



Stockholm  
University

# Bachelor Thesis

Degree Project in  
Geology 15 hp

## Tryck och temperatur vid metamorfos registrerad i metagråvackor på Utö

Josefin Linde



Stockholm 2013

Department of Geological Sciences  
Stockholm University  
SE-106 91 Stockholm

## Sammanfattning:

Detta är en kandidatuppsats inom projektet *Metamorphic map of Sweden*, ett projekt, finansierat av Sveriges geologiska undersökning (SGU) och lett av professor Alasdair Skelton vid Stockholms universitet, som strävar efter att uppnå mer kunskap om Sveriges metamorfa berggrund. Kartering genomfördes på ett 1 km<sup>2</sup> stort område under två veckor på nordöstra Utö i Stockholms södra skärgård där prover av en metapelit togs för vidare analys av den metamorfa graden. Analyser gjordes med electron microprobe vid Uppsala universitet och erhållet data användes sedan för att modellera tryck och temperaturförhållanden vid metamorfoseventet i THERMOCALC.

Det erhållna trycket varierar mellan 1,5- 6,7 kbar och temperaturen 437° till 695° i båda fallen med felmarginalen inräknad. Dessa resultat ger en metamorfgrad i amfibolitfacies och en liten bit in i hornfäls- samt granulitfacies.

Närmare studier gjordes även av ett lager till störst del bestående av biotit och granat som går genom ett metapsammitlager i en gråvacka, mellan biotit- granatlagret och omgivande bergart finns ett ljus band. Efter genomförd XRF analys fastlås att detta ljusa band är en så kallad selvage som bildats då fluider rört sig från biotit-granatbandet ut i omgivande bergart.

## Innehåll:

### 1 Inledning

### 2 Bakgrund

#### 2.1 Bildningsmiljö

##### 2.1.1 Sedimentation och vulkanisk aktivitet

##### 2.1.2 Metamorfose

#### 2.2 Bergarter

##### 2.2.1 Karbonatbergarter

##### 2.2.2 Metavulkaniter och flinta

##### 2.2.3 Metaryolit

##### 2.2.4 Metagråvacka

##### 2.2.5 Pegmatiter

##### 2.2.6 Malm

### 3 Syfte

### 4 Metod

#### 4.1 Kartering och kartritning

#### 4.2 Provtagning och förberedning av prover

#### 4.3 Petrografisk analys

#### 4.4 X-ray Fluorescence analys (XRF)

#### 4.5 Electron Microprobe analys

#### 4.6 Geotermobarometri

##### 4.6.1 Mineralzonering

#### 4.7 Thermocalc och AX

### 5 Resultat

#### 5.1 Kartering

##### 5.1.1 Bergarter

###### 5.1.1.1 Metagråvacka

###### 5.1.1.2 Metaryolit

###### 5.1.1.3 Skarn

###### 5.1.1.4 Metavulkanit

#### 5.2 Prover för vidare analys

#### 5.3 Petrografisk analys

#### 5.4 Electron Microprobe analys

#### 5.5 THERMOCALC och AX

#### 5.6 XRF analys

### 6 Diskussion

#### 6.1 EMP analys samt modellering i AX och THERMOCALC

#### 6.2 XRF analys

#### 6.3 Kartering

### 7 Slutsats

### 8 Tack

### 9 Referenser

### 10 Bilagor

#### A Glödnings förlust

#### B XRF

#### C EMPA

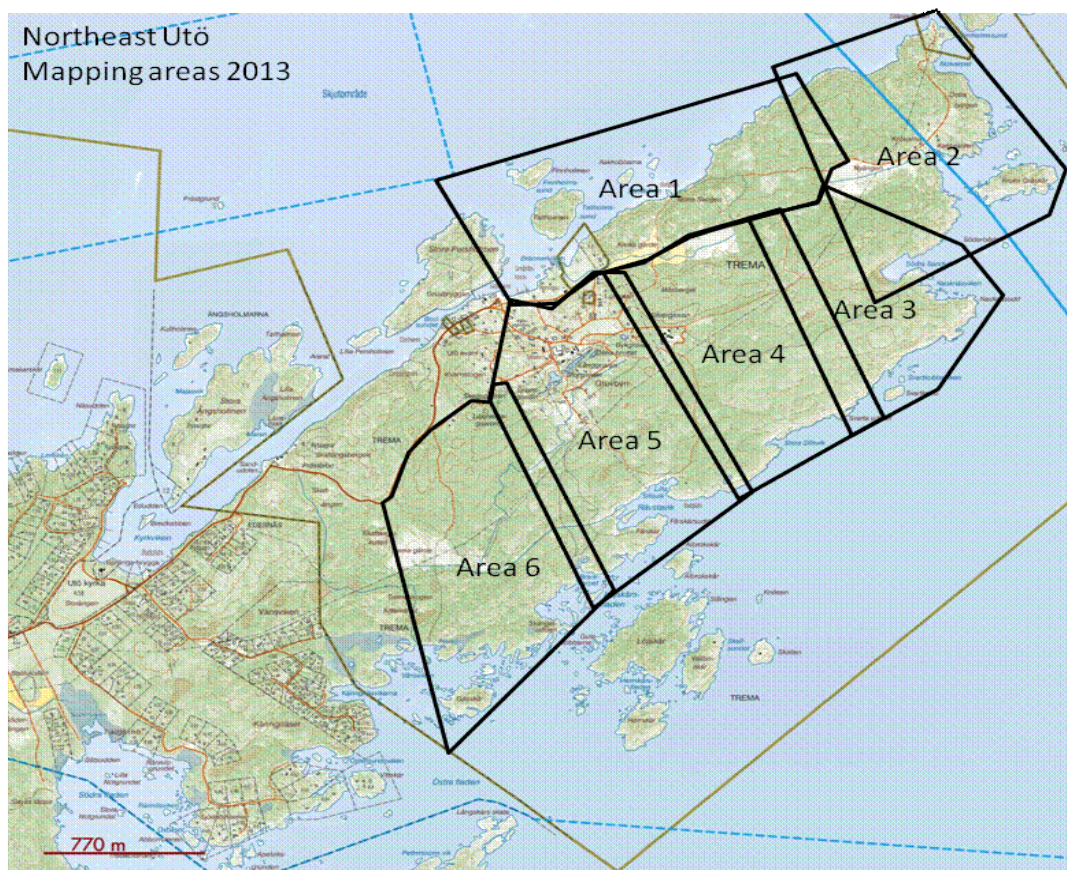
#### D AX

#### E THERMOCALC

# 1 Inledning

Denna kandidatuppsats är en del av projektet *Metamorphic map of Sweden* (<http://tellus.geo.su.se/mms/>), ett projekt finansierat av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). Den svenska kartan över metamorf berggrund bygger på tidigare arbete av Asch (2005) och har målsättningen att kartlägga maximala tryck- och temperaturförhållanden som bildat Sveriges metamorfa berggrund. I denna kandidatuppsats undersöks ett område på 1 km<sup>2</sup> på Utö, area 3 i karta 1, med professor Alasdair Skelton och dr Joakim Mansfeld som handledare.

Utö är en ö i Stockholms södra skärgård, i sydöstra kanten av berggrundprovinzen Bergslagen. Mest känd har denna ö blivit för sina malmförekomster av järn, zink, bly samt silver som bröts fram till mitten av 1800-talet (Wik et al 2005). Utö har också blivit en historisk plats då ett flertal mineral samt grundämnet litium upptäckts där. På grund av dess sällsynta mineralförekomster och malmer har denna ö under lång tid studerats och kartlagts av geologer.



Karta 1: Karta över Utö som visar de områden som karterades under samma period. I denna uppsats har område 3 undersökts.

## 2 Bakgrund

### 2.1 Bildningsmiljö

#### 2.1.1 Sedimentation och vulkanisk aktivitet

Bergslagens berggrund består främst av metasediment och metavulkaniter som länge studerats för att skapa en uppfattning av dess bildningsmiljö. Största delen av de metamorfa bergarter som nu utgör Bergslagens berggrund avsattes som sediment och vulkaniskt material i ett grunt hav, de kan delas in i tre olika avlagringsstadier.

Det första stadiet var extension av felsisk, arkeisk berggrund som idag finns under västra Bergslagen men som under paleoproterozoisk tid (2,1- 1,8) var en liten landmassa belägen strax söder om ekvatorn (Andersson et al, 2006, Talbot, 2008). Enligt Allen et al (1996) representerade extensionen den bassäng som ofta bildas bakom en öbåge (back arc basin). 1,86 Ga inleddes det andra stadiet i form av påbörjad subduktion i nordlig riktning i östra Bergslagen (Talbot, 2008) vilket kan ses bland annat i att de vulkaniska bergarterna i de östra delarna är mer intermediära vid denna tid än i de västra (Allen et al, 1996). I och med subduktionen ökade den magmatiska aktiviteten i området och ett öbågekomplex bildades där det som skulle komma att bli Utö började bildas i form av en vulkanö. Vulkanisk aska och sten fragment i olika storlekar från explosiva vulkanutbrott ansamlades på flankerna och runt vulkanöarna. Vesikulär pimpsten återfinns på flera platser runt om i regionen och indikerar ett lågt vattentryck och därmed att den vulkaniska aktiviteten skett på låga vattendjup (Allen et al, 1996). Tjocka karbonatrev byggdes upp i det grunda havet och varvades med aska från vulkanutbrotten. Det har diskuterats vad karbonatbergarterna som återfinns på Utö har för ursprung då de är helt omkristalliserade och inga ledtrådar om dess ursprung finns kvar men då stromatoliter identifierats i karbonatbergarter runt om i bergslagen är det mest troliga att även de på Utö kommer från stromatoliter (Mansfeld, 2012). Subduktionen avslutades då landmassa kom in i subduktionssystemet och gick därmed över i kollision och Svecofenniska Orogenesen påbörjades vilket ledde till deformation och metamorfos. När bergskedjan kollapsade bildades det transskandinaviska magmatiska bältet 1850-1650 (Andersson et al, 2006) söder samt väster om Bergslagen men kollapsen syns också i Bergslagen i form av intrusioner av granitoider och pegmatiter. På Utö finns ett flertal pegmatiter exponerade främst på öns nordvästra delar samt på Persholmen.

#### 2.1.2 Metamorfos

Metamorfgraden i Bergslagen varierar mellan låg och medel amfibolit facies i dess norra delar och övre amfibolit till granulit facies i söder (Andersson et al, 2006). Andalusiter och granater hittade på Utö har en zonerings som påvisar att de genomgått metamorfos vid två olika tillfällen vilka daterats av Andersson et al (2006) till 1880-1860 Ma samt 1820-1780 Ma, se diagram 1. Dessa två metamorfa faser finns även bevarade i form av plastisk deformation som kan beskådas över hela Utö i form av veckning.

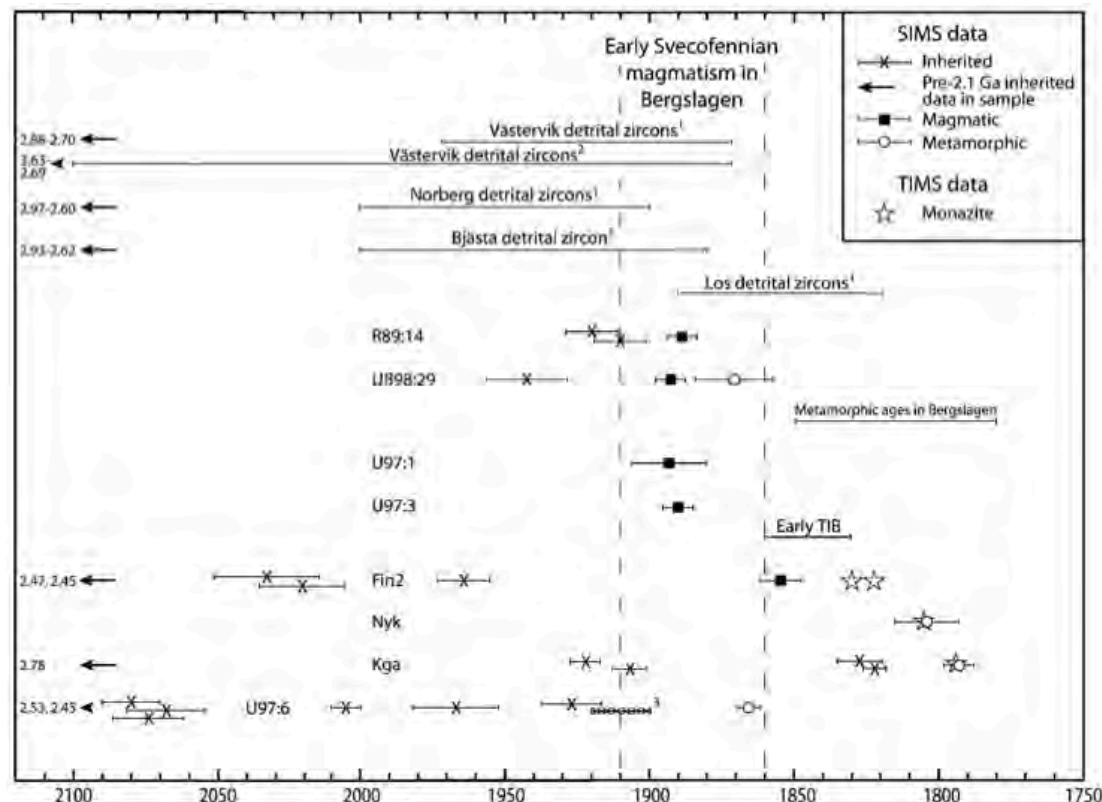


Diagram 1: Åldersbestämning av olika berggrundsbildande event i Bergslagen från Andersson et al (2006), se ruta för SIMS data i diagrammet för detaljer.

## 2.2 Bergarter

De mest förekommande bergarterna på Utö kommer här att beskrivas som de beskrivits i tidigare publicerad litteratur. Som tidigare nämnts har alla bergarter på Utö genomgått metamorfos, med möjligt undantag för pegmatiterna.

### 2.2.1 Karbonatbergarter

De bergarter som kommit att bildas av karbonatreven, nämnda tidigare, kom till viss del att blandas med vulkanisk aska och utgör därför en bergart med varierande procenthalt av kisel och karbonater (Talbot, 2008) som sträcker sig från ren marmor till lager av metavulkanit, som beskrivs här efter. Denna blandning av kisel och karbonater har inom gruvindustrin länge benämnts *skarn*, vilket betyder skräpberg, då det är den bergart som ofta omsluter järnmalmen. Inom skarnformationen finns flera olika lager av metavulkanit med en tjocklek som varierar från cm till dm och återkommer oregelbundet genom hela formationen (Talbot, 2008).

### 2.2.2 Metavulkaniter och Flinta

Metavulkaniter finns över stora delar av Utö, delvis som band upp till ett tiotal meter breda på öns nordvästra sida men också som band med en bredd på enbart cm till dm som återkommer oregelbundet genom hela skarnformationen. Denna bergart är mycket finkornig och varierar i färg från rosa till grå (Talbot, 2008). Detta är en extrusiv bergart, troligen aska från explosiva vulkanutbrott och de återkommande lagren i skarnformationen kan representera enskilda vulkanutbrott (Talbot, 2008).

### 2.2.3 Metaryolit

Detta en felsisk bergart med porfyroklaster av kvarts och plagioklas samt en matrix bestående av kvarts, plagioklas samt biotit, dess sammansättning varierar från ryolitisk till andesitisk (Talbot, 2008). Det har diskuterats huruvida den är extrusiv eller intrusiv men mycket tyder på att den är det senare, dock på låga djup (Talbot, 2008).

### 2.2.4 Metagråvacka

Metagråvacka består av en blandning av lera, silt och sand som genomgått metamorfos, den återfinns utmed Utös sydöstra kust och den tros ha haft olika ursprung. Delvis är det sediment bestående av både lera, silt och sand som avsatts på vulkanöns undervattenssluttningar i form av turbiditer vilka kan ses som normalgraderad lagring på flera platser i denna litologi. Det är också vissa delar som innehåller mer sand och därmed troligen deponerats närmare land (Talbot, 2008). Sedimentära strukturer som fortfarande kan ses trots genomgången metamorfos påvisar att denna gråvacka rördes om i en akretionsprisma (Talbot, 2008).

### 2.2.5 Pegmatiter

Pegmatiter är en grovkristallin intrusion, ofta av den vätska som är sist kvar att kristalliseras i en magmakammare och därför innehåller den ofta mer inkompatibla ämnen.

### 2.2.6 Malm

De malmförekomster som brutits på Utö är järn från bandade järnformationer samt sulfidmalmer. Den bandade järn formationen går längst centrala Utö och tros ha bildats genom kemisk utfällning och deponering i lugna vatten nära en vulkan ö (Talbot, 2008) eller genom hydrotermal alterering (Allen et al, 1996). Sulfidmalmen förekommer främst på södra delen av Utö i metavulkaniten (Talbot, 2008). I metavulkaniten syns tydliga tecken på hydrotermal alterering då den är mer natriumrik längst ner i stratigrafin och mer kaliumrik högre upp samtidigt som immobiliserade grundämnen är regelbundet spridda genom hela stratigrafin (Allen et al, 1996). Malmmineral består av mobila/inkompatibla ämnen och har därför rört sig med de varma hydrotermala flödena och ansamlats.

## 3 Syfte

Syftet med detta projekt är att kartlägga de olika bergarterna i "Area 3" i karta 1 samt räkna ut de maximala tryck- och temperaturförhållanden under vilka dessa genomgått metamorfos. Utöver detta undersöks även ett specifikt band i gråvackan som uppvisar tecken på fluidinteraktion.

## 4 Metod

### 4.1 Kartering och kartritning

Fältstudier och kartering gjordes på Utö av område 3 i karta 1 den 3:e -17:e april 2013. I fält har lupp används för att studera mineral, hammare för att studera bergarters hårdhet och GPS för att dokumentera de lokaler där prover för vidare analys tagits, två olika GPSer har använts vid olika tillfällen och koordinaterna är därför i olika koordinatsystem, dessa finns angivna. Mätningar av foliationens strykning och stupning gjordes med kompass och klinometer genom att använda den så kallade högerhandsregeln vilket innebär att strykningen mäts åt det håll högra handens tumme pekar när dess fingrar pekar mot foliationens stupning. Som underlag för att framställa en berggrundskarta användes en höjdkarta från lantmäteriet som sedan har ritats på med färgpennor. Mätningarna av foliationen, numrering av lokaler där prover tagits samt uppåt riktning i relikta sedimentära strukturer ritades in med hjälp av Adobe Illustrator och Photoshop CS6.

### 4.2 Provtagning och förberedning av prover

Provtagningen i fält gjordes med hammare samt kil. De fem prov som valdes till vidare petrografisk analys sågades till och slipades med kiselkarbid (kornstorlek 180) i laboratoriet på Institutionen för Geologiska Vetenskaper (IGV) på Stockholms Universitet för att sedan skickas vidare till Vancouver Petrographics Ltd (<http://www.vanpetro.com/>) för tunnslipstillverkning.

Prov 6 som togs för XRF- analys bestod av tre olika band och sågades upp i de tre olika delarna så att banden kunde analyseras separat. De slipades och krossades till pulver med en kornstorlek på ca 20µm. Därefter genomfördes glödningsförlust på de tre delarna av prov 6 för att vatten och biologiskt material skulle avlägsnas, detta gjordes genom att värma upp dem i två steg först till 105°C och sedan till 1000°C se appendix 1 för detaljer. De tre proven gjordes sedan till homogena glasbitar för att göra XRF-analys möjlig.

### 4.3 Petrografisk analys

Den petrografiska analysen genomfördes på institutionen för geologiska vetenskaper Stockholms universitet med ett Leica DM LSP.

Petrografisk analys är en viktig del inom mineralogi och petrologi, dels för att många mineral och strukturer är mikroskopiskt små och inte syns med blotta ögat men kanske främst för att det är ett sätt att identifiera mineral efter deras optiska egenskaper vilket kan göra det lättare att skilja på mineral.

Bilder av tunnslipen har tagits på Institutionen för geologiska vetenskaper på Stockholms universitet med hjälp av programmet Leica LAS.

### 4.4 X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

XRF analys genomfördes på institutionen för geologiska vetenskaper på Stockholms universitet med en XRF Scientific VDF 4000 Phoenix.

XRF är en metod där ett sammanhängande spektrum av röntgenstrålning skickas mot provet vilket absorberar det och strålar ut ett specifikt spektrum som representerar de grundämnen det innehåller. Röntgendetektorn mäter det inkommande spektrumet samt dess styrka och räknar av den informationen ut mängden grundämnen i viktprocent i oxidform (Nesse, 2009).

XRF analysen gjordes för att analysera ett band och en krans runt, se bild 4, i metagråvackelitologin för att jämföra detta med den omgivande bergarten och ta reda på huruvida den ljusa kranen är en så kallad *selvage*, som bildats genom utbyte av ämnen mellan lager 3 och den omgivande bergarten.

#### 4.5 Electron Microprobe Analysis (EMPA)

Electron microprobe analysen genomfördes med en Jeol JXA 8530 F på Geocentrum på Uppsala universitet.

En Electron Microprobe fungerar efter samma princip som en XRF med skillnaden att röntgenstrålen i en EMP med hjälp av ett elektromagnetiskt fält och en lins kan fokuseras till en väldigt liten punkt och därmed bestämma sammansättningen i en specifik punkt i en kristall och avgöra variationer i sammansättning inom ett mineral, till exempel zonerings. Electron Microproben fungerar bäst för att detektera grundämnen med ett atomnummer över 11 och skiljer inte på olika oxidationstal på ett ämne, till exempel  $\text{Fe}^{2+}$  och  $\text{Fe}^{3+}$  (Nesse, 2009).

#### 4.6 Geotermobarometri

Principen av geotermobarometri är att använda sammansättningen av samexisterande mineral som är fasta lösningar av två ändkomponenter och har ett utbyte av grundämnen med varandra som varierar beroende på tryck och/ eller temperatur. En temperaturberoende reaktion är en geotermometer och en tryckberoende är en geobarometer.

Ett exempel på en geotermometer är den så kallade GARB som baseras på utbytet av Mg och Fe mellan granat och biotit. Ferry och Spear (1978) genomförde en mängd experiment för att fastställa hur detta går till då de båda är fasta lösningar mellan en Fe-ändmedlem och en Mg-ändmedlem. Låga temperaturer ger högt Fe-värde i granat och högre temperaturer leder till högre Mg-halt hos densamme, motsatsen gäller för biotit (Wikström, 1993). Ferry och Spear (1978) tog fram en rät linjes ekvation som kan representera denna reaktion mellan mineral och relatera tryck, temperatur och jämnviktskonstanten K i ett petrogenetisk rutnät och för att använda denna linje till att fastställa temperaturer för kända tryck.

Utbytet mellan granat och biotit sker enligt reaktionen:

Flogopite + Almandin = Annit + Pyrop och jämnviktskonstanten K är i denna reaktion  $K = (\text{Mg}/\text{Fe})_{\text{granat}} / (\text{Mg}/\text{Fe})_{\text{biotit}}$ .

Ett exempel på en geobarometer är utbytet av Ca mellan anortit och grossular i reaktionen anortit = grossular + kyanit + kvarts, vilken kallas GASP (Philpotts and Ague, 2009).

Dessa uträkningar kommer att göras med programmet THERMOCALC som beskrivs här nedan.

##### 4.6.1 Mineralzonering

När ett mineral växer till tar det upp grundämnen från sin omgivning som passar in i dess struktur, vilka ämnen det är som bäst passar strukturen kan dock variera beroende på rådande tryck och temperatur. Om en kristall börjar växa i en miljö med specifika tryck och temperaturförhållanden vilka sedan förändras kan detta ses i sammansättningen av grundämnen i mineralet som en zonerings. Detta är dock även tidsberoende, om ett mineral befinner sig under ett visst tryck och temperatur under mycket lång tid kan zonerings raderas genom diffusion (Nesse, 2009). Granat är ett bra mineral för att studera zonerings då det står emot diffusion relativt bra jämfört med till exempel glimmermineral vilka lättare omkristalliseras och därmed inte bevarar någon zonerings.

#### 4.7 THERMOCALC och AX

THERMOCALC (<http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/>) är ett program skrivet av Powell och Holland (1988) för att genomföra termodynamiska uträkningar och fasdiagram med hjälp av databaser byggda på experimentellt data för reaktioner mellan olika mineral bestående av fasta lösningar (Holland and Powell, 1998).

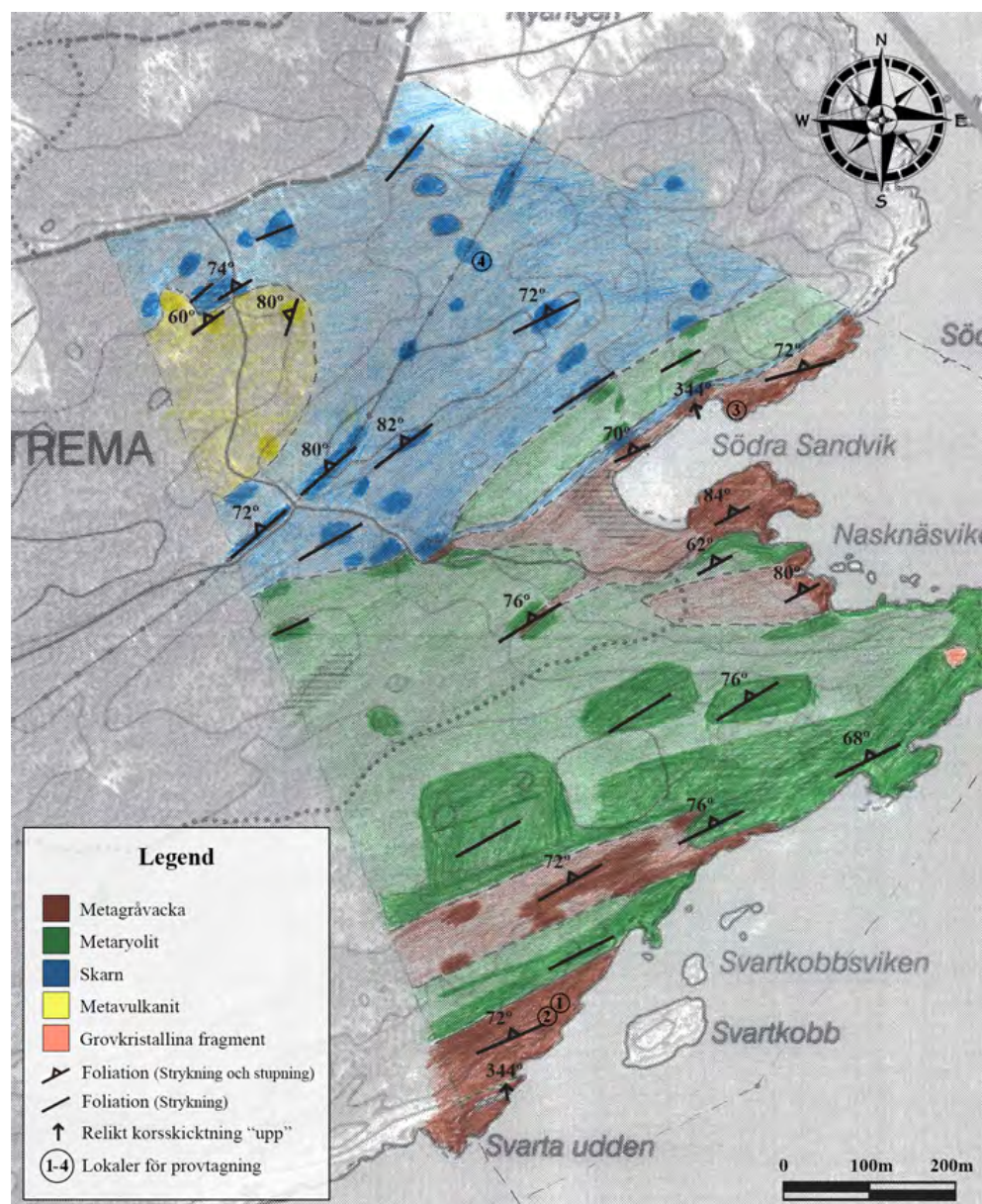
En fil med information och sammansättning samt aktivitet av mineralen i en bergart sätts in i THERMOCALC som därefter går igenom sin databas och hittar alla reaktioner som representerar geotermometrar samt geobarometerrar för den angivna mineralsammansättningen och av dessa tas den skärningspunkt som passar bäst till dessa fram i ett tryck och temperatur diagram. Detta innebär att ju fler av de mineral som kan användas för tryck och temperatur bestämning som setts, desto fler reaktioner tas med i beräkningen och ett värde med mindre felmarginal kan bestämmas. Om få mineral anges kan det förekomma att reaktionerna inte balanseras och de uträknade trycken och temperaturerna blir då mindre exakta.

För att räkna ut tryck- och temperaturförhållanden för metagråvacka rekommenderas användning av systemet KFMASH där Kalium, Järn, Magnesium, Aluminium, Kisel och Väte tas med i beräkningen. I ett sådant system antas även närvaro av vatten och kvarts. AX räknar fram aktiviteten hos de olika ändkomponenterna som mineralen består av. Aktiviteten avgör hur benäget mineralet är att reagera med andra mineral. En fil med viktprocent av grundämnen i oxidform som fås ut i electron microprobe analysen sätts in i AX och av det räknas ut hur stor del av de olika ändkomponenterna mineralet består av samt dess vilja att reagera med andra mineral. Filerna med denna information kan sedan användas i THERMOCALC för att simulera under vilka tryck och temperatur förhållanden mineralet bildats.

## 5 Resultat

### 5.1 Kartering

Resultaten av karteringen visas i karta 2. De områden som studerats i fält är markerade i starkare färg medan de områden som på grund av vegetation, snö eller vattensamlingar inte varit möjliga att studera har istället blivit extrapolerade vilket visas med svagare färger. Heldragen linje mellan bergarter visar att kontakten mellan dem setts i inom 10 meter i fält och streckad linje innebär att den inte studerats men att den, med tanke på hur de olika bergarterna förhåller sig till varandra, bör vara ungefär där. Strykning samt stupning av foliationen visas vid de lokaler där detta kunnat mätas. Uppåtriktning i relikta sedimentära strukturer som setts vid två lokaler finns markerade i form av pilar som indikerar uppåt samt grader för den riktning denna har.



Karta 2: Resultatet av kartering av område 3 på nordöstra Utö.

### 5.1.1 Bergarter

I kartan syns fyra olika litologier som beskrivs härnäst.

#### 5.1.1.1 Metagråvacka

Metagråvackan består av två olika typer av lager som upprepas oregelbundet genom hela litologin och varierar från decimeter upp till ett par meter breda. De två olika lagren skiljer sig i mineralogi, hårdhet samt foliation.

Lager 1 är en metapelit med skiffrig textur bestående främst av muskovit men innehåller också en mindre del finkristallin kvarts. Tydlig foliation syns genom hela detta lager då glimmermineralen rätar upp sig ordentligt i foliationens riktning.

Lager 2 består främst av metapsammit med inslag av glimmermineral. Eftersom kvarts är det dominerande mineralet har dessa lager inte samma tydliga foliation som de mer metapelitiska lagren. I det sydöstra hörnet av det kartlagda området finns det band

bestående till störst del av biotit och granat, de följer foliationens riktning och är ett par cm breda. Dessa lager formar delvis ett boudinage då det bryts upp i mindre bitar och smalnar av i kanterna på varje bit, se bild 1. Bandet omges av en ljus krans på upp till 3 cm på vardera sidan om det. Andalusit kan ses vid två lokaler inom denna bergart. Vid Södra Sandviken syns andalusitkristaller med en brun-gul krans runt sig, dessa är orienterade i foliationens riktning,  $\sim 242^\circ$ . Även i områdets



Bild 1: Biotit-Granatband i det kvartsrikare lagret av metagråvackan. Det är uppdelat i flera liknande delar som smalnar av i kanterna i en så kallad korbstruktur eller boudinage.

sydöstra del, nära Svarta udden har andalusitkristaller hittats, dessa är millimeterstora, visar ingen tydlig riktning och saknar krans runt sig. Vid två platser syns korsskickning i kvartsitlagret, dessa indikerar att uppåt vid tidpunkten för sedimentering var  $340^\circ$  (N-NW). Ett område på tre kvadratmeter med konglomerat har också observerats i sydvästra utkanten av område 3, klasterna är utdragna i foliationens riktning.

Genom hela metagråvackan finns det kvartsgångar från millimeter till meter breda och i varierande riktning. Vid ett flertal lokaler utmed kusten, till exempel vid Nasknäs viken finns veckade kvartsgångar där veckningsaxeln följer foliationsriktningen.



Bild 2: Relik korsskickning i metagråvacka vid Svarta Udden i sydvästra hörnet av område 3. Luppen i bild är ca 3 cm i diameter.

#### 5.1.1.2 Metaryolit

Metaryoliten som studerats på Utö är en felsisk porfyr bestående främst av kvarts, plagioklas samt biotit. Porfyroklasterna utgörs av kvart- samt plagioklaskorn på upp till 5 mm i diameter, matrixen är mycket finkornig och består av kvarts, plagioklas och biotit, genom stora delar av litologin har biotitkornen radats upp i små stråk. Foliationen går att urskilja vid en närmare titt på porfyroklasterna och biotitstråken då dessa visar en orientering där strykningen varierar mellan 238°-252°.

I vissa fall är metaryoliten svår att särskilja från de kvartsrika lagren i metagråvackan och gränsen mellan dessa två är därför delvis svår att urskilja.

På udden öster om Nasknäsvisken finns ett område på ca 10x10 m som utgörs näst intill enbart av kaliumfältspatkristaller, vilket inte syns någon annanstans i denna litologi, se bild 4. Dessa kaliumfältspatkristaller är upp till cm i diameter i detta område, men runt om på udden syns även mindre kaliumfältspat kristaller.



Bild 3: Grovkristallina fragment av kaliumfältspat, från det röd-markerade området på karta 2. Luppen är ca 3 cm i diameter.

#### 5.1.1.3 Metavulkanit

Denna bergart är finkornig, har vassa brottytor och är så pass hård att den inte repas av hammare. Färgen varierar från gul-brun till mörkt brun-svart. Hållar där vulkaniten finns att studera är få och svårtillgängliga men den återkommer även genom hela skarn-litologin i form av centimeter till decimeter breda lager. Vittringsytan ger ett rostigt intryck.

Foliationen varierar mellan 240-246° samt en mycket avvikande foliation på 180° i en håll.

#### 5.1.1.4 Skarn

Skarn är en väldigt bred term och kommer här att innefatta en bergart bestående av karbonat- och silikatmineral. Den består till störst del av kalcit som är vit och i många fall har en välutvecklad kristallform, grön amfibol (actinolit och/eller tremolit) i form av fint utvecklade prismatiska kristaller i olika nyanser av mörkgrön. Även ett annat vitt fibröst, mjukt mineral återkommer genom hela litologin. Sammansättningen av de olika mineralen varierar från 10 till 90 procent amfibolkristaller och band med denna variation återkommer oregelbundet genom hela litologin.

Inom skarnlitologin finns även band av andra bergarter som är centimeter till decimeter breda. Det är band av marmor; en ljus bergart med tydliga kalcit kristaller som är mjuk att repa. Band av metavulkanit som beskrivits här ovan och vid minst en lokal har flinta setts, denna är brun till gråaktig i färgen, har mussliga brottsytor med vassa kanter och är så pass hård att den inte går att repa med hammaren. Mineraliserings stråk, troligen magnetkis men eventuellt också andra malmbildande mineral, har setts på flera lokaler i skarnlitologin, dessa är mörka och har metallisk lyster. Kontakten mellan de olika lagren är till synes skarpa och de olika lagren återkommer oregelbundet genom hela litologin.

## 5.2 Prov för vidare analys

De 4 lokaler där provtagning gjordes på Utö är märkta på karta 2, i form av nummer 1 till 4, här följer en beskrivning av de prov som togs.

Prov 1 är taget i lokal 1 i bandet av biotit och granat som går genom det mer kvartsrika lagret i metagråvackan och är ca 7x5x4 cm stort. I provet syns biotit-granat bandet, den ljusa krans som omger detta samt den omgivande bergarten. Provtagning skedde 2013/4/14 med hammare och kil. Koordinater för provtagning (WGS 84): N 58 57 884 E 018 21 290.

Prov 2 är från lokal 1 och är taget från samma plats som prov 1 men skiljer sig i det att det enbart består av biotit-granat bandet samt kransen runt detta. Provtagning skedde 2013/4/14 med hammare. Koordinater för provtagning (WGS 84): N 58 57 884 E 018 21 290.

Prov 3 är taget i lokal 2 i ett annat biotit - granat band i metagråvackan ca 50 meter öster om lokalen där prov 1 och 2 tagits. Detta band är bredare än det tidigare beskrivna, upp till 8 cm. Provet är ca 17x15x6 och provtagningen genomfördes med Måns Daniel 2013/04/15.

Prov 4 är taget i lokal 3. Även detta är taget ur det kvartsrika lagret av metagråvackelitologin och består av andalusitkristaller med en ljusbrun krans runt. Provtagningen gjordes med hammare och kil tillsammans med Fredrik Antevik 2013/04/15. Koordinater för provtagning (Sweref99): 6541713, 693137

Prov 5 togs i lokal 4 i skarnlitologin. De mineral som går att urskilja med lupp är kalcit samt mörkgröna amfibolkristaller. Provtagningen genomfördes med hammare tillsammans med Fredrik Antevik 2013/04/14. Koordinater för provtagning (Sweref99): 6541818, 692841.

Prov 6 togs i lokal 1, ur samma biotit-granatband som prov 1 och 2. Det består av biotit-granat bandet, den vitare kransen samt en del av omgivande berg. Detta prov togs med hammare samt kil av Alasdair Skelton 2013/04/16. Koordinater för provtagning (WGS 84): N 58 57 884 E 018 21 290.



Bild 4: Prov 6 in situ. De tre lagren finns markerade som de benämns i diagram 5 och 6 samt i beskrivningen av tunnslip 1 och 2, som är från samma lokal ca en meter från prov 6.

### 5.3 Petrografisk analys

Tunnslipen kommer här, för enkelhetens skull att kallas tunnslip 1-5 för att numrera dem som de prov de kommer ifrån som beskrivs här ovan. Inom parentes kommer nämnas den märkning tunnslipen har. En kort beskrivning av mineralen görs första gången de nämns.

#### Tunnslip 1 (JL2.1 M8)

Detta prov består av tre lager som här kommer att benämnas lager 1, 2 och 3, se bild 4.

Lager 1 består av kvarts, muskovit och biotit. Kvarts känns igen då de är grå kristaller, i korspolariserat ljus, med en undulös utsläckning och utan någon speciell kristallform. I planpolariserat ljus är de helt färglösa och har en glasig textur. Kristallerna är jämnstora genom hela lagret. Muskovit känns igen då de i korspolariserat ljus främst har nyanser mellan rosa, grönt och gult av andra ordningen. Spaltningsplan syns i vissa vinklar i ett eller två plan. I planpolariserat ljus är de färglösa. Biotit skiljer sig från muskovit då den i korspolariserat ljus har interferensfärger i nyanser runt brunt och orange upp till rosa och grönt i 1:a-2:a ordningens färger och i planpolariserat ljus har en brun pleokroism, till

form och spaltningsplan liknar den helt muskovit. Biotit kristallerna har i detta fall samma storlek som kvartskristallerna och är jämnstora igenom hela detta lager.

I flera fall möts kvartskristallerna tre och tre med  $120^\circ$  vinkel, se bild 7, vilket tyder på lång tid under stabila förhållanden, andra kvartskorn har mer rundade kanter men inga tydliga reaktionstexturer tyder på att ojämnvikt råder.

Lager 2 består även det av kvarts, biotit samt muskovit, men också av granat.



Tunnslip 1: Överst syns Biotit-Granat lagret, i mitten kransen och underst den omgivande bergarten.

Kvartskornen är lika stora som i lager 1 men de är färre. Biotit och muskovit kristallerna är mindre och fler än i lager 1. Granatkristallerna känns igen då de är mörka i korspolariserat ljus (isotropisk) med en hexagonal kristallform, i planpolariserat ljus är de färglösa och glasiga. Det finns även några korn av ett opakt mineral, troligen en oxid eller sulfid. Granaterna är uppspruckna och under omvandling till biotit, klorit, muskovit och i vissa fall syns även opaka mineral som inneslutningar eller möjligen att granaten omvandlas till dem.

Lager 3 består av större kvartskorn än i lager 1 och 2, muskoviten är lika finkornig, biotiten har även den större korn än i lager 1 och 2 samt granat. Flera tecken på omvandling syns; granaterna är väldigt trasiga och i flera fall syns tydligt hur de omvandlas till biotit och muskovit. Det ser även ut som att granaten omvandlats till kvarts men det är troligen så att kvartsen tidigare varit inneslutningar i granatkristallen och inte produkt i omvandlingen.

Mellan lager 1 och 2 är övergången tydlig men i övergången mellan lager 2 och 3 finns en finkornig zon bestående av muskovit, biotit och kvarts.

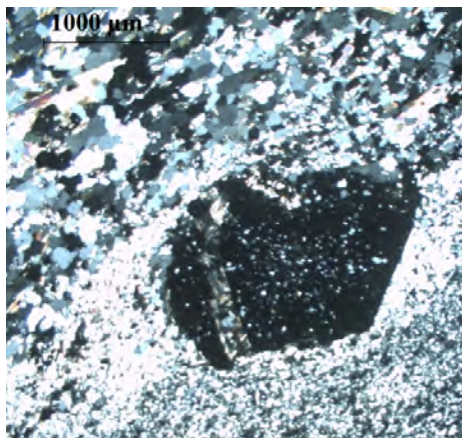


Bild 5: Från tunnslip 1; granat med en stor spricka full av biotit och muskovit. Denna bild är tagen i korspolariserat ljus.

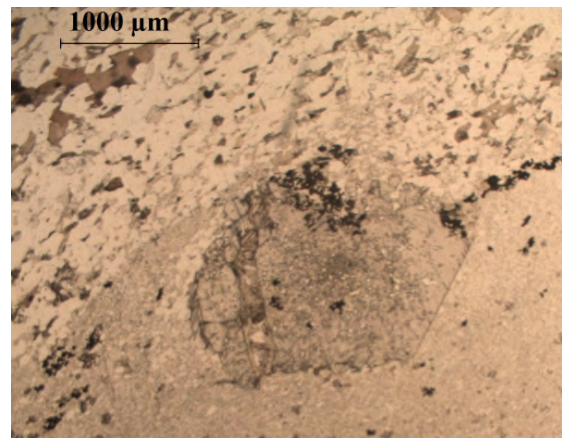


Bild 6: Samma granat som i bild 5 men här i planpolariserat ljus.

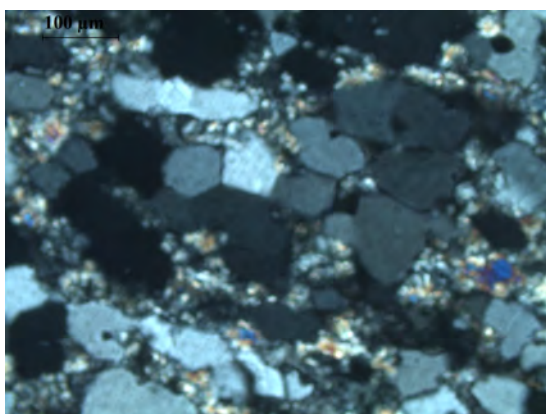


Bild 7: Tunnslip 1 i korspolariserat ljus. Kvartskristaller som möts i 120° vinkel vilket är ett tecken på att den varit i samma miljö under lång tid och är mycket stabila.

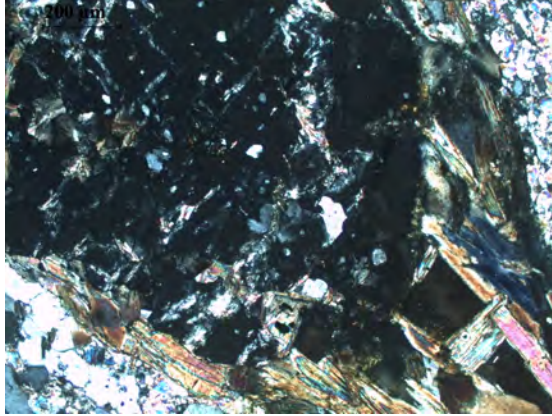


Bild 8: Tunnslip 2 i korspolariserat ljus. En granatkristall som delvis genomgått omkristallisering till biotit, muskovit och

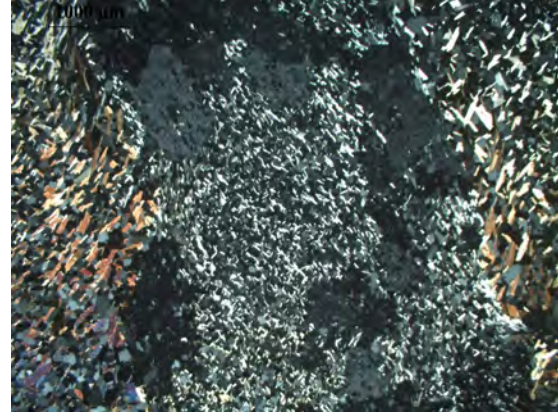


Bild 9: Tunnslip 4 i korspolariserat ljus. En stor grå (delvis också svart) andalusitkristall som omkristallerats till biotit i kanterna och muskovit i mitten.

### **Tunnslip 2 (JL2.2 M9)**

Detta slip består av lager 2 och 3 från prov 1 och benämns därför precis som dem.

Lager 2 består av ~90% kvarts och resten är biotit, klorit, muskovit och granat med mycket kvarts och biotit inklusioner.

Klorit liknar till formen muskovit och biotit men i kors-polariserat ljus är den mörkblå.

Granaterna är uppspruckna och i sprickorna finns biotit, klorit och muskovit, se bild 8.

Lager 3 består av betydligt mindre kvarts än lager två och mer av biotit, muskovit, klorit samt granat. Granaterna är fulla av inklusioner av biotit samt kvarts och i vissa fall har de även en ljus krans runt sig. I sprickorna har även här biotit och muskovit bildats.

Mellan lager 2 och 3 finns en zon med mycket finkornig kvarts, biotit, klorit, opaka mineral samt två granater med en krans av biotit och sillimanit. Detta prov togs vidare till electron microprobe analys.

### **Tunnslip 3 (JL 3 M5)**

Detta slip består av kvarts, biotit, klorit och granat.

Granaterna är nästan helt omvandlade. Runt de små delarna av granat som finns kvar syns främst kvarts, endast runt några granatdelar syns biotit. Detta kan bero på att granaten hade många kvartsinklusioner som blev kvar när den omvandlades.

Till viss del går det att urskilja lager av biotit och andra av kvarts som återkommer oregelbundet.



Tunnslip 2: till höger syns lager 2 och till vänster lager 3.

#### Tunnslip 4 (JL 4 M6)

Detta slip består av kvarts, biotit, muskovit, granat och andalusit. I detta fall är andalusitkristallerna ljst grå i korspolariserat ljus och färglösa med en svag rosa pleokroism i planpolariserat ljus samt har en tydlig relief.

Tunnslipet består av två stora andalusitkristaller, dessa syns tydligt som två ljusa områden i bild tunnslip 4, i kanterna har dessa börjat omvandlats till biotit och i mitten till fina prismatiska muskovitkristaller, se bild 9. Detta tunnslip togs vidare till electron microprobe analys för att fastställa att det var muskovit i mitten av den ena andalusitkristallen då dessa delvis liknade staurolit.



Tunnslip 4: De ljusa områdena är andalusitkristaller under omvandling.

#### Tunnslip 5 (JL 5 M7)

Detta prov består till störst del av kalcit och/eller dolomit, dessa går inte att skilja på i mikroskop. I korspolariserat ljus har de båda interferensfärger av hög ordning i nyanser runt rosa och gult samt tydliga spaltningplan i två riktningar, se bild 11. I planpolariserat ljus har de också ljusa färger i rosa och gula nyanser av hög ordning, se bild 10. Resterande del av tunnslipet visar ett flertal amfibolkristaller i olika färger både i korspolariserat och planpolariserat ljus. Dels finns det klinoamfibol (utsläckning sker när spaltningen är i 45° lutning) som, sedda från kristallens kortsida visar en tydlig kristallform och spaltningplan i 120° och 60° vinkel, dessa är gul-beigea sedda i korspolariserat ljus och färglösa i planpolariserat ljus, vilket kan betyda att de är hornblände. Andra amfibolkristaller är skurna jämsn med prisma och i dessa syns endast den spaltning som följer kristallen på längden, se bild 11. Dessa amfiboler är svagt mörkblå i plan polariserat ljus och är därför troligen glaukofan men dessa två amfibolerna skulle också kunna vara av samma sort men ha olika färger i olika orienteringar. En annan amfibol som lätt känns igen på sin form av fibrösa prismor, låga interferensfärger i korspolariserat ljus och svagt gröna i planpolariserat ljus är aktinolit. Både amfibol- och kalcit/dolomit-kristallerna är delvis mycket euhedra.

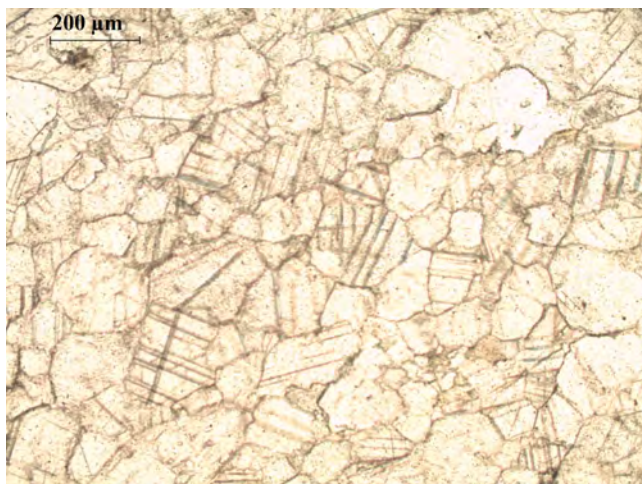


Bild 10: Kalcit och/ eller dolomit i tunnslip 5 i planpolariserat ljus. Flera kristaller visar den planspaltning som är typisk för dessa mineral.

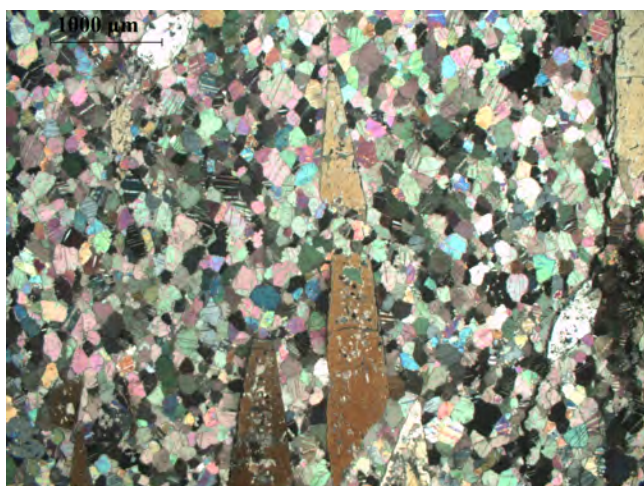


Bild 10: Tunnslip 5 i korspolariserat ljus. De mindre kristallerna med höga interferensfärger är kalcit och/ eller dolomit, de större prismatiska är amfibol.

## 5.4 Electron microprobe analys

Resultaten från electron microprobe analysen skrevs över i ett textdokument för att fungera som inmatningsfil till programmet AX. De mineral som undersökts var främst granat, biotit, klorit och muskovit, se bild 11, vilka användes för att räkna ut tryck och temperatur i THERMOCALC, ett fåtal okända mineral undersöktes också för att göra det möjligt att identifiera dem.

Den granatkristall som mättes hade biotit inklusioner så tre mätningar gjordes, först i kanten av granaten och biotiten precis utanför sedan två biotit inklusioner och granatkristallen precis bredvid, se nummer 1-3 i bild 11. Utanför granatkristallen mättes muskovit- och kloritkristaller av dessa mätningar har ett medianvärde valts ut och detta används i alla THERMOCALC modelleringar.

Resultat från microprobe analys, grundämnen visas i oxidform											
Mineral:	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Muskovit	46,54	0	0,81	0,0119	0	0,1038	37,81	0,0839	0,0622	0,0466	10,09
Klorit	23,97	0,1532	22,59	0	0	28,13	0,1138	12,55	0,0272	0,0322	0,0084
Biotit 1	34,98	1,74	19,34	0	0	21,44	0,1495	8,59	0,0023	0,1563	8,91
Granat 1	36,93	0,0032	21,53	0	0	33,67	4,46	1,69	3,35	0	0,0168
Biotit 2	32,27	1,39	19,16	0,03	0	23,94	0,13	8,22	0,09	0,03	6,98
Granat 2	36,8	0	21,3	0,07	0	34,46	4,35	1,98	2,14	0	0,01
Biotit 3	26,71	0,36	19,46	0,04	0	30,36	0,19	10,53	0,08	0,08	1,33
Granat 3	36,37	0,04	21,14	0,01	0	33,9	5,45	1,66	2,05	0	0,0354

Tabell 1: De resultat från EMP analysen som används för modellering i THERMOCALC, för fullständig lista med resultat se appendix C.

Halterna av de olika grundämnena varierar en del men ingen tydlig zonerings går att fastslå.

## 5.5 Thermocalc och AX

I modelleringen i THERMOCALC användes ett värde för klorit och ett för muskovit genom samtliga modelleringar, dock varierades värdena för biotit och granat mellan tre olika punkter, se bild 11. Modelleringen för dessa tre punkter genomfördes därefter igen med förändringen att andalusit lades till som en närvarande fas då andalusitkristaller setts i samma lager i gråvackelitologin ca 5 m från platsen där detta prov tagits, inte i granat-biotit lagret men i den omgivande metapsammiten.

Första modelleringen gjordes med biotit-granatpar 1 i bild 11. Trots att observerade texturer tyder på att jämnvikt möjligen inte råder i detta prov antas jämnvikt mellan samtliga mineral för att göra modellering i THERMOCALC möjlig. Värdena för biotit och granat byttes därefter ut mot par 2 men muskovit och klorit var de samma. Om granaten skulle vara zonerad bör i detta fall granaten och biotiten vara i jämnvikt men inte med muskoviten och kloriten. Den sista modelleringen gjordes med biotit-granitpar 3. Dessa tre mätningar gjordes sedan om med andalusit, då denna inte är en fast lösning matas inga aktivitetsvärden in i THERMOCALC utan det räcker med att skriva in andalusit som övrig närvarande fas.

Första gången AX körs måste ett antagande av tryck och temperatur göras, när dessa sedan fås ut i THERMOCALC kan en ny simulering göras i AX med dessa tryck- och temperaturförhållanden, detta görs sedan om tills resultaten av THERMOCALC inte förändras märkbart. I detta fall har de antagna värdena som matats in i AX varit 3 kbar och 500°, modelleringen har för varje mätvärden gjorts fyra till fem gånger varefter de inte förändrats märkbart. De resultat som framkommit för tryck och temperaturförhållanden av metamorfosen i gråvackan på nordöstra Utö är följande:

Den första modelleringen som genomfördes gav en temperatur på  $540^{\circ}\text{C} \pm 103$  och tryck på  $4,2 \text{ kbar} \pm 2,5$ . När den gjordes om med andalusit medtaget i beräkningen gav den en temperatur på  $548^{\circ}\text{C} \pm 13$  och tryck på  $4,5 \text{ kbar} \pm 1$ . Den andra modelleringen gav en temperatur på  $582^{\circ}\text{C} \pm 113$  och tryck på  $4,1 \text{ kbar} \pm 2,6$ , densamma med andalusit närvarande gav en temperatur på  $554^{\circ}\text{C} \pm 12$  och tryck på  $5,9 \text{ kbar} \pm 1$ .

Den sista modelleringen som gjordes gav en temperatur på  $547^{\circ}\text{C} \pm 107$  och tryck på  $2,2 \text{ kbar} \pm 2,4$  och då den gjordes om med andalusit medräknat gav den en temperatur på  $547^{\circ}\text{C} \pm 12$  och ett tryck på  $5,8 \text{ kbar} \pm 1$ .

Med felmarginaler visar resultaten ett tryck som sträcker sig från 0 kbar till 6,9 kbar och en temperatur mellan  $437^{\circ}\text{C}$  och  $695^{\circ}\text{C}$ , se diagram 2.

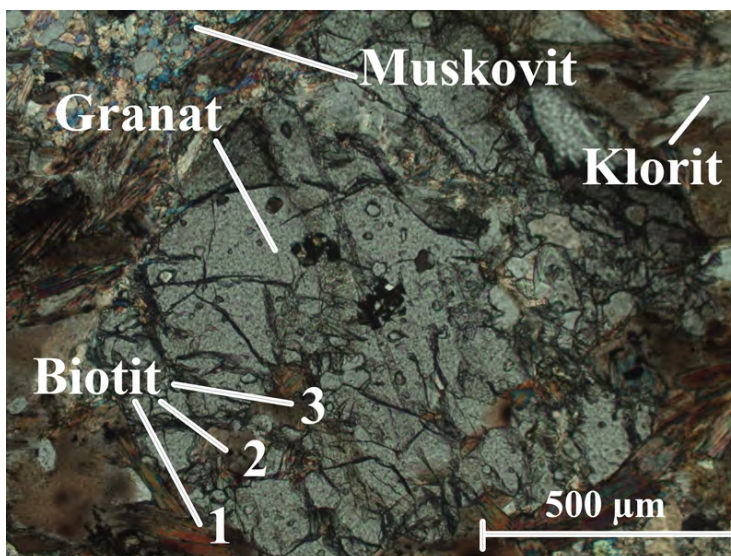


Bild 11: Fotografi av tunnslip 2.2 taget på Institutionen för geologiska vetenskaper på Stockholms universitet. Den stora grå kristallen är en granat, numren indikerar vart mätpunkter tagits av granat samt biotit i electron microprobe analysen.

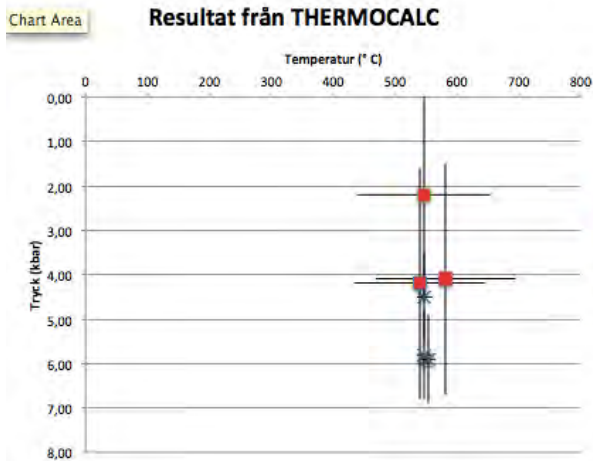


Diagram 2: De olika modellerade tryck- och temperaturförhållanden med felmarginal i form av staplar

### 5.6 XRF analys

Resultaten av XRF analysen visas i tabell 1 där grundämnena står i oxidform och visas i viktprocent. En jämförelse mellan de olika lagren i prov 6, se tabell 5 och 6, för att se hur deras kemiska sammansättning skiljer sig åt. De trender som gått att urskilja är följande; när lager 1 har lägre halter än lager 2 så är halterna i lager 3 lägre än de i lager 1, detta gäller för ämnena Si och Al, se diagram 5. Samma gäller för när lager 1 har högre halter än lager 2, då har lager 3 betydligt högre halter än lager 1 för Fe och Mg, se diagram 6.

Grundämne:	Lager 1	Lager 2	Lager 3
SiO <sub>2</sub>	72,33	73,76	67,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,16	15,05	11,31
CaO	5,03	5,79	0,70
MgO	1,01	0,34	3,67
MnO	0,05	0,08	0,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,34	0,04	0,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,76	1,96	12,55
Na <sub>2</sub> O	1,33	0,48	0,00
K <sub>2</sub> O	1,42	1,87	3,71
TiO <sub>2</sub>	0,57	0,64	0,51
<b>Totalt:</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Tabell 2: Resultatet av XRF analys av de tre olika lagren i prov 6 värden är angivna i viktprocent.

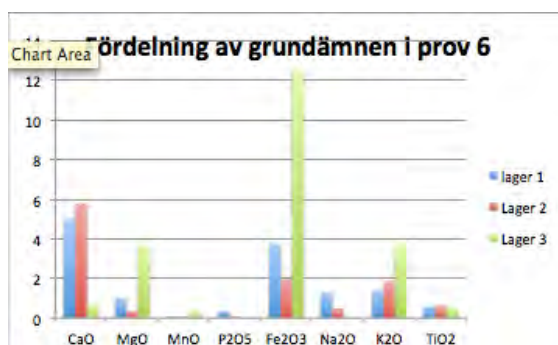


Diagram 5: Fördelningen av grundämnena i de tre olika lagren i prov 6.

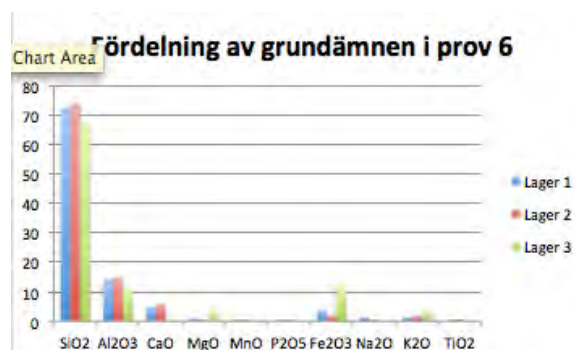


Diagram 6: Fördelningen av grundämnena i de tre olika lagren i prov 6, Al och Si har plockats bort för att variationen av de ämnen med mindre halt skall synas bättre.

## 6 Diskussion

### 6.1 Electron Microprobe analys samt modellering i AX och THERMOCALC

Enligt Talbot (2008) har zonerings i granater på Utö påvisat att dessa genomgått två olika metamorfa event vilket skulle kunna vara en förklaring till varför de temperaturer och tryck som framkommit här skiljer sig beroende på var i granatkristallen de tagits, dock visar resultaten från electron microprobe analysen inga tydliga tecken på att granaten är zonerad vilket troligen är för att de granater som mätts är väldigt små. Antagandet görs därför att granatkristallen, de olika biotitkristallerna, muskovit samt klorit har bildats i jämvikt under samma temperatur och tryckförhållanden.

En anledning till varför felmarginalen blir så pass stor i de olika modelleringarna i THERMOCALC och AX är troligtvis att för få faser tagits med i beräkningen och därav blir felmarginalen mindre när andalusit tas med, dock fanns det inte fler mineral att mäta i proven och modelleringen blev därför begränsad till endast dessa. Jämförs resultaten då andalusit varit med i beräkningen är standardavvikelsen både för tryck och temperatur mindre än då andalusit inte är med. För samtliga modelleringar då andalusit är medtaget i beräkningen är trycket på över 4 kbar, subtraheras felmarginalen kan de komma precis under detta men det är ändå uppseendeväckande då andalusit inte bildas över 4 kbar (dock kan den existera över detta tryck som metastabil) utan då istället dess polymorfer kyanit och/eller sillimanit, beroende på temperatur. Resultaten där andalusit är medräknat är därför mindre troliga och de rådande tryck- och temperaturförhållanden vid metamorfoseventet av denna gråvacka finns snarare bland de resultat då andalusit inte tagits med i beräkningen. I den tredje modelleringen, som visar ett tryck på  $2,2 \text{ kbar} \pm 2,4$ , är felmarginalen större än trycket i sig vilket gör det till ett mycket tvivelaktigt resultat. De tryck och temperaturer som är mest troliga ur dessa resultat är därför den för första och den andra modelleringen som gav temperaturer på  $540^\circ\text{C} \pm 103$  respektive  $582^\circ\text{C} \pm 113$  och tryck på  $4,2 \text{ kbar} \pm 2,5$  respektive  $4,1 \text{ kbar} \pm 2,6$ . Eftersom granat och biotit är känsligare för temperatur än för tryck (Winter, 2012) är temperaturen mer trolig än trycket, det är möjligt att trycket kunnat fastställas med större säkerhet om det funnits till exempel plagioklas i proven, då dessa är mer känsliga för tryckförändringar.

Källor till fel som kan ha uppstått under electron microprobe analysen är till exempel att mätning gjorts när linsen varit ofokuserad eller där mineralets yta inte varit helt plan. Strävan efter att undvika detta har gjorts genom att zooma in mycket innan provtagning för att få en bra bild av mineralkornet samt att ta flera mätningar vid samma punkt och jämföra dem.

Med temperaturer på  $437^\circ$  ( $540^\circ - 103$ ) till  $695^\circ$  ( $582^\circ + 113$ ) och tryck mellan 1,5 kbar ( $4,1 \text{ kbar} - 2,6$ ) och 6,7 kbar ( $4,2 \text{ kbar} + 2,5$ ) ryms detta område inom amfibolitfacies och sträcker sig även in i granulit- samt hornfälsfacies, se diagram 3 och 4. Enligt Andersson et al (2006) varierar metamorfosgraden i södra Bergslagen, där Utö ingår, mellan amfibolit och granulit facies vilket stämmer överens med de resultat som framkommit här. Hornfälsfacies är ett vanligt inslag i metamorfos som förknippas med ö-bågar.

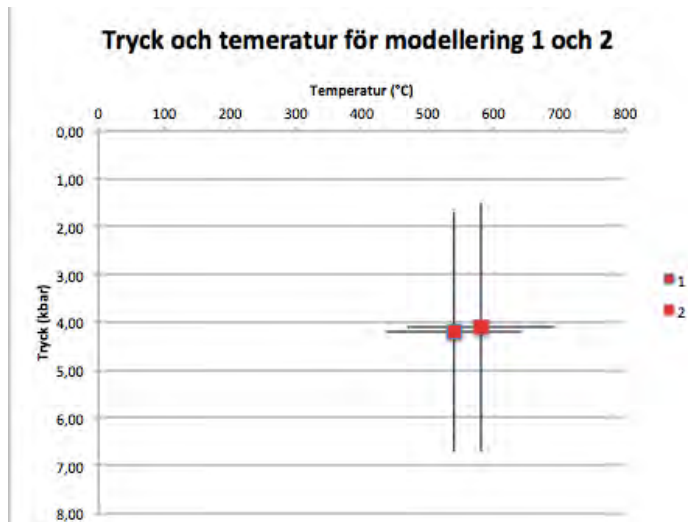


Diagram 3: Modellering 1 och 2 med fel staplar som indikerar standardavvikelsen.

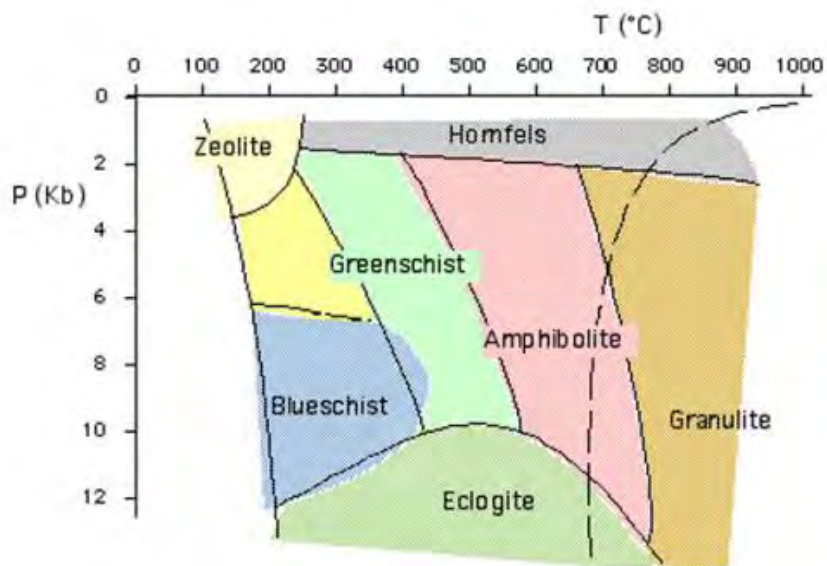


Diagram 4: Diagram över de olika metamorfa facies. Med temperaturer på 437-695°C och tryck på 1,5 - 6,7 kbar passar det undersökta området på nordöstra Utö in i övre amfibolit facies, på gränsen till hornfålsfacies. Bilden är hämtad från <http://www.museumwales.ac.uk/cy/836/>

## 6.2 XRF-analys

Vilka mineral som bildas i en bergart beror dels på under vilka tryck och temperaturförhållanden den kristalliserar/om kristalliserar men också vilken bulksammanställning som finns att tillgå, ett mineral kan bara bildas om de grundämnen det byggs upp av finns närvarande. Att Fe och Mg halten är högre och Si samt Al halten är lägre i lager 3 än i lager 1, se diagram 5 och 6, syns i tunnslipen då lager 1 till störst del består av kvarts och lager 3 av granat och biotit. Halten av K är betydligt högre i lager 3 samtidigt som detta lager helt saknar Na, se diagram 5 och 6. Detta tyder på att fluider rört sig från lager 3 in i den omgivande metapsammiten och orsakat ett utbyte av grundämnen vilket bildat den ljusare kransen i form av en så kallad selvage. Troligt är att fluider kunnat röra sig lättare genom lager 3 då detta är metapelitiskt och därmed mer poröst.

Källor till fel vid förberedelse och genomförande av XRF-analys är att proven förorenas av andra prov vilket kan förebyggas genom att behandla ett prov åt gången och noga diska ur behållare, krossmaskin samt torka av bänkar mm. Dessa åtgärder vidtogs med stor försiktighet.

## 6.3 Kartering

För att minska felkällorna vad gäller bergartsbestämning har mineralogi i alla bergarter studerats i tunnslip samt godkänts av handledarna innan de tagits till analys.

Stora delar av det studerade området är täckt av vegetation samt kärr och vid tidpunkten för fältarbetet även mycket snö så i vissa fall har få hållar funnits att studera, därför har extrapolering gjorts och finns tydligt redovisat i kartan.



Bild 12: Exempel på svårkarterad terräng.

## 7 Slutsats

Det karterade området på nordöstra utö som här undersökts består av fyra olika bergarter som alla genomgått metamorfos. Enligt modelleringen som gjorts med THERMOCALC och AX visar de mest troliga resultaten, från första och andra modelleringen, temperaturer på  $540^{\circ}\text{C} \pm 103$  respektive  $582^{\circ} \pm 113$  och tryck på  $4,2 \text{ kbar} \pm 2,5$  respektive  $4,1 \text{ kbar} \pm 2,6$  vilket ger en metamorf grad i amfibolitfacies och en bit in i hornfäls- och granulitfacies.

Närmare studier, med hjälp av XRF av ett biotit och granatrikt lager med en ljus krans runt i metapsammitlagret i gråvackelitologin visar att den ljusa kransen troligen är en så kallad selvage som bildats då fluider rört sig genom biotit-granat lagret och orsakat ett utbyte av grundämnen med den omgivande bergarten.

## 8 Tack

Stort tack till professor Alasdair Skelton och dr Joakim Mansfeld för handledning, till Dan Zetterberg för hjälp med förberedelser av prov, Runa Jacobsson för XRF analys, Jarek Majka för hjälp med EMP analys och Curt Broman för hjälp med fotografering av tunnslip.

Stort tack också till mina kära medstudenter Jonas Nilsson, Johanna Bornsjö, Anton Lidström, Fredrik Antevik och Måns Daniel för bra diskussioner och kunskapsutbyte

## 9 Referenser

### Artiklar:

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, p. 979-1008.

Andersson, U.-B., Högdahl, K., Sjöström, H. and 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.

Asch, K. (2005): The New Digital Geological Map of Europe and Standardisation: Consistency as the Last Refuge of the Unimaginative?! The Current Role of Geological Mapping in Geosciences NATO Science Series Volume 56, 2005, pp 1-8.

Ferry, J.M. and Spear, F-S. (1978) Experimental Calibration of the Partitioning of Fe and Mg Between Biotite and Garnet. *Contribution of Mineralogy and Petrology* 66, 113- 117

Lahtinen, R., Huhmaa, H., Kähkönen, Y. och Mänttari, I., (2009)  
Paleoproterozoic sediment recycling during multiphase orogenic evolution in Fennoscandia, the Tampere and Pirkanmaa belts, Finland. *Precambrian Research* 174 310–336

Lundström, I. (1990): Proterozoic crustal evolution in Bergslagen, south- central Sweden—a brief review, *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 112:2, 186-188.

Lundström, I., Allen, R.L., Persson, P.O. och RIPA, M. (1998) Stratigraphies and depositional ages of Svecofennian, Palaeoproterozoic metavolcanic rocks in E. Svealand and Bergslagen, south central Sweden *GFF*, 120:3, 315-320

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

Mansfeld, J. (2012) *The geology of Utö*. Dianum Science.

Powell, R, Holland, TJB, & Worley, B, 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC *Journal of Metamorphic Geology* 16, 577–588.

Talbot, C. (2008): Palaeoproterozoic crustal building in NE Utö, southern Svecofennides, Sweden, *GFF*, 130:2, 49-70.

Wik, N. G., Stephens, M. B. och Sundberg, A. Malmer, industriella mineral och bergarter i Stockholms län. 2005. *Rapporter och meddelanden 117*. Sveriges Geologiska Undersökning

### Böcker:

Johnson, W. M., & Maxwell, J. A. (1981). *Rock and Mineral analysis*. Chemical analysis series, Vol. 47. J.Wiley, New York, 489 pp. (2nd ed.)

Nesse, WD. *Introduction to mineralogy*. 2009. Oxford University Press, New York, USA.

Philpotts, AR and Ague, JJ. *Principles of igneous and metamorphic petrology* 2<sup>nd</sup> edition. 2009. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Winter, JD. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* 2<sup>nd</sup> edition. 2010. Pearson education Inc., New Jersey.

**Hemsidor:**

Vancouver Petrographics Ltd  
<http://www.vanpetro.com/>

THERMOCALC  
<http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/>

Museum of wales  
<http://www.museumwales.ac.uk/cy/836/>

Metamorphic map of Sweden  
<http://tellus.geo.su.se/mms/>

# 10 Bilagor

## A. Glödningsförlust

Prov	Bägare (g)	Bägare + prov (g)	Efter 105°	Efter 1000°
1	23,6191	28,2936	28,2936	28,2591
2	24,8532	28,6931	28,6931	28,6296
3	23,3217	28,1633	28,1628	28,0937

## B. XRF

			SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	P2O5	Fe2O3	Na2O	K2O	TiO2
			mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%
GVJL-1	StdCalib03	#####	72,33	14,163	5,028	1,012	0,05	0,338	3,764	1,326	1,417	0,573
GVJL-2	StdCalib03	#####	73,756	15,046	5,789	0,337	0,076	0,039	1,963	0,482	1,869	0,644
GVJL-3	StdCalib03	#####	67,179	11,309	0,697	3,672	0,341	0,036	12,55	0	3,705	0,511

## C. EMPA

No.	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	MnO	K2O	TiO2	Cr2O3	FeO	Total	Comment
8	0,1563	19,34	34,98	8,59	0,0023	0,1495	8,91	1,74	0	21,44	95,3082	JL22_1_bi
9	0	21,53	36,93	1,69	3,35	4,46	0,0168	0,0032	0	33,67	101,6499	JL22_1_gt
10	0,0321	19,16	32,27	8,22	0,0995	0,125	6,98	1,3867	0,0344	23,94	92,2478	JL22_2_bt
11	0	21,3	36,81	1,98	2,14	4,35	0,0155	0	0,076	34,46	101,1314	JL22_2_gt
12	0,0828	19,46	26,71	10,53	0,089	0,1909	1,33	0,374	0,0351	30,36	89,1619	JL22_3_bt
13	0	21,14	36,37	1,66	2,05	5,45	0,0354	0,0446	0,0082	33,9	100,6581	JL22_3_gt
14	0,0322	22,59	23,97	12,55	0,0272	0,1138	0,0084	0,1532	0	28,13	87,5749	JL22_chl
15	0	22,26	24	12,25	0,0366	0,1787	0,0161	0,1338	0,0639	28,71	87,6492	JL22_chl2
16	0,0462	21,22	39,48	2,42	22,03	0,0684	0,0832	0,1198	0,0471	2,77	88,2847	JL22_sill?
17	0,0467	23,32	42,76	0,9088	25,72	0	0,026	0,042	0,0095	1,83	94,663	JL22_unkno
18	0,0078	23,37	42,83	0,1479	27	0	0,0295	0,0585	0	1,31	94,7538	JL22_unkno
19	0,1152	29,63	48,11	2,19	0,208	0,0284	10,44	0,096	0,0047	3,22	94,0424	JL22_mu
20	0,104	28,84	47,86	2,65	0,1406	0,0543	10,04	0,1788	0,0373	4,36	94,2651	JL22_mu2
21	0	0,054	99,58	0,016	0,011	0	0,0465	0,046	0,0048	0,0172	99,7756	JL22_mu3
22	0,0466	0,81	46,54	0,0839	0,0622	0,0081	10,09	0	0,0119	0,1038	94,7566	JL22_mu4
45	1,4	35,91	46,27	0,5661	0,0297	0,0372	9,08	0,3682	0,0306	1,44	95,1319	JL4_stl?
46	1,43	36,58	45,62	0,4469	0,0438	0,0678	9,13	0,3439	0,033	1,43	95,1255	JL4_stl2?
47	9,5	23,39	63,41	0,0036	4,07	0,0107	0,0688	0	0	0,0406	100,4937	JL4_and
48	0,0107	0,0253	99,16	0	0,0279	0	0,0109	0	0,0191	0,0093	99,2633	JL4_and2
49	0	0,0528	99,69	0,0112	0,0183	0	0,0123	0,0308	0,0335	0,0111	99,8601	JL4_and3
50	0	59,89	34,42	0,0737	0,0388	0,0532	0	0,0344	0,0283	0,6526	95,1911	JL4_and4
51	0,0186	63,37	36,65	0,0644	0,0302	0,0522	0,0046	0	0,0543	0,6349	100,8792	JL4_and5
60	0,4154	19,45	34,59	9,41	0,0405	0,0927	8,92	1,8	0,0775	20,63	95,4262	JL4_and2_m
61	0,3163	19,37	34,56	8,89	0,0099	0,1411	9,01	1,77	0,0598	20,56	94,6871	JL4_and2_m

## D. AX

Input filer i AX

1)

SiO2 TiO2 Al2O3 Cr2O3 Fe2O3 FeO MnO MgO CaO Na2O K2O

bi jl2.2\_1\_bi

34.98 1.74 19.34 0.00 0.00 21.44 0.15 8.59 0.00 0.16 8.91

g jl2.2\_1\_gt

36.93 0.00 21.53 0.00 0.00 33.67 4.46 1.69 3.35 0.00 0.02

mu JL22\_mu4

46.54 0.00 37.81 0.01 0.00 0.10 0.81 0.08 0.06 0.05 10.09

chl jl2.2\_chl  
23.97 0.15 22.59 0.00 0.00 28.13 0.11 12.55 0.03 0.03 0.01  
\*

2)  
SiO2 TiO2 Al2O3 Cr2O3 Fe2O3 FeO MnO MgO CaO Na2O K2O  
bi jl2bi2  
32.27 1.39 19.16 0.03 0.00 23.94 0.13 8.22 0.09 0.03 6.98  
g JL22gt2  
36.8 0.00 21.30 0.07 0.00 34.46 4.35 1.98 2.14 0.00 0.01  
mu jl22\_mu4  
46.54 0.00 37.81 0.01 0.00 0.10 0.81 0.08 0.06 0.05 10.09  
chl jl2.2\_chl  
23.97 0.15 22.59 0.00 0.00 28.13 0.11 12.55 0.03 0.03 0.01  
\*

3)  
SiO2 TiO2 Al2O3 Cr2O3 Fe2O3 FeO MnO MgO CaO Na2O K2O  
bi jlbi3  
26.71 0.36 19.46 0.04 0.00 30.36 0.19 10.53 0.08 0.08 1.33  
g jlgr3  
36.37 0.04 21.14 0.01 0.00 33.9 5.45 1.66 2.05 0.00 0.035  
mu JL22\_mu4  
46.54 0.00 37.81 0.01 0.00 0.10 0.81 0.08 0.06 0.05 10.09  
chl jl2.2\_chl  
23.97 0.15 22.59 0.00 0.00 28.13 0.11 12.55 0.03 0.03 0.01  
\*

Output filer från AX, vilka även är input filer till THERMOCALC.

1)  
% thermocalc file (requires editing before use)  
phl 0.0336 0.00693 ann 0.072 0.0110 east 0.037 0.0074  
py 0.00068 0.000253 gr 0.00115 0.000416 alm 0.36 0.027  
spss 0.0010 0.000349  
mu 0.51 0.025 cel 0.051 0.0091 fcel 0.014 0.0033 pa  
0.0484 0.0088  
clin 0.0141 0.00363 daph 0.044 0.0078 ames 0.0223 0.00504  
q H2O  
% add your other end-members here  
\*

2)  
% thermocalc file (requires editing before use)  
phl 0.0184 0.00449 ann 0.044 0.0083 east 0.040 0.0078  
py 0.00087 0.000321 gr 0.00032 0.000124 alm 0.40 0.030  
spss 0.00091 0.000334  
mu 0.96 0.048  
clin 0.0133 0.00348 daph 0.042 0.0075 ames 0.0203 0.00472



3)  $\text{phl} + \text{alm} = \text{ann} + \text{py}$

4)  $5\text{ann} + 3\text{ames} = 2\text{phl} + 3\text{east} + 3\text{daph}$

Calculations for the independent set of reactions  
(for  $x(\text{H}_2\text{O}) = 1.0$ )

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)	
1	5.1	2.77	13.54	1.23	0.01230	-3.421	-0.908	1.463	
2	3.3	2.69	16.53	1.07	0.00184	-3.077	-1.263	1.276	
3	5.6	20.93	44.94	0.92	-0.01390	0.285	-5.570	0.916	
4	12.8	33.94	4.34	6.83	0.01490	-0.553	-1.370	2.719	

Average PT (for  $x(\text{H}_2\text{O}) = 1.0$ )

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	4.2	2.5	540	103	0.473	0.91

	P	sd(P)	T	sd(T)	cor	fit	e*	hat
phl	3.64	2.62	560	106	0.401	0.66	0.74	0.13
ann	4.02	2.58	545	104	0.441	0.87	-0.31	0.05
east	3.69	3.31	541	104	0.349	0.90	-0.18	0.54
py	4.31	3.58	548	193	0.774	0.91	-0.03	0.86
alm	4.19	2.54	539	108	0.450	0.91	-0.02	0.04
mu	4.24	2.64	540	104	0.459	0.91	-0.04	0.03
clin	4.80	2.62	520	106	0.400	0.62	-0.82	0.15
daph	4.06	2.57	529	107	0.487	0.88	0.26	0.04







## Activities and their uncertainties

	phl	ann	east	py	alm	mu	clin	
a	0.0182	0.0450	0.0410	0.000890	0.400	0.960	0.0135	
sd(a)/a	0.44903	0.37362	0.38162	0.73519	0.15000	0.10000	0.46867	

	daph	ames	and	q	H2O
a	0.0420	0.0209	1.00	1.00	1.00
sd(a)/a	0.38306	0.43906	0	0	0

## Independent set of reactions

- 1)  $py + 3ames + 4q = 3clin + 4and$
- 2)  $5alm + 15ames + 20q = 12clin + 3daph + 20and$
- 3)  $phl + ames = east + clin$
- 4)  $7phl + 12and = 3east + 5py + 4mu$
- 5)  $ann + 2and + q = alm + mu$
- 6)  $8alm + 8mu + 5ames = 8ann + 4clin + 22and + 4H2O$

## 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	13.3	7.12	-60.33	1.50	-0.00181	1.874	5.713	2.062
2	10.6	6.20	-81.59	9.09	-0.03230	9.208	1.431	8.769
3	7.8	16.35	2.99	0.62	-0.01045	0.345	0.375	0.872
4	8.3	3.43	234.97	2.13	-0.06405	-9.363	-16.823	4.986
5	5.9	1.18	-3.52	1.00	0.00528	-2.415	2.144	0.415
6	6.1	1.39	186.85	8.38	-0.28318	21.203	-15.032	4.399

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 >0.50, point to influential data.

For 95% confidence, fit (= sd(fit)) < 1.54

however a larger value may be OK - look at the diagnostics!

	avP	sd	avT	sd	cor	fit
lsq	5.9	1.0	554	12	0.447	0.70

	P	sd(P)	T	sd(T)	cor	fit	e*	hat
phl	5.87	1.06	555	13	0.380	0.70	-0.09	0.17
ann	5.46	1.26	553	12	0.456	0.63	-0.51	0.37
east	6.15	1.08	553	12	0.385	0.55	0.87	0.18
py	5.86	1.07	554	13	0.498	0.70	0.09	0.18





- 4)  $3\text{east} + 6\text{q} = \text{phl} + \text{py} + 2\text{mu}$
- 5)  $\text{ann} + 2\text{and} + \text{q} = \text{alm} + \text{mu}$
- 6)  $8\text{alm} + 8\text{mu} + 5\text{ames} = 8\text{ann} + 4\text{clin} + 22\text{and} + 4\text{H2O}$

Calculations for the independent set of reactions  
(for  $x(\text{H2O}) = 1.0$ )

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)	
1	11.7	7.14	-60.33	1.50	-0.00181	1.874	6.188	2.068	
2	4.5	13.84	159.73	5.65	-0.02505	1.711	-23.049	3.577	
3	8.8	3.57	234.97	2.13	-0.06405	-9.363	-15.971	5.191	
4	1.9	2.75	13.54	1.23	0.01230	-3.421	-2.670	1.450	
5	5.9	1.20	-3.52	1.00	0.00528	-2.415	2.145	0.421	
6	6.1	1.40	186.85	8.38	-0.28318	21.203	-15.060	4.435	

Average PT (for  $x(\text{H2O}) = 1.0$ )

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 >0.50, point to influential data.

For 95% confidence, fit (= sd(fit)) < 1.54

however a larger value may be OK - look at the diagnostics!

	avP	sd	avT	sd	cor	fit			
lsq	5.8	1.0	547	12	0.446	0.91			
	P	sd(P)	T	sd(T)	cor	fit	e*	hat	
phl	5.61	1.06	549	12	0.385	0.85	-0.66	0.16	
ann	5.33	1.26	546	12	0.455	0.86	-0.52	0.37	
east	6.21	1.08	545	12	0.377	0.59	1.37	0.20	
py	5.82	1.07	548	13	0.495	0.91	-0.23	0.18	
alm	5.64	1.22	546	15	0.613	0.91	0.11	0.23	
mu	5.84	1.15	547	12	0.366	0.91	-0.09	0.12	
clin	5.80	1.04	546	12	0.429	0.85	-0.60	0.04	
daph	5.82	1.09	549	15	0.526	0.91	0.14	0.32	
ames	5.68	1.05	549	12	0.394	0.88	0.46	0.12	
and	5.76	1.03	547	12	0.446	0.91	0	0	
q	5.76	1.03	547	12	0.446	0.91	0	0	
H2O	5.76	1.03	547	12	0.446	0.91	0	0	

T = 547°C, sd = 12,

P = 5.8 kbars, sd = 1.0, cor = 0.446, sigfit = 0.91

=====