciellt där berget är mycket finkornigt och svårt att identifiera. I de finkorniga delarna av karbonatregionen (figur 2) användes denna metod flitigt för att skilja på marmor och skarn. Den relativa hårheten antogs där nämligen vara ett resultat av kalkhalten. Strukturell data som strykning och stupning mättes med hjälp av högerhandsregeln och en kompass med klinometer.

Resultaten från berggrundstolkningen plottades ut längs höjdtransekter skapade i GIS. Höjddatan är hämtad från Lantmäteriet. Berggrundstolkningar från transekterna extrapolerades över det resterande området för att nå det slutgiltiga resultatet.

Provtagning och analysförberedelse

Tre prover från området togs för vidare analys i tunnslipsmikroskop och sedan mikrosond (EMPA, electron microprobe analysis) och datorprogrammen AX och THERMOCALC. Tunnslipen som tillverkades av Vancouver petrographics med måtten 26x46mm och tjocklek 30 mikrometer, användes för att bekräfta fältobservationer, studera reaktionsjämvikter, och hitta lämpliga kristaller att studera vidare med EMPA. Mikrosondsanalyser utfördes den 23:e maj, 2013 på Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet under uppsyn av Dr. Jaroslaw Majka. Innan analyserna gjordes belades proverna med ett lager av kol för att öka den elektriska konduktiviteten och därigenom undvika att statisk elektrisitet byggdes upp under körningen. Karbonatprovet testades även med saltsyra av koncentrationen 1mol/l för att undersöka om det mestadels bestod av dolomit eller kalcit.

Beräkningar

Geotermobarymetri är ett samlingsnamn för geotermometri och geobarymetri. Båda dessa metoder går ut på att studera distributionskoefficienten av grundämnen i fasta lösningar. Distributionskoefficienten är med andra ord förhållandet mellan ämnen som substsituerar varandra mellan två kristaller. Eftersom detta förhållande är tryck och temperaturstyrt kan man räkna ut den tryck och den temperatur där förhållandet befinner sig i jämvikt. Magnesium-järn förhållandet mellan granat och biotit, även känt som GARB används t.ex. flitigt vid temperaturbestämningar. Detta är eftersom magnesium och järnoxiderna har en liknande atomradie och därför påverkas liknande av tryck. Förhållandet är istället högst beroende av temperatur vilket gör det till ett träffsäkert verktygj. Geobarymetrar använder sig tvärt om av förhållanden som påverkas till stor grad av tryck, och till liten grad av temperatur. Alla dessa beräkningar bygger på empiriska reaktionsstudier och antar att reaktionen i fråga befinner sig i jämvikt. Eftersom energi krävs för att påverka fördelningen av grundämnen mellan mineral påverkas inte detta förhållande nämnvärt av den retrograda metamorfosen. Detta gör att man kan erhålla tryck och temperaturmaximum med hjälp av denna metod. (Winter, 2010)

THERMOCALC är ett verktyg som utför termodynamiska beräkningar genom att konstruera fasdiagram baserade på en given mineralogi. Med hjälp av fasdiagrammen kan programmet sedan läsa av vid vilka tryck och temperaturförhållanden dessa reaktionerna kan ha skapat det oxidförhållande som observerats. Den version som användes i detta arbete är version 3.33, och de formler som användes var bland andra geotermometern GARB(Ferry & spear, 1978) samt geobarometern GASP(Koziol & Newton, 1988). Programmet i sig utvecklades av T.J.B Holland och R. Powell. Alla de reaktioner som använts besrkivs av formler i THERMOCALC-loggarna under appendix

A. För att THERMOCALC ska kunna genomföra sina beräkningar måste oxiddatan i form av viktprocent konverteras till aktivitetsvärden. Detta gjordes med hjälp av programmet AX. Ett minerals aktivitet är dess förmåga att reagera i den givna mineralogin.,vilket är ett resultat av mineralets egen och omgivande minerals kemiska sammansättning.

Eftersom mineralogin i prov 2 (se resultat) är otillräcklig för att utföra de påtänkta uträkningarna lades muskovit till i sammansättningen. Muskovit har observerats i fält på andra platser i samma stratigrafiska grupp prov 2 faller i. Bland annat finns det i prov 1, som är taget ca 500 meter ifrån prov 2, i samma lithologiska område. Detta gör att resultatet fortfarande är representativt för området. Eftersom EMPA analysen inte tar fram några värden för trevärdigt järn har värdet 0 använts i alla beräkningar. Detta är ett rimligt antagande eftersom mineralen i de utvalda bergarterna ej bör innehålla trevärdigt järn baserat på deras mineralsammansättning..

Utöver de tidigare nämnda formlerna räknade THERMOCALC ut möjliga reaktioner mellan de mineral som finns i prov tre. Dessa plottades mellan temperatur och XCO_2, vilket gör det möjligt att läsa av XCO_2-halten vid en känd temperatur. XCO_2-värdet är den halt av koldioxid som fluiden haft under metamorfosen. Detta är intressant eftersom det ger en ledtråd om vad för slags metamorfa reaktioner som varit aktiva och hur mycket vatten eller andra fluider som tillförts systemet utifrån (Nabelek 2007). För att räkna ut temperaturen i karbonatprovet användes Anovitz och Essenses kalcit-dolomit geotermometer (Anovitz & Essense 1987) enligt:

$$T = -2360X\frac{Kalcit}{MgCO3} - \left(\frac{0.01345}{X\frac{kalcit}{MgCO3}}\right)^2 + 2620\left(X\frac{Kalcit}{MgCO3}\right)^2 + 2608\left(X\frac{Kalcit}{MgCO3}\right)^{0.5} + 334$$

Formel 1: Anovitz & Essenses geotermometer för samexisterande kalcit och dolomit.

Där T är temperaturen i Kelvin och X är molproportionen magnesium genom den av magnesium och kalcium adderat i en kalcitkristall. Detta förutsatt att kristallen ligger i direkt kontakt med dolomit. Detta värde representerar utbytet av magnesium mellan kalcit och dolomit. (Se fullständig uträkning i appendix B)

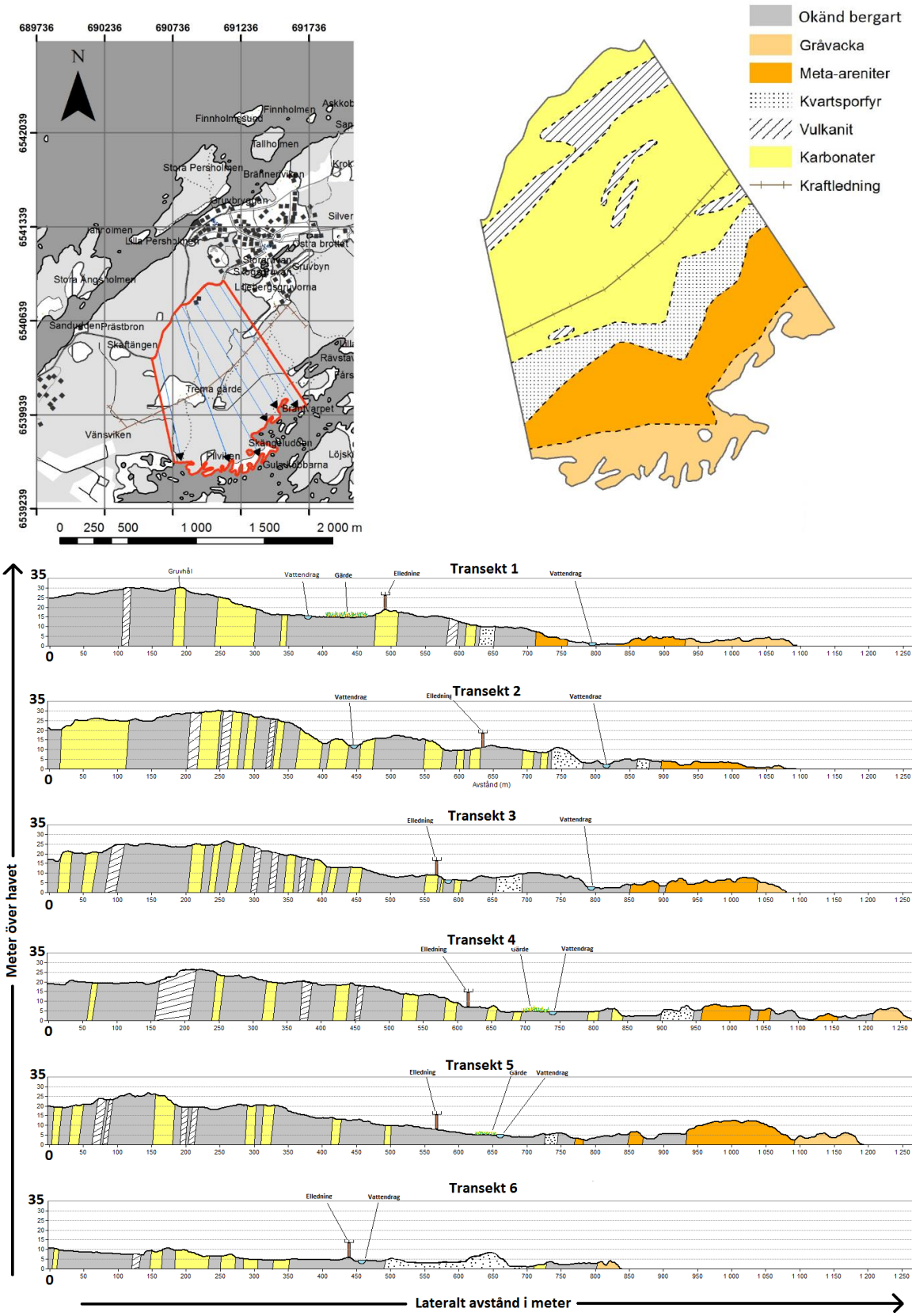
Flera mineralkorn av samma sort har analyserats i studien för att göra undersökningen mer kvantitativ. Vissa korn har dock uteslutits då deras oxidvärden ej bedömts vara representativa.

Resultat

Berggrundskarta

Det karterade området på utö kan delas in i tre större lithologiska grupper. Shelfsediment, kvartsporfyr och karbonater. Gränserna mellan de olika zonerna är mycket svåra att placera, då stora delar av berggrunden är beväxt och övergångarna sällan är skarpa. Många gånger utgörs bergarternas kontakter av gradvisa övergångar, eller av zoner där båda bergarterna ligger bandade tillsammans. I sådana fall har tolkningar och antaganden krävts. Streckade linjer i kartan (*Figur 2*) innebär således en kontakt med mindre än tio meters träffsäkerhet.

Transekterna som visas är illustrerade i figur 3 visar de mätdata som använts för att ta fram den färdiga berggrundskartan. På grund av beväxt mark har inte hela transekterna kunnat analyseras, utan endast stickprover längs med dem, där berget går i dagen. Berggrund markerad med grå färg



Figur 2 visar det utvalda områdets geologi. Den röda inramningen visar områdets gräns.Pilarna illustrerar de 6 transekterna som representeras nederst i bilden. dessa ligger i numrär ordning, med transekt 6 i öst och transekt 1 i väst.

har ej kunnat undersökas och är därför okänd. Alla illustrerade lager i transekterna visas med en stupning på nära 90 grader i nordlig riktning. Detta är i många fall ett antagande då strukturella mätningar inte alltid varit möjliga att genomföra. I de fall mätningar kunnat utföras har dock en liknande strykning o ch stupning observerats.

Lithologisk beskrivning

Shelfrelaterade metasediment

Från kusten i söder sträcker sig ett område utgjort av metasediment ca 400 meter norrut. Närmast vattnet finns gott om glacialslipade turbidithällar med synliga mineral såsom andalusit, granat, biotit och muskovit. Deformationen i de ungefär 15cm tjocka lagren är mycket stor. Detta gör att stratigrafiskt upp är svårt att bestämma, eftersom de indikatorer (korsskiktning, siktade lager och flammstrukturer) som finns ofta har veckats så att de pekar åt olika håll.

Cirka 100 meter från kusten blir bergarten mer massiv och innehåller mindre mängd glimmer. Troligtvis är detta grövre metamorfoserade, mer kustnära avsatta sediment. Veckningen försvinner med lermineralen och lagringen har en generell strykning på 230° och en stupning på nära 90°.

Kvartsporfyr

Strukturellt ovanför shelf-sedimenten ligger ett tunt lager (150 meter som mest) porfyrisk vulkanit med felsisk sammansättning. Denna uppvisar en mikrokristallin matrix med strökorn av kvarts och ibland fältspat. Kvartskornen är 4mm som störst medan vissa kalifälstpatkristaller är så stora som 2cm. Den innehåller även ofta glimmermineral, främst biotit, vilket gör att den ibland kan misstas för en gråvacka. Glimmerlagren är här dock inte lika sammanhängande och tydligt bandade som i gråvackan.

Det är svårt att avgöra om denna bergart är en extrusiv ignimbrit eller om den intruderat på en mycket grund nivå. Inga skarpa kontakter till bergarten observerades under karteringen. Talbot argumenterar för det senare med stöd från xenoliter av sedimenten under och föreslår att dessa skulle ha slitits med när bergarten intruderat (Talbot, 2008). Det är dock möjligt även för ett pyroklasiskt flöde med tillräcklig styrka att riva upp det underliggande berget i sin framfart. Inga slutsatser om denna bergarts härkomst kommer därför att dras i denna rapport.

Karbonatregionen

Den största delen av karteringsområdet och norra Utö i stort utgörs av karbonater med varierande grad av renhet. De renaste marmorpartierna utgörs nästan helt av kalcit och dolomit och har en brun-orange karbonatkarakteristisk vittringsyta. Ibland innehåller de centimeterstora svarta eller mörkgröna tremolitkristaller och på vissa platser även biotit. Dessa lagras tillsammans med tunt bandade felsiska vulkaniter som sällan utgör mer än 50 meter tjocka stratigrafier. I kontakten mellan dessa renare karbonater och vulkaniter finns ofta tunna lager (upp till 50cm) av så kallad strålsten som nästan helt består av tremolit. Mindre skarnbildningar förekommer i hela området, bland annat nära de gamla gruvhålen i transekt 1 (figur2). Dessa bergarter kan ibland vara mycket lika de mörka vulkaniterna men skiljer sig med sin grönaktiga färg och relativa mjukhet. Mineraliseringar, som pyrit och magnetit finns på vissa platser, vilket är tydligast kring gruvhålen där kompassen ger utslag på

dem. Den svagt gröna färgen i skarnbildningarna kommer troligtvis från grön amfibol, såsom tremolit.

En generell trend med renare och mer utbrett karbonatberg i områdets mitt (ca 400 meter från vägen i norr som avgränsar karteringsområdet) och mer silisiklastiskt material strukturellt under och ovanför detta parti fastställdes under undersökningen. Om detta har att göra med variationer i den vulkaniska aktiviteten jämfört med över- och underliggande lager eller häftigare sedimentation av karbonater är osäkert.

I och med att bergarterna är så pass varierade är inte den bergart som visas i transekterna och karttolkningen nödvändigtvis fullkomligt genomgående, utan indikerar mer vilken bergart som är mest representativ och dominerar till störst grad. Karbonatregioner innehåller med andra ord ofta vulkaniter och tvärt om. Hällar med över 50% karbonater räknades in i karbonatregionen.

Provresultat

Målet med provtagningen var att kunna utföra tryck- och temperaturberäkningar med hjälp av mikrosond data från, (GARB och GASP) samt temperatur-XCO_2 beräkningar ur kalcit-dolomitförhållanden. Ett prov med synliga granater (prov 2) och ett prov med så mycket karbonater som möjligt (prov 3) valdes därför ut. Vidare togs ett prov med synlig andalusit, (prov 1) främst för att undersöka reaktionstexturer och bekräfta att det verkligen var andalusit, vilket ger en ledtråd om tryck och temperaturförhållandena i området. Provplatserna är belägna minst 500 meter från varandra för att ge en bredare, mer generell analys och tolkning av området.

Prov 1:

Det första provet är taget från ett lerigt parti av gråvackan vid Skängeludden. (Koordinater: öst-väst 691 431, nord-syd 6539 712(SWEREF99TM).) Grundmassan består mestadels av muskovit, i tydliga stråk, men även kvarts och en del biotit. Stora missfärgade, deformerade korn av andalusit observerades i fält, varav de flesta visade sig vara helt seriticerade i tunnslipsmikroskop. De som inte ännu var helt omvandlade hade stora kvartsinklusioner och var kraftigt subhedrala. Ingen EMPA undersökning genomfördes på detta prov.

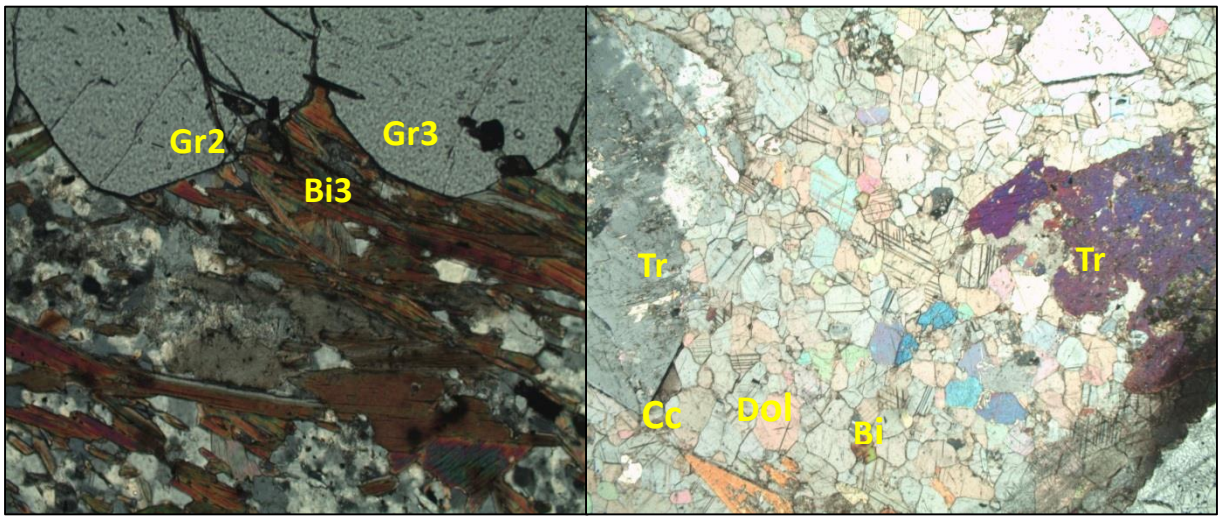
Prov 2:

Det andra provet är även det från ett lerigt parti i gråvackan. Den här gången från en klippvägg som vetter mot kusten, vid slutet av stigen som löper söder ut från Trema gärde. (Koordinater: öst-väst 690 828, nord-syd 6539 598(SWEREF99TM).) Grundmassan i detta prov utgörs av kvarts och biotit. Provet innehåller även enstaka kloritkorn, ortoklas och stora granater som sitter i ett och samma kluster. Dessa är subhedrala, har få tunna sprickor och en del inklusioner fyllda med kvarts, biotit, och opaka mineral som troligtvis är rutil. Mikrosondvärden för detta prov visas i tabell 1.

Prov 3

Prov 3 är taget från en karbonatrik häll ca 150 meter norr om elledningen i transekt 3. Platsen känns lätt igen eftersom grävlingar har grävt ett gryt i sprickbildningar och under rasblock. (Koordinater: öst-väst 691 146, nord-syd 6540 357(SWEREF99TM).) Bergets yta uppvisar en brun-orange ton men är alldeles vit och full med karbonatmineral. Stora tremolitporfyrer syns såväl på ytan som i brott. I tunnslipsmikroskopet syns den karakteristiska 120° vinkeln mellan karbonaterna. många av tremoliterna visade sig ha brutits delvis ned för att bilda muskovit, och det fanns enstaka biotitkorn.

Provet reagerade inte nämnvärt på saltsyra, vilket betyder att grundmassan utgörs mestadels av dolomit och inte kalcit. EMPA värden visade dock att ett få antal karbonatmineral faktist var kalcit. värden finns redovisade i tabell 2.



Figur 3: Fotografier från tunnslip av prov 2 (vänster) och 3 (höger). Observera att skalan på bilderna ej överensstämmer.

Mikrosonddata

Eftersom målet med mikrosondsanalyserna var att fastställa möjliga reaktioner för att på så vis räkna ut tryck, temperatur och XCO_2, analyserades främst kristallpar där dessa reaktioner kan tänkas ha skett. Oxiddatan för granat och biotit är tagna från två olika granatkristaller från ett kluster, båda i kontakt med biotit 3 (prov 2). Biotit 5 och granat 5 är ytterliggare ett exempel på en liknande kontakt. Det enda kloritkornet som upptäcktes i tunnslipen låg desvärre inte i kontakt med något granat-biotitpar. Tre mätningar bedömdes missvisande, då deras totala viktprocent var mycket lägre än den hos de kristaller som valdes ut för beräkningarna.

I prov tre var intresset för kalcit-dolomitpar störst, eftersom oxiddata från dessa används i Anovitz & Essenses geothermometer (Formel 1). I de tre kalcitkristaller som analyserades varierade magnesiumvärdet kraftigt. Alla kristaller låg i kontakt med dolomit. Kalcit ett och två låg även i kontakt med tremolit.

Prov 2	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O
Klorit 1	25,87	0,1661	21,61	0,021	24,61	0,1375	15,35	0,0916	0	0,0461
Klorit 2	25,24	0,1301	21,6	0,0421	24,31	0,0845	15,94	0	0,1826	0,0513
Granat 1*	27,84	0,2211	15,52	0,0361	33,58	3,36	2,23	1,95	0	0
Granat 2	37,12	0,2832	21,35	0,0104	33,58	3,93	2,75	2,14	0	0
Granat 3	36,53	0,1086	21,67	0,0207	33,86	4,5	2,4	2,33	0,013	0,0363
Granat 4*	27,41	0,0094	16,08	0,0162	31,8	3,64	2,7	2,04	0,0279	0,0112
Granat 5	37,24	0,0433	21,6	0	33,87	4,06	2,81	2,23	0,0175	0,0213
Biotit 1	35,51	1,6476	17,35	0,0285	20,1	0,1128	11,09	0,0134	0,1672	8,79
Biotit 2*	0,2237	99,46	0,2058	0,0745	1,112	0,104	0	0,0962	0,0269	0,0041
Biotit 3	35,61	1,3933	17,8	0,0484	19,79	0,1081	11,43	0,057	0,4695	7,93
Biotit 4	35,37	1,4586	17,76	0,0416	20,28	0,1302	11,42	0,0686	0,3595	8,18

Tabell 1: Oxidvärden för provtagning från gråvackan. Data markerad med en stjärna har dömts som missvisande och har därför inte använts i några beräkningar.

Prov 3	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O
Kalcit 1	0,0167	0	0,0102	0	0,0224	0,1629	0,2127	56,12	0,0172	0,0113
Kalcit 2	0,0004	0	0,0019	0,0024	0,0935	0,1379	0,21	58,32	0,0303	0
Kalcit 3	0,0333	0	0,0006	0	0,0364	0,574	0,6302	55,73	0	0,0093
Dolomit 1	0,0135	0	0,0102	0,0189	3,53	0,6506	19,16	29,29	0,0596	0
Dolomit 2	0,0043	0	0,006	0,0285	3,26	0,6937	18,77	29,78	0,0226	0
Dolomit 3*	0,0025	0	0	0	3,4	0,672	19,46	29,37	0	0
Biotit 1	37,34	0,7949	14,6	0,0323	10,35	0,0834	18,48	0,0487	0,1465	9,22
Biotit 2	38,05	0,7595	15,29	0,0046	10,68	0,1231	19,07	0,0216	0,1694	9,15
Biotit 3	37,74	0,5598	14,61	0	11,07	0,1007	18,55	0,1284	0,1123	9,06
Biotit 4	38,11	0,598	14,81	0,0393	11,37	0,0803	18,66	0,1264	0,1141	9,29
Tremolit 1	55,15	0,0451	2,11	0,0119	4,85	0,1631	20,78	13,1	0,2326	0,0535
Tremolit 2	55,43	0,0544	2,34	0,0024	4,9	0,2949	21,02	13,07	0,2734	0,0552
Tremolit 3	53,98	0,0654	3,48	0,0047	5,24	0,2355	20,07	13,09	0,4796	0,1152
Tremolit 4	54,81	0,0537	3,07	0	4,92	0,2048	20,61	13,09	0,4129	0,0462
Tremolit 5	54,65	0,0488	2,18	0,0716	4,53	0,2586	21,14	13,16	0,2867	0,0757

Tabell 2: Oxidvärden för provtagning från karbonatzonen. Data markerad med en stjärna har dömts som missvisande och har därför inte använts i några beräkningar.

Tryck, temperatur och XCO_2

Aktivitetsvärdena från prov två användes THERMOCALC till funktionen ”average P-T conditions”. THERMOCALC fann fyra lämpliga reaktioner från vilka tryck och temperatur kunde beräknas. Dessa värden finns representerade i tabell 3. På grund av fattig mineralogi blev de funna reaktionerna otillräckliga, vilket resulterade i en hög standardavvikelse. Tre sepparata beräkningar av tryck och temperatur gjordes med olika mineralkorn från prov 2. En fullständig log för THERMOCALC processen finns i appendix A.

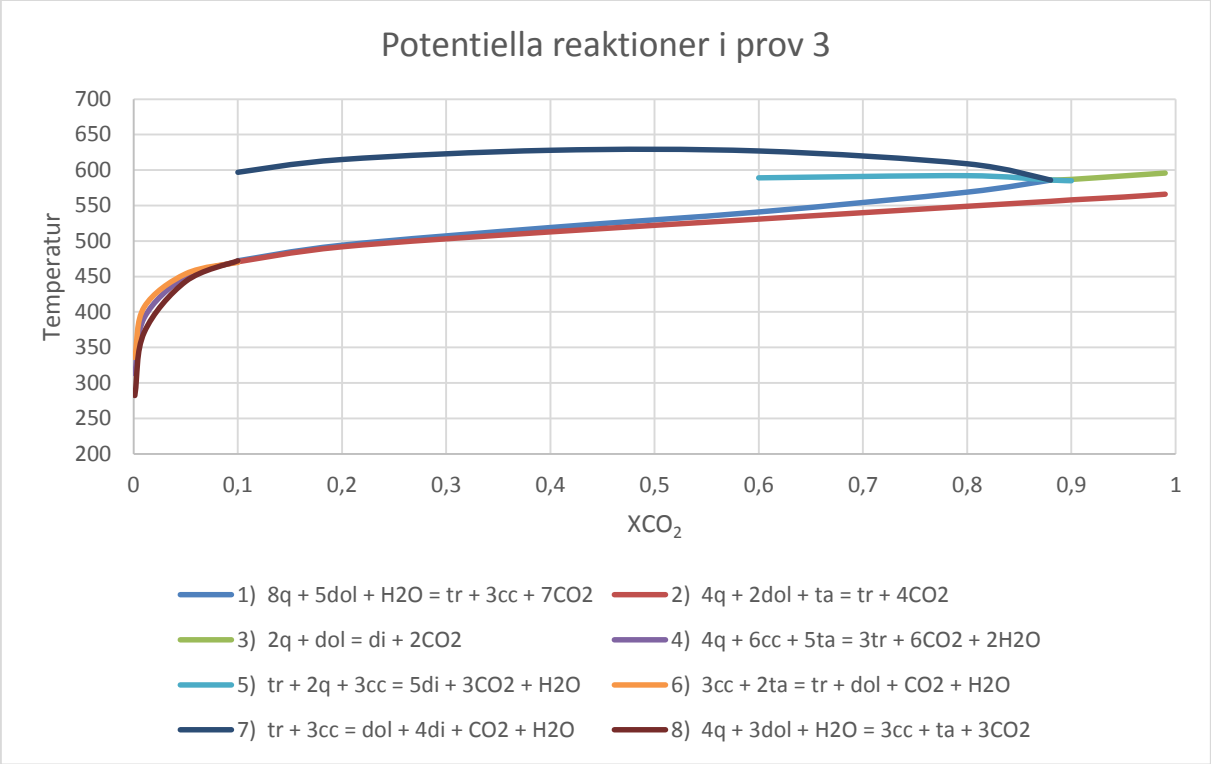
EMPA data	Temperatur (C°)	T σ	Tryck (Kbar)	P σ
Gr2, Bi3, Kl2	525	95	4.5	2.3
Gr3, Bi3, Kl2	536	96	5.3	2.3
Gr5, Bt5, Kl1	589	108	6.1	2.5

Tabell 3: Uträcknade värden för tryck och temperatur från GARB och GASP, där σ är standardavvikelsen.

För att ta reda på koldioxidhalten i den fluid som verkat i prov 3 plottades möjliga reaktioner med hjälp av THERMOCALC. Deras stabilitetfält kartlades för temperatur och XCO_2, vilket gör det möjligt att med en känd temperatur läsa av ett XCO_2-värde. Möjliga reaktionskurvor och deras stabilitet redovisas i figur 6 och är uträknade vid tryckförhållandet 4.5. Detta värde är från resultaten av tryckberäkningarna i prov 2 (Tabell 3). Motiveringen till varför det lägsta tryckvärdet användes är eftersom att andalusit (som påträffats i prov 1) är stabil vid lägre tryck, och att det lägsta värdet därför borde vara mer korrekt och representativt. Temperaturen som användes för att ta fram XCO_2-värdet beräknades enligt Anovitz & Essanse (Formel 1) och redovisas i tabell 4. Den fullständiga temperatur-beräkningen, med ut- och invärden finns i appendix b. Log för THERMOCALC processen finns i appendix A.

EMPA data	MgO	CaO	T
Kalcit 1	0,2127	56,12	231
Kalcit 2	0,21	58,32	226
Kalcit 3	0,6302	55,73	350

Tabell 4: Uträcknade värden för temperatur och XCO_2. Temperaturen räknades ut enligt Anovitz & Essanse och XCO_2-värdet är avläst från reaktion X i figur X



Figur 4: Möjliga reaktioner i karbonatprovet vid trycket 4.5 Kbar. Där q=kvarts, dol=dolomit, tr=tremolit, cc=kalcit, di=diopsid, ta=talk, H2O är vatten och CO2 är koldioxid. Metastabila reaktioner har för enkelhetens skull räknats bort.

THERMOCALC lyckades räkna ut 8 möjliga reaktioner med sammansättningen tremolit, kvarts, dolomit, kalcit, vatten, koldioxid, talk samt diopsid (figur 6). Vad som bör nämnas är att AX inte lyckades beräkna några aktivitetsvärden för några av mineralen. Aktivitetsvärdet 1 har därför använts för alla mineral i dessa beräkningar. Talk och diopsid lades även till för att bättre kunna kartlägga stabiliteten hos de reaktioner som innefattar de faktiska mineralen.

Eftersom den högsta beräknade temperaturen inräknat standardavvikelse överskrider 625°C, och den lägst uppmätta är så låg som 350 är det svårt att fastställa ett XCO_2 värde. Mineralogin i provet talar dock för att främst reaktion 1 och 6 varit aktiva, då dessa är de enda reaktioner som innefattar alla de mineral som observerats i tunnslip.

Felkällor

Eftersom kartegringen genomfördes då snö och is fortfarande låg tät i skogarna på Utö kan en del hällar och därför viktig data ha undgått observation. Stora delar av det valda området var dessutom beväxta och omöjliga att undersöka. Vissa partier är så finkorniga att de behövts undersökas i mikroskop för att säkerställa deras kategorisering. Den tunna varierade bandningen i karbonatregionen medför även den källa till osäkerhet i karttolkningen.

Konstruktionen av fasdiagram i THERMOCALC utgår från att berget befunnit sig i jämvikt. Detta behöver inte nödvändigtvis vara fallet för proven i undersökningen.

Bristfällig mineralogi i prov nr 2 gjorde att tryckuträkningarnas tillförlitlighet blev ifrågasättbar. Potentiella reaktioner var otillräckliga för att säkert fastställa ett tryck såväl som en temperatur. Detta ledde till resultat med en hög standardavvikelse. För bättre tryckberäkningar av området bör fler granatprover analyseras. Denna felkälla fortplantar sig även i andra beräkningarna som gjorts, där trycket varit ett inputvärde. Karbonatprovets XCO2värde, som deriverades från reaktionskurvor, plottade vid trycket från beräkningar av prov 2 skadas således av dessa osäkerheter.

Alla granater hade höga pyrophalter (HAT-värden), vilket kan ha påverkat uträkningarna negativt. Ett HAT-värde är kortfattat ett mått på hur mycket varje observerat värde påverkar de extrapolerade värdena. Pyropkomponenten påverkade med andra ord uträkningarna till stor grad av okänd anledning. HAT-värden är representerade i THERMOCALC loggarna under appendix A.

Mer mikrosondsdata och oxidvärden skulle behövas för att göra uträkningarna i rapporten mer kvantitativa och träffsäkra. Det är svårt att säga om ett värde är representativt om man inte har kvantitativ data att jämnföra med.

Diskussion

Resultatet av karteringen överensstämmer till stor grad med tidigare undersökningar av berggrunden och passar in i den accepterade teorin rörande öns geologiska utveckling. Vulkaniternas förekomst ökar i områdets sena stratigrafi enligt observationer. Detta kan vara ett resultat av att utbrotten intensifierade, att plattrörelser förde Utö närmare utbrottens källa eller en kombination av båda alternativen. Denna fråga bör kunna besvaras genom modellering och jämförelser med övriga Bergslagen. Det bör även gå att kronologiskt korrelera den brist på utbrott, som områdets mitt, med de rena karbonaterna vittnar om, med övriga Berslagen.

Metamorfosen av bergarterna på Utö beskrivs i tidigare studier ha genomgått lågt tryck och relativt hög temperatur. Andalucit som påträffades i prov 1 stödjer denna tes, men vittnar även om att temperaturen ej varit tillräckligt hög för att omvandling till sillimanit ska ha skett. Granat, som är en typisk indikator för metamorfos i ”Amphibolite facies” kräver en temperatur på minst 400°C, vilket föresår att temperaturbestämningarna från karbonatprovet är felaktigt. Glimmermineralen indikerar även de en metamorfos i ”Amphibolite facies”, då klorit i stort sett är frånvarande och muskovit endast påträffades i det ena pelitprovet, medan biotit var mycket vanligt förekommande.

Temperaturberäkningarna från granatprovet rör sig även de i ”Amphibolite facies”, och varierar inte nämnvärt från varandra. Tryckberäkningarna, som krävde en mer omfattande mineralogi, varierar mycket, vilket gör att de är mindre pålitliga. Alla tryckvärden faller i kyanitfältet, givet en temperatur i grad av ”Amphibolite facies”, vilket ej överensstämmer med fältobservationer.

De varierande temperaturvärden som beräknades från kalcit-dolomit kristaller bör ej ses som representativa. Att de befinner sig utanför geothermometerns träffsäkerhet, att magnesiumhalten i kornen är högst varierande, samt att värdena skiljer sig drastiskt från resultaten i granatprovet är alla fakta som försvagar deras kredabilitet. En rimlig förklaring till detta skulle vara att reaktionerna i provet ej uppnått jämvikt. Alternativt kan detta vara ett temperaturvärde från den retrograda metamorfosen.

Kalcit 1 och 2 innehöll en mycket liten mängd magnesium i jämförelse till kalcit 3. Detta kan vara ett resultat av låg interaktion med kringliggande dolomit. Anledningen till varför detta skulle kunna ha skett är okänd. Möjligtvis har delar av kalcitens magnesium tagits upp av den närliggande tremoliten, eller att en tryckskugga från tremoliten påverkat partitioneringskoefficienten på ett vis så att magnesiumet stannat kvar i dolomiten till högre grad.

Många av de reaktionskurvor som plottades för karbonaten innefattar talk, som ej observerats i mikroskop. Talk är dock ofta på reaktantsidan, och försvinner således i samband med att temperaturen stiger. Avsaknaden av talk kan med andra ord vara en indikator för högre temperaturer.

Den höga standardavvikelsen i resultaten från temperaturberäkningarna gör det svårt att fastställa ett rimligt XCO_2-värde. Det går dock att spekulera kring en tidlinje som följer reaktion sex och ett (figur 5), eftersom dessa överensstämmer bäst med den mineralogi som observerats och dessutom båda rör sig inom det beräknade temperaturspannet.

Orsaken till att andalusit och granat inte är unisont utbredda i gråvackorna är okänd. Den lokala koncentrationen av de båda vid vardera provlokal (prov ett och två) leder tankarna till en metasomatisk förklaring. Inga vidare bevis för detta observerades dock. Tremolitförekomsten i karbonatregionen är även den ojämnt fördelad, vilket troligtvis har med både fluider och varierad interaktion med vulkaniter att göra.

Slutsats

Provområdets berggrund präglas av en utveckling från marint till mer kunstnära sediment med sporadiska vulkaniska händelser. Detta representeras av gråvackor i söder, övergående till grövre sediment, och till sist karbonatberg lagrat tillsammans med felsiska vulkaniter. Beräkningar av metamorfosen, som till stor del är fluidrelaterad, resulterade i temperaturer mellan 430 och 697°C samt trycket 4.5±2.3Kbar. Dessa resultat tillsamans med observationerna av indexmineral, såsom granat och andalucit fastställer en metamorfos av graden ”Amphibolite facies”. Koldioxidhalten i den fluid som verkat under metamorfosen är fortfarande okänd.

Referenser

Andersson, U.-B., Högdahl, K., Sjöström, H. & Bergman. S., 2006: Multistage growth and reworking of the Palaeoproterozoic crust in the Bergslagen area, southern Sweden: evidence from U–Pb geochronology. Geological Magazine 143, 679–697.

Anovitz, L.M., E.J. Essene, 1987: Equilibria in CaCO3-MgCO3-FeCO3. Journal of Petrology Vol. 28, Part 2, 389-414.

Allen, R.L., Lundström, I., Ripa, M., Simenov, A. & Christofferson, H., 1996:
Facies analysis of 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 91, 979–1008.

Ferry, J.M., Spear, F.S, 1978: Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. Contributions to Mineralogy and Petrology, 66, 113-117.

Gavelin, S., Lundström, I. & Norström, S., 1976: Svecofennian Stratigraphy on
Utö, Stockholm archipeligo. Sveriges Geologiska Undersökning C719, 1–44.

J. Mansfeld, 2012: The geology of Utö – excursion guide. Stockholms Universitet

John D. Winter, 2010: Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey

Koziol, Newton, 1988: Redetermination of the anorthite breakdown reaction and improvement of the plagioclase-8 gamet-AlrSiO, geobarometer. American Mineralogist, 73, 2, 6-223.

Lantmäteriets digitala databas för kartor: Terrängkartan. Hämtat (2013/05/05)

Lundström, I., Allen, R.L., Persson, P.-O. & Ripa, M., 1998: Stratigraphies and
depositional ages of Svecofennian Palaeoproterozoic metavolcanic rocks in E.
Svealand and Bergslagen, south central Sweden. GFF 120, 315–320.

Lundström, I., Koyi, H., 2003: Vulkanön som blev ett fritidsparadis – några glimtar från Utös allra tidigaste historia. Geologiskt forum 37, 4–13

Peter I. Nabelek, 2007: Fluid evolution and kinetics of metamorphic reactions in calc-silicate contact aureoles - From H2O to CO2 and back. Geology 2007; 35;927-930, doi: 10.1130/G24051A.1
2007

Powell, R., Holland, T.J.B., 2008: On thermobarometry, Journal of Metamorphic Geology, Volume 26, Issue 2, 155–179.
doi:10.1111/j.1525-1314.2007.00756.x

Stephens MB, Ripa M, Lundström I, Persson L, Bergman T, Ahl M, Wahlgren C-H, Persson P-H, Wickström L, 2009: Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. Sveriges Geologiska Undersökning Ba58, 259 p.

Talbot, C. J., 2008: Palaeoproterozoic crustal building in NE Utö, southern Svecofennides, Sweden. GFF 130, 49–70.

Appendix A

Prov 2

Körning 1

calcs use:

an INCOMPLETE independent set of reactions has been calculated

Activities and their uncertainties

	clin	daph	ames	phl	ann	east	py
a	0.0360	0.0153	0.0460	0.0450	0.0280	0.0590	0.00173
sd(a)/a	0.39392	0.50861	0.37023	0.37244	0.43640	0.34392	0.69689

	alm	q	H2O	mu
a	0.340	1.00	1.00	1.00
sd(a)/a	0.15000	0		0

¥¥INCOMPLETE¥¥ independent set of reactions

1) clin + east = ames + phl
2) 3clin + py + 2mu = 3ames + 2phl + 6q
3) 9clin + 6daph + 5py + 10mu = 15ames + 10ann + 30q
4) 12clin + 3daph + 5alm + 10mu = 15ames + 10ann + 30q

Calculations for the independent set of reactions
(for x(H2O) = 1.0)

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	11.3	12.18	-3.00	0.62	0.01045	-0.344	-0.026	0.741
2	2.0	4.57	-20.98	1.64	0.01712	2.371	0.893	1.916
3	4.9	3.56	-95.58	15.41	-0.00688	15.017	4.853	9.160
4	2.2	3.38	126.01	12.84	-0.03214	14.843	-24.118	8.667

Average PT (for x(H2O) = 1.0)

Single end-member diagnostic information

avP, avT, sd's, cor, fit are result of doubling the uncertainty on ln a :
a ln a suspect if any are v different from lsq values.
e* are ln a residuals normalised to ln a uncertainties :
large absolute values, say >2.5, point to suspect info.
hat are the diagonal elements of the hat matrix :
large values, say >0.40, point to influential data.
For 95% confidence, fit (= sd(fit)) < 1.73
however a larger value may be OK - look at the diagnostics!

	avP	sd	avT	sd	cor	fit
lsq	4.5	2.3	525	95	0.493	0.75

	P	sd(P)	T	sd(T)	cor	fit	e*	hat
clin	4.92	2.35	513	97	0.415	0.60	-0.55	0.16
daph	4.37	2.27	508	101	0.498	0.67	0.37	0.08
ames	4.73	2.39	527	95	0.485	0.73	0.24	0.09
phl	4.20	2.30	540	97	0.439	0.55	0.59	0.10
ann	4.33	2.28	534	97	0.458	0.65	-0.48	0.07
east	4.35	3.01	525	95	0.359	0.75	-0.05	0.57
py	4.61	3.28	532	174	0.793	0.75	-0.03	0.83
alm	4.50	2.26	524	100	0.469	0.75	-0.02	0.05
q	4.50	2.26	525	95	0.493	0.75	0	0
mu	4.50	2.26	525	95	0.493	0.75	0	0

T = 525¡C, sd = 95,
P = 4.5 kb

Körning 2

calcs use:

an INCOMPLETE independent set of reactions has been calculated

Activities and their uncertainties

	py	alm	clin	daph	ames	phl	ann
a	0.00220	0.390	0.0350	0.0149	0.0430	0.0470	0.0280
sd(a)/a	0.68112	0.15000	0.39650	0.51157	0.37696	0.36805	0.43640

	east	q	H2O	mu
a	0.0570	1.00	1.00	1.00
sd(a)/a	0.34770	0		0

¥¥INCOMPLETE¥¥ independent set of reactions
1) py + 3clin + 2mu = 3ames + 2phl + 6q
2) py + clin + 2mu = ames + 2east + 6q
3) py + ann = alm + phl
4) 6py + 3daph + 2mu = 5alm + 3ames + 2phl + 6q

Calculations for the independent set of reactions
(for x(H2O) = 1.0)

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	1.8	5.22	-22.51	1.64	0.01906	2.387	0.622	1.923
2	4.6	2.36	-16.53	1.07	-0.00184	3.077	0.596	1.117
3	8.5	20.60	-44.94	0.92	0.01390	-0.285	5.696	0.901
4	9.0	11.88	-242.57	5.70	0.04230	2.550	29.072	4.630

Average PT (for x(H2O) = 1.0)

Single end-member diagnostic information

avP, avT, sd's, cor, fit are result of doubling the uncertainty on ln a :
a ln a suspect if any are v different from lsq values.
e* are ln a residuals normalised to ln a uncertainties :
large absolute values, say >2.5, point to suspect info.
hat are the diagonal elements of the hat matrix :
large values, say >0.40, point to influential data.

For 95% confidence, fit (= sd(fit)) < 1.73
however a larger value may be OK - look at the diagnostics!

	avP	sd	avT	sd	cor	fit
lsq	5.3	2.3	536	96	0.505	0.77

	P	sd(P)	T	sd(T)	cor	fit	e*	hat
py	5.37	3.41	543	176	0.799	0.77	-0.03	0.82
alm	5.25	2.33	535	101	0.482	0.77	-0.02	0.05
clin	5.68	2.42	524	98	0.429	0.61	-0.56	0.16
daph	5.10	2.35	518	103	0.512	0.68	0.39	0.08
ames	5.50	2.47	538	96	0.497	0.74	0.25	0.09
phl	4.95	2.37	552	98	0.450	0.56	0.60	0.10
ann	5.08	2.35	546	98	0.469	0.66	-0.49	0.08
east	5.11	3.11	536	96	0.369	0.77	-0.05	0.57
q	5.25	2.33	536	96	0.505	0.77	0	0
mu	5.25	2.33	536	96	0.505	0.77	0	0

T = 536¡C, sd = 96,
P = 5.3 kbars, sd = 2.3, cor = 0.50

Körning 3

calcs use:

an INCOMPLETE independent set of reactions has been calculated

Activities and their uncertainties

	clin	daph	ames	py	alm	phl	ann
a	0.0330	0.0200	0.0330	0.00240	0.350	0.0460	0.0300
sd(a)/a	0.40181	0.47772	0.40181	0.67514	0.15000	0.37023	0.42759

	east	q	H2O	mu
a	0.0550	1.00	1.00	1.00
sd(a)/a	0.35158	0		0

¥¥INCOMPLETE¥¥ independent set of reactions
1) clin + east = ames + phl
2) 3clin + py + 2mu = 3ames + 2phl + 6q
3) 9clin + 6daph + 5py + 10mu = 15ames + 10ann + 30q
4) 12clin + 3daph + 5alm + 10mu = 15ames + 10ann + 30q

Calculations for the independent set of reactions
(for x(H2O) = 1.0)

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	8.8	12.55	-3.00	0.62	0.01045	-0.344	-0.179	0.764
2	4.3	4.72	-20.98	1.64	0.01712	2.371	-0.126	1.977
3	7.4	3.63	-95.58	15.41	-0.00688	15.017	-1.899	9.343
4	3.7	3.49	126.01	12.84	-0.03214	14.843	-28.314	8.971

Average PT (for x(H2O) = 1.0)

Single end-member diagnostic information

avP, avT, sd's, cor, fit are result of doubling the uncertainty on ln a :

a ln a suspect if any are v different from lsq values.
e* are ln a residuals normalised to ln a uncertainties :
large absolute values, say >2.5, point to suspect info.
hat are the diagonal elements of the hat matrix :
large values, say >0.40, point to influential data.
For 95% confidence, fit (= sd(fit)) < 1.73
however a larger value may be OK - look at the diagnostics!

	avP	sd	avT	sd	cor	fit
lsq	6.1	2.5	589	108	0.523	0.85

	P	sd(P)	T	sd(T)	cor	fit	e*	hat
clin	6.48	2.63	577	110	0.449	0.76	-0.46	0.15
daph	5.90	2.57	562	115	0.531	0.70	0.51	0.07
ames	6.16	2.70	589	108	0.515	0.85	0.03	0.10
py	6.29	3.76	599	198	0.810	0.85	-0.03	0.82
alm	6.12	2.55	588	114	0.502	0.85	-0.02	0.05
phl	5.80	2.58	606	111	0.468	0.68	0.59	0.10
ann	5.87	2.56	604	110	0.491	0.63	-0.71	0.07
east	6.55	3.38	588	108	0.381	0.84	0.14	0.58
q	6.12	2.55	589	108	0.523	0.85	0	0
mu	6.12	2.55	589	108	0.523	0.85	0	0

T = 589¡C, sd = 108,
P = 6.1 k

Prov 3

THERMOCALC running at 17.22 on Fri 31 May,2013
using
with axfile tc-calcbi.txt and scriptfile tc-calbival.txt

temperature-x(CO2) calculations

Unit activities except :

name	a	sd(ln a)
phl	0.0460	0.37023
east	0.0550	0.35158

excluded assemblages | ta di |

no of reactions = 8, no of intersections = 2

1) 8q + 5dol + H2O = tr + 3cc + 7CO2
2) 4q + 2dol + ta = tr + 4CO2
3) 2q + dol = di + 2CO2
4) 4q + 6cc + 5ta = 3tr + 6CO2 + 2H2O
5) tr + 2q + 3cc = 5di + 3CO2 + H2O
6) 3cc + 2ta = tr + dol + CO2 + H2O
7) tr + 3cc = dol + 4di + CO2 + H2O
8) 4q + 3dol + H2O = 3cc + ta + 3CO2

Thermodynamics of reactions (0 = a + bT + cP + RT ln K)
linearised at T = 455, P = 4.5, x(CO2) = 0.496

(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	372.526	1.91	-0.518310	15.79224	-4.231	0	
2	234.038	0.90	-0.322023	8.91512	-2.809	0	
3	121.086	0.44	-0.159043	4.22329	-1.404	0	
4	425.140	1.90	-0.573493	12.99113	-5.582	0	
5	232.903	0.92	-0.276905	5.32419	-2.791	0	
6	95.551	0.81	-0.125735	2.03800	-1.386	0	
7	111.817	0.80	-0.117862	1.10090	-1.386	0	
8	138.487	1.16	-0.196287	6.87712	-1.422	0	

Temperatures in the range 10 <-> 900¡C; for P = 4.5 kbar
uncertainties at or near x(CO2) = 0.4955

x(CO2)	0.001	0.01	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.95	0.99	sdT
1	292	378	445	472	494	519	541	569	589	605	635	3
2	299	382	447	471	492	513	531	549	558	562	566	2
3	313	400	467	493	516	539	559	578	587	592	596	2
4	313	392	450	471	488	502	512	514	508	497	468	3
5	358	445	510	536	558	577	589	592	585	573	540	3
6	336	407	454	470	482	489	489	475	453	429	372	6
7	434	514	574	597	615	628	627	609	581	552	484	6
8	282	371	443	472	498	528	560	608	650	692	797	5

T-x(CO2) of intersections : P = 4.5 kbar
window : T 10 <-> 900¡C; x(CO2) 0.001 <-> 0.99
in excess : CO2 H2O

¥ stable intersection 1 involving tr,q,dol,cc,ta + (CO2,H2O) or [phl,east,di]

		low T	high T	dx/dt
8)	4q + 3dol + H2O = 3cc + ta + 3CO2	[tr]	stable	0.00478
1)	8q + 5dol + H2O = tr + 3cc + 7CO2	[ta]	stable	0.00535
2)	4q + 2dol + ta = tr + 4CO2	[cc]	stable	0.00580
4)	4q + 6cc + 5ta = 3tr + 6CO2 + 2H2O	[dol]	stable	0.00689
6)	3cc + 2ta = tr + dol + CO2 + H2O	[q]	stable	0.00932

T = 468 ¡C , x(CO2) = 0.0908

¥ stable intersection 2 involving tr,q,dol,cc,di + (CO2,H2O) or [phl,east,ta]

		low T	high T	dx/dt
5)	tr + 2q + 3cc = 5di + 3CO2 + H2O	[dol]	stable	-0.0148
7)	tr + 3cc = dol + 4di + CO2 + H2O	[q]	stable	-0.00509
1)	8q + 5dol + H2O = tr + 3cc + 7CO2	[di]	stable	0.00846
3)	2q + dol = di + 2CO2	[tr,cc]	stable	0.0209

T = 586 ¡C , x(CO2) = 0.888

Appendix B

Kalcit-dolomit geothermometer.

2360*X-(0,01345/X)^2+2620*(X)^2+2608*(X)^0,5+334

Där X ges av MgO/(MgO+CaO). Observera att MgO och CaO i detta fall inte är Oxidvärden utan molproportion, dvs oxidvärdet delat med molvikten för varje molekyl.

Molvikt:

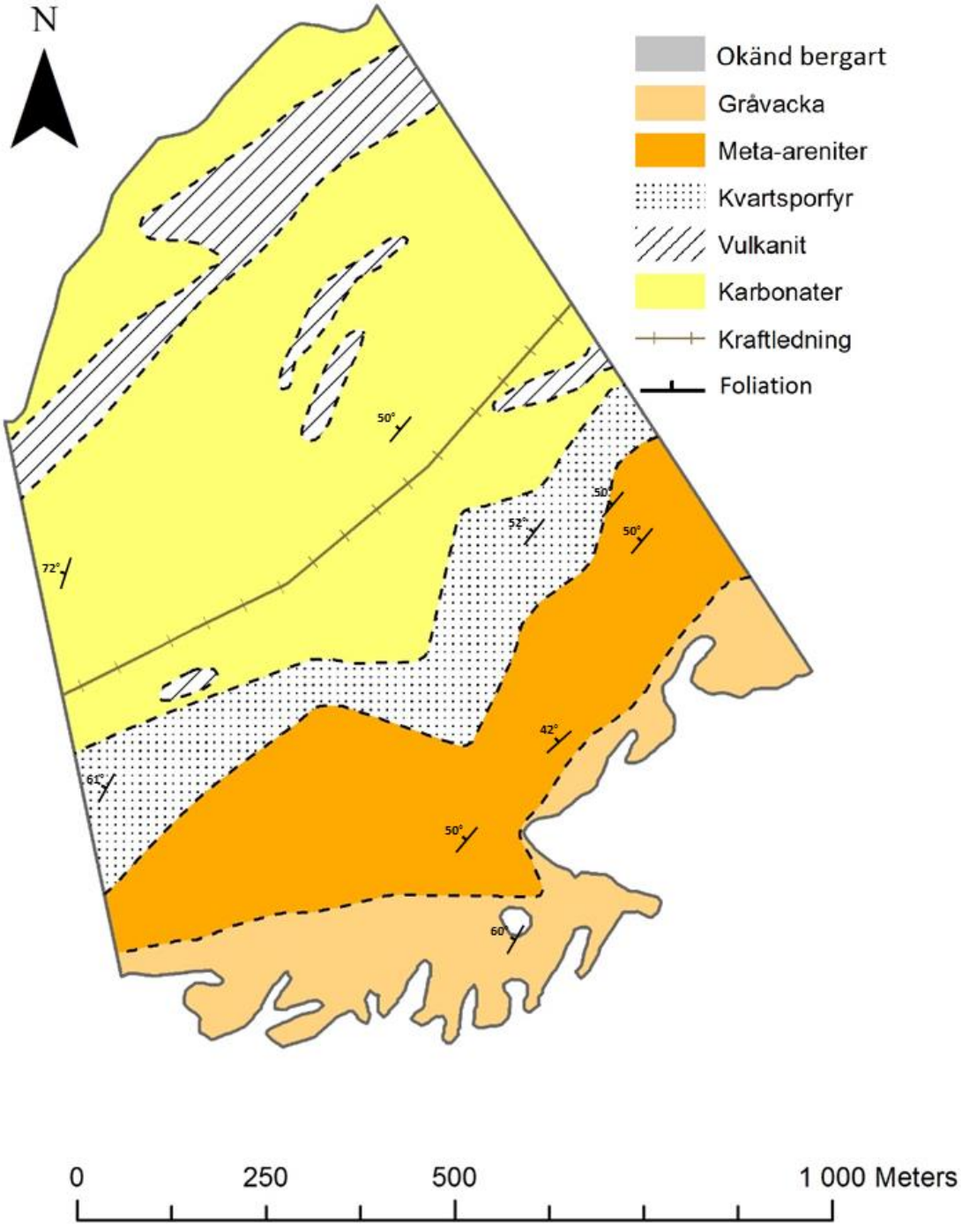
Mgo: 40.31

Cao: 56.08

Använda oxidvärden:

	MgO	CaO
Kalcit 1	0,2127	56,12
Kalcit 2	0,21	58,32
Kalcit 3	0,6302	55,73

Appendix C


N
Okänd bergart
Gråvacka
Meta-areniter
Kvartsporfyr
Vulkanit
Karbonater
Kraftledning
Foliation
50°
72°
52°
50°
42°
61°
50°
60°
0
250
500
1 000 Meters