



Stockholm
University

Bachelor Thesis

Degree Project in
Geology 30 hp

Petrologiska och geokemiska proxier för kemisk och fysisk vittring efter Snowball Earth

Maria Strand



Stockholm 2019

Department of Geological Sciences
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm

Innehållsförteckning

1. Introduktion	2
1.1 Syfte	2
1.2 Snowball Earth	2
1.3 Kemisk respektive fysisk vittring	4
1.4 Bildning av pseudomorfer	6
1.4.1 Pseudomorfer av aragonit	8
1.5 Aluminiumrik bergart	10
2. Geologisk bakgrund	11
2.1 Islays geologi	11
2.2 Lossit Limestone	12
2.3 Port Askaig Tillit	13
2.4 Bonahaven Dolomit	13
2.5 Jurakvarst	14
3. Metod	16
3.1 Fältmetod och provtagning	16
3.2 Analysmetoder	17
3.2.1 Tillverkning av tunnslip	17
3.2.2 Mikroskopi	17
3.2.3 Handhållen XRF-analys	18
3.3 Information om mikroskopi- och handhållen XRF-analys	18
3.3.1 Information om mikroskopimetod	18
3.3.2 Information om XRF-metod	19
3.4 Felkällor	19
4. Resultat	20
4.1 Analysresultat för eventuella pseudomorfer i BDF	20
4.2 Resultat för den aluminiumrika bergarten som stratigrafisk profil i JKF	27
4.3 XRF-data	29
5. Diskussion av resultat	30
5.1 Eventuella pseudomorfer av aragonit i BDF	30
5.2 Aluminiumrik bergart i JKF	31
5.3 Tolkning av miljö samt klimat	32
5.4 Koppling till hypotesen om Snowball Earth	35
6. Slutsatser	37
7. Tack	38
8. Referenser	39

1. Introduktion

1.1 Syfte

Syftet med denna studie är att testa hypotesen om snowball Earth var följt av perioder med intensiv kemisk vittring och efterföljande fysisk vittring av en kemiskt urlakad berggrund. Studien utfördes på ön Islay i Skottland.

Det första målet är att studera eventuella förekomster av aragonitpseudomorfer inom Bonahaven dolomitformationen på norra delen av ön Islay. Förekomsten av pseudomorfer kan sammankopplas till en kemisk vittring i samband med temperaturökning och ett fuktigare klimat vilket torde bli resultatet av den höga koldioxidhalten som uppstod när snowball Earth upphörde att existera (Perdikouri et al. 2011; Hoffman et al., 1998).

Det andra målet går ut på att dokumentera förekomsten av en aluminiumrik bergart som är lokaliserad på öns södra del och ligger befintlig inom Jurakvartsitformationen. Analysen utförs på utseende och sammansättning i denna aluminiumrika bergart som utgörs av bandad kvarts samt muskovit. Studien går ut på att hitta samband mellan denna bergartsformation och andra undersökningar omkring klimatet som avslutade snowball Earth kopplad till en övergång från hög kemisk vittring till omfattande fysisk vittring av en kemiskt urlakad berggrund.

1.2 Snowball Earth

Den proterozoiska eonen (2500-541 miljoner år sedan) avslutades med den neoproterozoiska eran som är det väsentliga tidsspännet i denna studie (Gibbard & Fan, 2013). Erans tidsintervall sträcker sig från 1000 till 541 miljoner år sedan och omfattar tre perioder; Tonium (1000-720 miljoner år sedan), Kryogenium (720-635 miljoner år sedan) och Ediacara (635-541 miljoner år sedan) (Cohen et al., 2013).

Tonium inleddes med Grenvilles bergskedjebildning som varade mellan 1300 och 900 miljoner år sedan (Gaucher et al., 2009). Under samma tidsperiod skapades superkontinenten Rodinia av Grenville samt andra globala bergskedjebildande händelser (Li et al., 2008). Den initiala kontinentalspridningen av Rodinia påbörjades för 825 miljoner år sedan och är associerad med en eller flera superplymer som orsakade episodisk magmatisk aktivitet för 825, 780 och 750 miljoner år sedan (Gaucher et al., 2009; Li et al., 2008). För 740 miljoner år sedan övergick kontinentalspridningen till en oceanisk spridningsrygg som splittrade Rodinia,

detta skedde mellan 750 och 600 miljoner år sedan som dessutom öppnade Japetushavet och blev resultatet av flera dotterkontinenter (Gaucher et al., 2009; Li et al., 2008).

Geologiska bevis oberoende av varandra har påvisat följsamma snowball Earth-episoder som indikerar global glaciation där istäcken har nått tropikerna (Hoffman et al., 2017; Hoffman & Schrag, 2002). Paleomagnetisk data bekräftar att iskanten nådde ekvatorn åtminstone två gånger under Neoproterozoikums glaciala episoder (Hoffman et al., 1998). De vidsträckta glaciala avsättningar följt av kapkarbonater vid låga latituder på olika paleokontinenter resulterade i att Joseph Kirschvink presenterade hypotesen om snowball Earth (Hoffman et al., 2017; Rooney et al., 2015). Kapkarbonat är en indikation på en plötslig förändring av hög karbonatutfällning under varmt klimat och har en distinkt sedimentologisk, geokemisk samt isotopisk karaktär (Hoffman & Schrag, 2002).

De glaciala episoderna är uppdelade i panglaciala epoker så kallade "cryochron", den äldsta cryochron är känd som Sturtian och den yngre som Marinoan (Hoffman et al., 2017). Sturtian varade mellan 717 och 659 miljoner år sedan följt av en interglacial period mellan 659 till 645 miljoner år sedan som med relaterade tektoniska bakgrundsförhållanden utlöste vittring och förbrukning av koldioxid på tidsskalan 1-10 miljoner år och ledde till en ny glacial epok vid namn Marinoan som upphörde för 635 miljoner år sedan (Hoffman et al., 2017; Rooney et al., 2015). Sturtian är förknippad med det stora oxidationshändelseförloppet och Marinoan är kopplad till uppkomsten av multicellulära organismer (Hoffman et al., 2017).

Följande sekvens i stratigrafien efter dessa cryochron är ovannämnda lager av postglaciala kapkarbonater (Hoffman et al., 2017). Vissa platser av neoproterozoiskt postglacialt ursprung består av stora sedimentära järnformationer i samband med kapkarbonat (Hoffman et al., 1998).

Ursprunget för glaciationerna har skapat kontroversiella synpunkter. Hypotesen om snowball Earth menar att snowball Earth har skapats genom positiv albedoeffekt med ett istäcke som skydde vattenytan samt ett kontinentalt istäcke med en ojämn och tunn karaktär på grund av att den hydrologiska cykeln eliminerades när vattnet frös eller inkapslades (Hoffman et al., 1998). Hypotesen möjliggör en förklaring till fyndet av glaciala avsättningar vid låg latitud på paleokontinenter. För att övervinna den positiva albedoeffekten tog en extrem växthuseffekt fart när vulkanisk aktivitet belägen nära ytan ökade den atmosfäriska koldioxidhalten till ca 350 gånger den moderna nivån och skapade ett abrupt slut på snowball Earth. Mängden koldioxid som överfördes till havet resulterade i en snabb utfällning av kalciumkarbonat i

varmt ytvatten som skapade globalt förekommande kapkarbonater. Ett förseglat hav av havsis som blev övermättat på upplöst järn fällde ut dessa när havsisen retirerade och resulterade i efterlämnade sedimentära järnformationer (Hoffman et al., 1998). Representativa bevis på en klimatförändring som resulterade i marina miljöer efter snowball Earth i kapkarbonater är makropeloider, stromatoliter, barytkristaller och tubkristaller samt det överliggande kalkstenslagret som innehåller rikligt med aragonitkristaller och finkorniga kiselklaster bildade i djupt vatten (Okubo et al., 2018).

Bortsett från snowball Earth finns andra föreslagna förklaringar om glaciationerna (Fairchild & Kennedy, 2007).

- Blixtlåsspridning på jorden, glaciationer som förekommer i olika geologiska perioder och är kopplad till gränser av kontinentalspridning.
- En högt tiltad jord som omfattade glaciationer vid låga latituder på grund av jordens sneda position.
- Slushbolls-jorden innebär att det förblev öppet vatten vid ekvatoriella regioner i samexistens med glaciärer på kontinenter som nådde havsnivå i tropikerna (Fairchild & Kennedy, 2007).

1.3 Kemisk respektive fysisk vittring

Vittring är en geologisk process som består av två delar; kemisk och fysisk vittring (Carrol, 1970). Genom vittring av bergarter skapas jordavlagringar. Hastigheten för nedbrytning av bergarter beror på bergartens sammansättning, textur samt den kemiska miljön av pH- och Eh-förutsättningar i området där bergarten är lokaliserad. Den kemiska vittringen består av reaktioner mellan bergarten, atmosfären och vatten. Silikatreaktioner sker vid urlakning av vatten under låga temperaturer, ca 30°C inom det atmosfäriska trycket och fuktigt klimat. Resultatet av kemisk vittring blir kvarlämnade oxiderade ytor på bergarterna och en kemisk lösning som innehåller utfällda grundämnen från den ursprungliga bergarten. Först bryts de svagaste bindningarna isär, såsom K^+ , Na^+ och Ca^+ i fältspat. Den fysiska vittringen bryter ner solida bergarter i fragment och sker främst under mycket kalla eller varma och torra klimatförhållanden. I måttliga klimatförhållanden samverkar kemisk och fysisk vittring och det kan vara svårt att skilja på fysiska från kemiska vittringsprocesser (Carrol, 1970).

Glaciala depositioner som ger en indikation på fysisk vittring under den neoproterozoiska eran är kontinentala tilliter och sedimentavsättningar från smältvatten följt av en regolithorisonnt innehållande tydliga polygonala sandväggar (Hoffman & Schrag, 2002). Dessa avlagringar utmärker en period när ablation överträffade utfällning. Följande strata i lagringen

av det glaciala händelseförloppet består av kapkarbonater, en av många förklaringar påstår att dessa är utfällda från glacialt smältvatten av hög alkalinitet som interagerade med karbonatrika glaciala avsättningar. Andra förklaringar påpekar att dessa avlagringar är utfällningar från ett övermättat hav täckt av is, se sektion 1.2. Glaciationen av snowball Earth efterlämnar frostsprängda bergartsfragment och postglacialt finsediment. Dess deglaciation är associerad med en extrem växthuseffekt som innebär en koldioxidhalt $> 10\%$ och leder till att karbonatisk sur nederbörd träffar landskap och skapar en intensiv kemisk vittring som kemiskt urlakar berggrunden innan efterföljande fysisk vittring kommer igång, allteftersom klimatet värms upp. Den första kemiska förändringen domineras av karbonatvittring under tiden som havsvattennivåerna återställs ändras förutsättningarna på den kemiska vittringen som fokuserar på silikater. Detta sänker koldioxidhalten i atmosfären och utfällningar av kapkarbonat inträffar. Förhållanden för deglaciation kräver varmt samt oxiskt ytvatten i kombination med kallt djupvatten av högre salinitet (Hoffman & Schrag, 2002).

Sedimentologiska formationer och geokemiska anomalier som ligger inkapslade i kapkarbonater karaktäriserar extrema miljöförhållanden efter snowball Earth som resulterade i höga temperaturer, en kraftig hydrologisk cykel samt en extrem kontinental vittring (Le Hir et al., 2009). Framtagna modeller som representerar den förhöjda växthuseffekten har visat att den hydrologiska cykeln endast intensifierar måttligt eftersom den genomsnittliga förångningen begränsas när temperaturen har stigit tillräckligt att den totala absorberade solinstrålningen uppnås. Modellerna visade också att atmosfären innehöll 350 gånger högre halt av koldioxid än nuvarande atmosfär. Detta innebär att den maximala urladdningen av upplösta grundämnen under kontinental vittring efter snowball Earth uppnår 10 gånger det moderna flödet, under förutsättning att slipning av kontinental yta har genomförts av isflak. Resultatet visade att tiden som krävs för att eliminera koldioxidhalten till preglaciala nivåer är några miljoner år. Ytterligare resultat visar att silikatvittring startade direkt efter depositionen av kapdolostenarna (Le Hir et al., 2009).

1.4 Bildning av pseudomorfer

I denna studie observerades förekomst av eventuella pseudomorfer efter aragonit som en indikator av en geologiskt förgången miljö. En äldre och simpel definition av pseudomorfism inom mineralogin innebär att pseudomorfen av ett specifikt mineral har ersatt det ursprungliga mineralet genom en särskild process och bibehållit samma yttre form som det föregående mineralet, därmed namnet pseudomorf som på grekiska betyder ”falsk form” (Kloprogge & Lavinsky, 2017). Denna definition inkluderar inte alla dagens upptäckter såsom efterlämnade håligheter från borttagen kristall i en grundmassa eftersom dessa inte har ersatts av ett annat mineral men trots allt räknas till pseudomorfism i nuvarande register över pseudomorfer. Ett annat exempel är fossiler; när pseudomorfer har ersatt ett ursprungligt organiskt material istället för ett mineral. Karaktäristiskt när ett mineral ersätter ett annat mineral innebär att pseudomorfen inte förändrar volym oavsett om det föregående mineralet har en euhedral kristallform, en oregelbunden gränsyta till en grundmassa, ett aggregat eller omfattar ett inbäddat kristallkorn. Pseudomorfen ska bevara den ursprungliga texturen eller strukturen antingen som en enskild kristall eller som ett bergartsmassiv i större skala (Kloprogge & Lavinsky, 2017).

Den hittills mest kompletta definitionen i modern tid inkluderar nio punkter samt underkategorier av vilken åtminstone en kategori ska uppnås för att kunna klassificeras som en pseudomorf (Kloprogge & Lavinsky, 2017);

- ”Paramorf, transformation av pseudomorf. Detta är resultatet av polymorfism som tillåter en kemisk förening eller ett grundämne att existera i flera kristallstrukturer, exempel kol som diamant eller grafit.
 - Enantiotropisk, reversibel. Exempel alfakvarts till betakvarts till alfakvarts igen, som kan styras av temperatur.
 - Monotropisk, irreversibel. Exempel grafit efter diamant.
- Metamikt, alfapartiklar har med strålning skadat den originella kristallstrukturen. Exempel låg zirkon efter hög zirkon.
- Exsolution av pseudomorf, upphettade kristaller som blir labil under avsvalnande och separeras till två mineral.
- Alterneringspseudomorf, kemiska reaktionsprocesser.
 - Avger en komponent, exempel koppar efter kuprit eller azurit.
 - Upptar en komponent, exempel talk efter kvarts.
 - Partiellt utbyte av en komponent, exempel goethit efter pyrit.

-
- Byte av alla komponenter, exempel kvarts efter kalcit, baryt eller fluorit.
 - Ytbehandlad och andra altherningar av artefakter, exempel det sekundära kopparmineralet som i modern tid omger frihetsgudinnan.
 - Ersättande pseudomorf, partiell upplösning eller kemisk utfällning av en ny substans.
 - Infiltration, kiselmodifierad trämassa; kisel fyller tomrum i träet.
 - Ersättning, exempel koppar efter aragonit.
 - Pseudomorfbeläggningar, ett nytt material ersätter kristallmolekyler utan att påverka formen.
 - Epimorf, yttre lagret av en kristall ersätts med ett nytt material men innehållet förblir det ursprungliga mineralet.
 - Perimorf, fungerar som epimorf men innehållet urlakas och lämnar ett hålrum.
 - Narben, ett föregående mineral efterlämnar spårbara ärr i ett nytt mineral exempel rökiga kvartskristaller efter fluoritkristaller.
 - Formar och avgjutningar av polyhedroider (pseudo-pseudomorf), kiselutfyllnader mellan tunna horisontella lager av föregående kalcit.
 - Fossil, mineral som ersätter döda organismer.
 - Förstening
 - Formar
 - Avgjutning
 - Komplex kombination av ovanstående punkter eftersom den naturliga världen sällan följer enkla regler.
 - Okända, skymda, falska eller högt kontroversiella pseudomorfer” (Kloprogge & Lavinsky, 2017).

De solida tillståndsprocesserna saktas ned vid jordens yta under lägre temperatur och tryck i jämförelse med mantelns miljö eller djupt ner i jordskorpan (Kloprogge & Lavinsky, 2017). Vattenlösning är en påskyndande faktor som effektiviserar mineraltransformationen vid jordytan genom att fungera som ett massöverföringsmedium. Under transformationen krävs att upplösning av reaktanter samt att kristallisationsfasen har samma hastighet för att kunna bevara volym och form av föregående mineral (Kloprogge & Lavinsky, 2017).

1.4.1 Pseudomorfer av aragonit

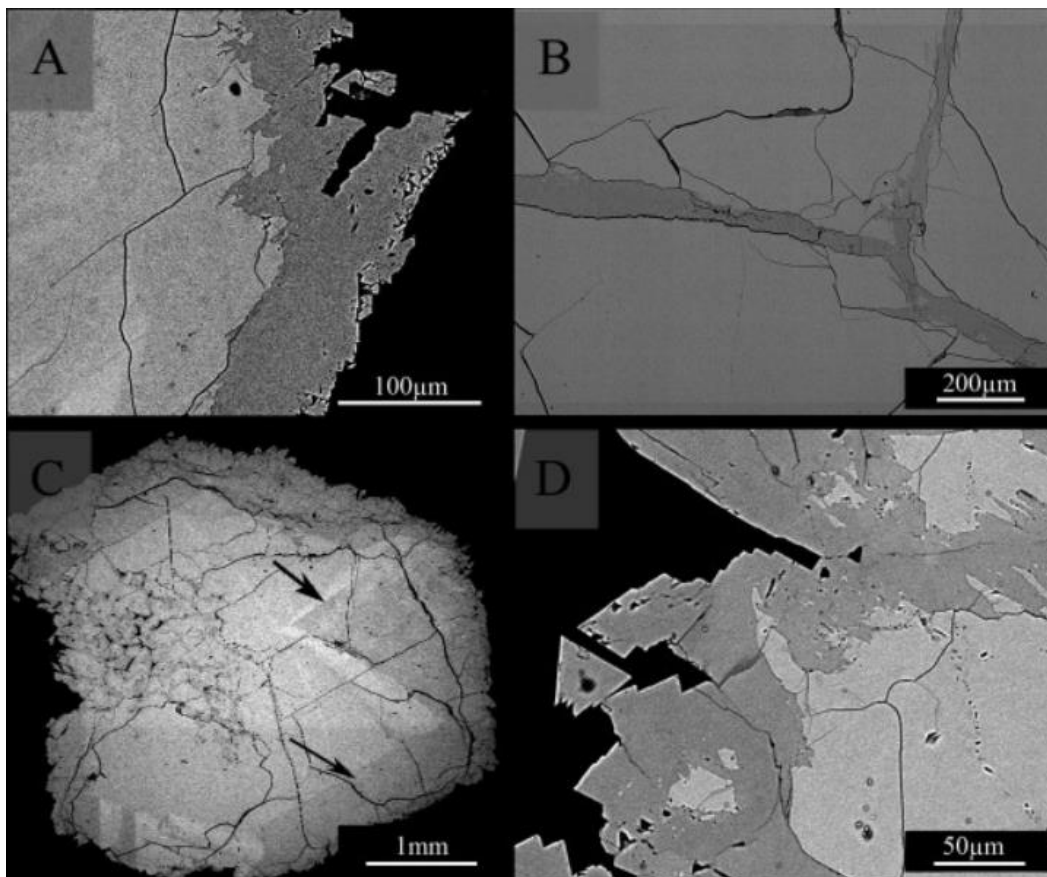
De två vanligaste polymorferna av kalciumkarbonat, CaCO_3 , är aragonit och kalcit. Aragonit har en kemisk karaktär identisk med mineralet kalcit som kan alternera aragonit eftersom aragonit är relativt labilt (Bonewitz, 2008; Perdikouri et al., 2011).

Via utfällning av kalciumkarbonat i havsvatten kan kristalltillväxt av kalcit eller aragonit bildas (Berner, 1974). Eftersom kalcit och aragonit har en identisk sammansättning styrs bildningen av aragonit respektive kalcit främst av tryck och temperatur, jämviktskurvan mellan aragonit och kalcit påvisar att aragonit kräver högre tryck och lägre temperatur än kalcit vid bildningsprocessen (Winter, 2014). När trycket sedan avtar och temperaturen ökar omvandlas aragonit till kalcit (Winter, 2014). Aragonitbildning är ofta associerad med depositioner av gips (Andrews & Schaller, u.å.). Förekomst av utfällda magnesiumjoner i havsvattnet påverkar kristalliseringen av kalciumkarbonat genom att gynna bildandet av aragonit istället för kalcit. Accepterade förklaringar för detta fenomen indikerar dels att magnesiumjoner hämmar transformationen i låg temperatur av aragonit till kalcit via upplösning och återutfällning. En annan förklaring innebär att magnesium hämmar kristalltillväxt eller kärnbildning av kalcit och faller därför snabbare ut som aragonit. Ett alternativ är att magnesium upptas i kristallstrukturen av kalciumkarbonat vilket termodynamiskt destabiliserar kalcit från att bildas eller att magnesium skapar en fördröjningseffekt som nästintill hämmar kristalltillväxt av kalcit och därmed gynnar bildning av aragonit (Berner, 1974).

Perdikouri et al. (2011) har utfört en experimentell studie på aragonitkristaller som har blivit ersatt av kalcit under hydrotermala förhållanden med en temperatur mellan 160 och 200°C. Morfologin och formen av aragonitkristallen bevarades och ersättningsprocessen till kalcit åtföljdes med sprickor och håligheter i kalciten samt ökad fraktionering i ursprungskristallen, se figur 1. En accepterad termodynamisk förklaring innebär att aragonit oavsett ursprung transformeras till kalcit trots okända parametrar som förhindrar eller främjar omvandlingen (Perdikouri et al., 2011). Under ersättningsprocessen genereras en stress i kristallen genom att molvolym ökar och är med stor sannolikhet resultatet av sprickbildningen i aragonit. Frakturerna fungerar som ett transportsystem i kristallen och medför en lateral spridning av reaktioner som gör att kärnbildning av kalcit kan förekomma på olika lokaliseringar inom aragoniten och därmed ökar pseudomorfismens hastighet. Kalciten förekommer som två huvudtyper där den första innebär att kalcit växer över de nyligt exponerade ytorna som bildas av frakturerna i aragonit samt de yttre ytorna av reagerade områden på kristallen. Denna kan

igenkänns med euhedraala eller semieuhedraala kristalltexturer på ytan eller i sprickor. Den andra huvudtypen innebär att kalcit ersätter aragonit i form av rims eller spridning i kristallen från de nybildade spricksystemet som igenkänns genom en oregelbunden gränssyta till aragoniten (Perdikouri et al., 2011).

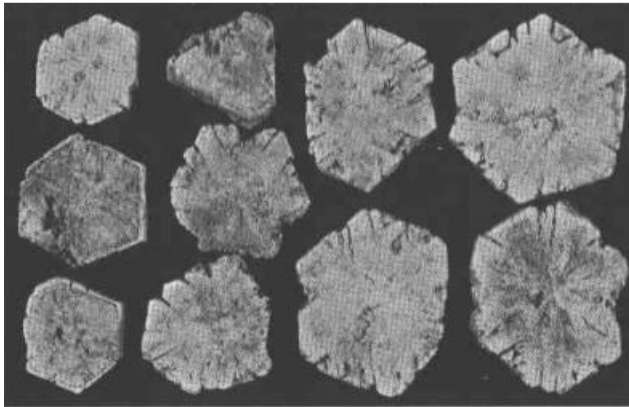
Aragonitkristaller uppvisas som pseudomorfer i neoproterozoiska kapkarbonater som havsbottenutfällningar (Okubo et al., 2018). Dessa bildas under neutrala eller alkalina pH-förhållanden, en genomsnittligt låg sedimentationshastighet och klastiskt vittrat material i samband med förekomst av utfällt järn under anoxiska förhållanden som förhindrar karbonatkärnbildning, höjer alkaliniteten och skapar istället aragonit (Okubo et al., 2018).



Figur 1. A) Ersättning och överväxt av kalcit på aragonit. B) Ersättande kalcit via sprickor. C) Ytterkanten och delar av den centrala zonen har ersatts av kalcit. Pilarna pekar på heterogena, ej ersatta områden av distribuerande Sr-halt. D) Tydliga överbevuxna romboedraala kalcitkristaller (Perdikouri et al., 2011).

Bortsett från kalcit kan aragonit pseudomorferas av koppar, gymnit och kisel-pseudomorfer som kvarts eller kalcedon (Andrews & Schaller, u.å.). Ytterligare exempel på en något ovanligare pseudomorfism av aragonit är dolomitisation i form av kalksten. Dolomit som pseudomorf byggs upp i små romboedraala former i varierade riktningar medan den

hexagonala kristallformen av aragoniten bibehålls av dolomit, se figur 2 (Andrews & Schaller, u.å.).



Figur 2. Pseudomorfer av dolomit efter aragonit (Andrews & Schaller, u.å.).

1.5 Aluminiumrik bergart

Under kemisk och fysisk vittring förblir kvarts oförändrad i bergarter eftersom mineralet anses vara stabilt under de flesta förhållanden när det gäller påverkan av kemisk förändring till skillnad från fältspat som är relativt labilt under utsatta förhållanden av kemisk vittring eller alternering som vanligtvis leder till lermineral (Blatt et al., 2006). Mineralogiskt när en jordmån är utsatt för vittring kvarstår de mest stabila och resistent mineralen i den övre delen av lagringen som kvarts, kaolinit, zirkon och turmalin. Detta beror på att de stabila mineralen är uppbyggda av kovalenta bindningar, exempel Al-O eller Si-O, medan de joniska bindningarna lättare bryts isär, exempel Na-Cl. Under de mest extrema fuktiga och tropiska klimat med intensiv kemisk vittring är ren aluminiumrika och kiselrika föreningarna de enda kvarstående.

Förståelsen för vittringsprioriteten kan representeras av Bowens reaktionsserie, det mest lättvittrade mineralet är olivin, följt av pyroxen, kalciumrik plagioklas, amfibol, natriumrik plagioklas, biotit, ortoklas, muskovit och kvarts. Kristaller med exponerade ytor, sprickor, klov, gränslinjer eller tvillingytor vittrar fortare än kristaller som inte uppfyller dessa kriterier (Blatt et al., 2006).

Bauxit och aluminiumlaterit är exempel på sammansättningar vars majoritet utgörs av amorf eller kristallin aluminiumhydroxid och bildas i tropiska eller subtropiska miljöer. De enda sammansättningarna inklusive kvarts som kvarstår efter omfattande kemisk vittring (Blatt et al., 2006).

2. Geologisk bakgrund

Kapitlet beskriver kort den geologiska bakgrunden till Islay som inkluderar bergartslagringar för studieområden med särskilt fokus på fyra bergartsformationer i stratigrafin som är relevant för hela studien.

2.1 Islays geologi

Islays geologi inleds med Rhinnskomplexet som bildades för 1 800 miljoner år sedan under ett tidigt stadie av superkontinenten Columbia (Webster et al., 2015). Ovanliggande stratigrafisk enhet är känd som Dalradian supergrupp som har uppmätts i tjocklek till minst 25 km och avsattes under tiden Islay var en del av superkontinenten Rodinia mellan 800 och 600 miljoner år sedan vilket innebär att det finns ett glapp i sekvensen som omfattar 1 000 miljoner år (Webster et al., 2015; Stephenson et al., 2012). Rodinias kontinentalspridning skapade Iapetushavet och resulterade i förkastningsbassänger som fylldes med den yngsta Dalradian supergruppssekvensen som består av Colonsay- och Bowmoregruppen (Webster et al., 2015). Efterföljande grupper såsom Appin och Argyll är avsatt sediment i en marin golfström samt öppet hav på kontinentalsockeln. Iapetushavet stängdes omkring 470 miljoner år sedan då en vulkanbåge kolliderade med Islay, dess bergarter utsattes för högt tryck och successivt som den kaledoniska bergskedjebildningen tog plats blev bergarterna begravda ca 20-30 km ner i jordskorpan. Under bergskedjebildningen blev dess strata veckad som kom att forma Islays antiklinala bergveck (Webster et al., 2015).

Det axiella planet för Islays antiklinala bergveck stupar åt sydväst vilket innebär att bergvecket sticker upp i nordöst och innehåller de minst deformerade bergarterna för Dalradians supergrupp på Islay (Skelton et al., 2015). Normalt skulle en veckaxel innehålla de mest deformerade bergarterna men Skelton et al. (2019) föreslår att Islays minst deformerade bergarter i veckaxeln kan bero på kanaliserade fluider längsmed en skjuvzon i veckbenet och därmed berövades fluiderna som skulle ha transporterats genom veckaxeln men istället bevarades bergarterna på denna lokalisering. Formationen har genomgått regional metamorfos av graden greenschistfas (Skelton et al., 2015).

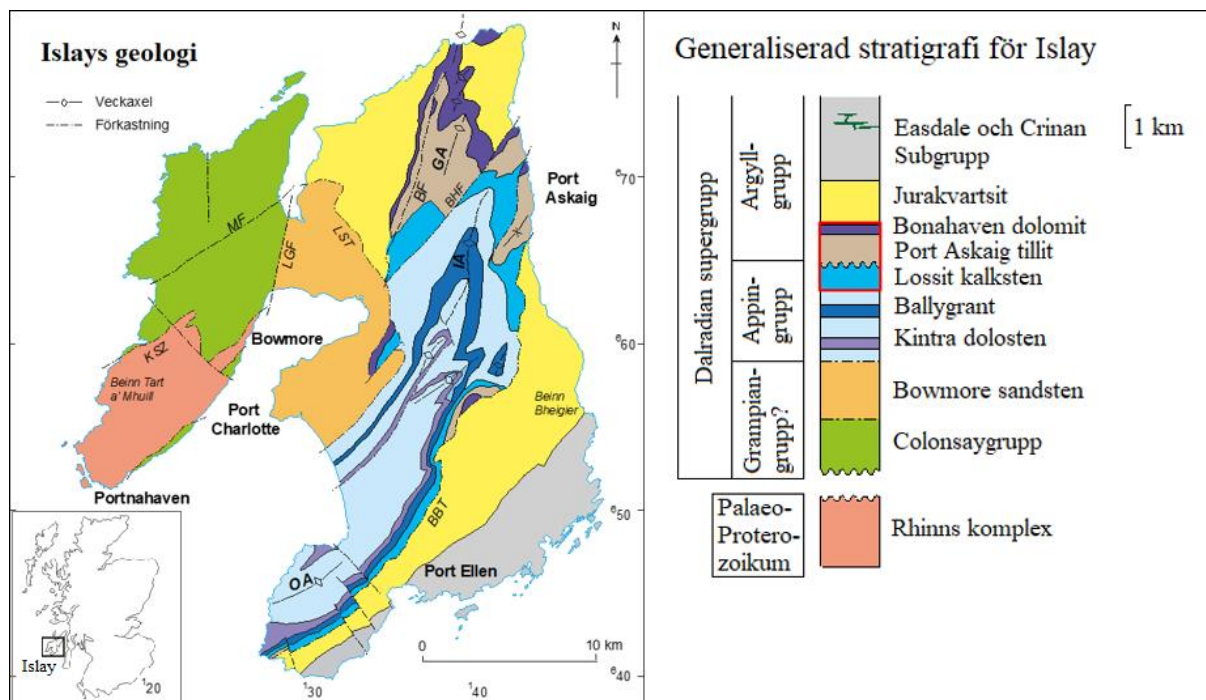
Under metamorfosen steg den maximala temperaturen till 410-470°C samt ett tryck som uppnådde 1.0 ± 0.2 GPa (Skelton et al., 1995). En stor volym av flytande metamorfa vätskor använde Islays antiklinala bergveck som en passage (Skelton et al., 2015).

Kaledoniderna eroderades ner på Islay för ca 430 miljoner år sedan och exponerade de begravda bergarterna (Webster et al., 2015). Trots vulkanisk aktivitet i 200 miljoner år

omkring ön har bergarterna bevarats med yngre vertikalt insprängda vulkaniska gångar från perioden då Nordamerika bröts lös från Eurasien och skapade norra Atlanten, ca 55 miljoner år sedan (Webster et al., 2015).

Fyra bergartsformationer beskrivs nedan i djupare detalj med väsentlig information till studien, se figur 3. Formationerna är befintliga inom Appin- och Argyllgruppen.

Appingruppens avslutande bergartssekvens består av Lossit Limestone, en kalksten som skapades under varma klimatförhållanden (Webster et al., 2015). Argyllgruppen inleds med den världsberömda Port Askaig tillit innehållande ett antal diamiktiter som formades under glaciala förhållanden då istäcken sträcktes globalt över jorden, tillhörande hypotesen om snowball Earth. Efterföljande sekvens består av Bonahaven dolomitformationen som innehåller tidiga bevis av liv på jorden. Slutligen överläggs sekvensen med en bergartsformation vid namn Jurakvartsit (Webster et al., 2015).



Figur 3. Karta över Islays geologi och stratigrafi (modifierad från Webster et al., 2015).

2.2 Lossit Limestone

Lossit Limestone (LL) eller Islay Limestone är den översta bergartsformationen uppbyggd av kalksten och dolosten som utgör en del av Appingruppen (Webster et al., 2015). Denna formation innehåller stromatoliter, mikrobiella karbonatbergarter som avsattes i hav under tropiska klimatförhållanden, samt ooliter som formas under hög aktivitet av grunda cirkulerande vattenströmmar. Lossit Limestone är en bergart som finns på hela Islay, antingen

uppvisas i sin lagringsformation eller som block i dolomitisk breccia som har brutits lös av förkastningar och avsatts på nytt av slamströmmar i djupt vatten (Webster et al., 2015).

2.3 Port Askaig Tillit

Argyllgruppen som ligger lokaliserad ovanpå Appingruppen inleds med en 1 100 meter tjock formation vid namn Port Askaig tillit (PAF) som består av 47 diamiktitlagringar tolkade som tillit och innehåller block, sten samt småsten i olika rundade grader av varierande ursprung (Dilshad et al., 2017; Webster et al., 2015). Majoriteten av de äldsta diamiktiternas klaster består av dolosten och kalksten medan högre upp i litologin återfinns klaster av granit, gnejs, amfibolit och kvartsit (Webster et al., 2015). Detta är en tydlig indikation att de första glaciala isrörelserna eroderade lager av formationer exempelvis LL som hade exponerats under Argyllgruppen tills dessa var borteroderade. De senare glaciationerna hade transporterat material under en längre sträcka och resulterade i andra bergartsklaster såsom granit, gnejs, amfibol och kvartsit. Den eventuella avsättningsmiljön för diamiktiterna är belägen nära havsnivån, skapad av grundad is (Webster et al., 2015). Avgränsningarna mellan diamiktiterna har interglacialt ursprung med en skarp gräns som indikerar en drastisk klimatförändring från glacial till interglacial miljö och representerar olika bergartsformationer, de vanligaste är uppbyggd av siltsten-, dolosten- och sandstenslagringar som avsattes i grunda havsområden (Dilshad et al., 2017; Webster et al., 2015). I enstaka fall förekom markbundna avsättningsmiljöer indikerat av evaporiter, också tidvattensmiljöer indikerat av symmetriska krusningsmärken och/eller stromatoliter (Marshak, 2008; Webster et al., 2015). De översta inbäddade diamiktiterna uppvisar en evolutionsgradering av litologin, från glaciala förhållanden till periglaciala till icke-glaciala förhållanden av iskilspolygoner, frostsprängda klaster samt kryoturbationer (Dilshad et al., 2017). Totalt innehåller formationen 25 periglaciala episoder, 28 glaciala episoder samt 23 episoder utan glacialt ursprung (Dilshad et al., 2017). Port Askaig tillit har använts som ett bevis till att snowball Earth har existerat (Webster et al., 2015).

2.4 Bonahaven Dolomit

Formationen som ovanliggert PAF är känd som Bonahaven dolomitformationen (BDF) där teorier omkring denna hävdar att formationen är kapkarbonaten till PAF (Webster et al., 2015). Förutsatt att snowball Earth har existerat krävs globalt lokaliserade bevis på kapkarbonater eftersom det var ett världsomspännande event med en extremt hög halt av koldioxid som tillsammans med växthuseffekten accelererade vittring och därmed utfällning av karbonater (Webster et al., 2015).

Majoriteten av BDF består av orangegula, järnrika dolomitiska bergarter som utgör fem delar och inleds med första delens metallerstenar av låg metamorf grad (Geoff Tanner et al., 2013).

Andra delen inleds med ett tjockt lager av kvartsit som innehåller vågkrusningsmärken samt krympningsfrakturer följt av en bäddning som har utsatts av intermittenta flöden och bildat alternerade sand- samt lerlager, så kallad flaserlagring och vågkrusade metasandstenar (Webster et al., 2015; Tanner et al., 2013).

Tredje delens krossbäddade metasandstenar innehåller ett baslager av metakonglomerat med inkluderande granitiska klaster likt övre sekvensen i PAF orsakat av vattendrag (Tanner et al., 2013). Fairchild (1980) beskriver formationen uppdelad i tre sekvenser som en generell kombination av dolomitiskt och kiselinnehållande sediment avsatt under ett stormevent i grunda marina förhållanden och som uppvisar en linsformad och graderad lagring med krusningslamination genererat av vågor.

Fjärde delen utgörs av inbäddade metasandstenar, metasiltstenar samt metallerstenar som omfattar korslamining, flaserlagring samt två uppsättningar av vågkrusande lager som genomskär (Tanner et al., 2013).

Femte delen utgörs av dolomitisk sandsten som på vissa positioner har vittrats i form av en honungskaka vilket också är klassifikationen på detta vittringsfenomen (Tanner et al., 2013).

BDF uppvisar generellt ett varmt klimat i kustmiljö av grunda hav i form av mikrobiella karbonatbergarter, så kallade stromatoliter (Webster et al., 2015).

2.5 Jurakvartsit

Överliggande strata av BDF är Jurakvartsitformationen (JKF) som med dess tjocklek, krossbäddning, kiselstensrika kvartsit och vitvittring indikerar en stor skillnad av miljön som har formats under en djupare tidvattenmiljö på kontinentalsockeln (Webster et al., 2015; Stephenson et al., 2012; Geoff Tanner et al., 2013). Detta kan ha representerat första utvecklingsstadiet av en potentiell golfström som kontinuerligt öppnades under en stark aktivitet av tidvattenströmmar (Webster et al., 2015). Formationens tjocklek varierar på öns olika lokaliseringar från 1 500 till 5 000 meter vilket beror på att sedimentdistributionen samt tjockleken har kontrollerats av kurvade extensionsförkastningars aktivitet, så kallade listriska förkastningar (Webster et al., 2015). Jurakvartsit finns exponerat på både östra och västra sida av Islays antiklinala bergveck (Stephenson et al., 2012).

Tanner et al. (2013) beskriver en vit muskovitrik bergart som tillhör Jurakvartsiten och innehåller inslag av kloritoidbärande sammansättning samt vita bladiga porfyroblaster av kyanit som har altererats av pyrofyllit och kaolinit. Enligt Barrovians mineralzonssekvens bildas kyanit vanligtvis i en högmetamorf grad, amfibolitfas, denna kyanit ligger inom kloritzonen och har bildats under en lägre metamorf grad, så kallad greenschistfas eftersom klorit finns närvarande. Det indikerar att deformationen som uppstod under metamorfos skapades under en upphettning av 430°C. Tanner et al. (2013) menar att sedimentet som bergarten har deriverats ifrån har ett ovanligt högt aluminiuminnehåll som har bidragit till att kyanit har bildats under en låg metamorf grad.

3. Metod

3.1 Fältmetod och provtagning

Som tidigare beskrivits har Islay en intressant geologisk historia som omfattar hypotesen om snowball Earth. Följderna av en sådan process torde skapa ett motsatt klimat och medför ett antal nya processer som efterlämnar spår, därmed valet av studien för kemiska respektive fysiska vittringsprocesser. Efter tidigare besök på Islay observerades anhydrit, polygonala lersprickbildningar samt stromatoliter som antyder på ett varmt klimat. Sannolikt ska vittring ha startat under samma period, dvs. i sekvensen för BDF följt av JKF. Provtagning sker därför på två olika positioner av ön som finns belägna inom dessa två bergartsformationer.

På västra sidan av norra Islay vid positionen N 55°55'32.47", V 6°11'00.95" togs fyra prover ur ett bergmassiv vid strandkanten med hjälp av en geologhammare samt skyddsglasögon. Dessa prover tillhör BDF och är uppbyggd av en komplex droppstensliknande struktur baserad på densitetsskillnader. Hypotesen som testades är att detta lager kan innehålla pseudomorfer av aragonit vilket kan förklara dess höga densitet och droppstensstruktur. Proverna fraktades till Stockholms Universitet för att sedan studeras i form av tunnslip.

En stratigrafisk profil framtogs som ytterligare en studie, längsmed en strandsektion som tillhör JKF och är lokaliserad på sydöstra delen av ön Isle of Islay nära fyren Carraig Fhada. Profilen började vid N 55°37'13.92", V 006°12'55.76" där den undre lagringen av bergartsformationen är exponerad och avslutades nära civilisation vid N 55°37'30.63", V 006°13'13.17" ca 400 meter NNV från startpositionen. Lagringen lutade 45°N och genom att följa lutningen möjliggjordes lokaliseringen av den äldsta (SSÖ) samt yngsta strata (NNV). Datainsamlingen utfördes med en måttstock för att kunna mäta tjockleken i centimeter på lagringarna i bergartsformationen och dikterades via trådlösa, brusreducerande och kvalitetsmärkta hörlurar som kopplades till en mobil, detta på grund av dåliga väderförhållanden som försvårade dokumentationen i form av anteckningar. Datainsamlingen i fält delades upp i fem olika kategorier beroende på deras skiffergradering som antas ligga mellan muskovit (högst skiffergrad) och kvarts (ingen skiffergrad). Ca 3-7 prover av varje skiffergradering samlades i provpåsar som markerades med en permanent penna för att separera på bergartskategorierna och senare kunna analysera dessa med en handhållen XRF.

Mineralgradering	Skiffergradering
Muskovit	Väldigt hög
Mest muskovit	Hög
Hälften muskovit, hälften kvarts	Måttlig
Mest kvarts	Låg
Kvarts	Väldig låg – ingen

3.2 Analyismetoder

Efter fältmetod och provtagning användes följande metoder för vidareanalyseringar.

Analysmetod	Produktnamn	Grundämnesomfattning
Mikroskopi	Leica 135899 Nikon 513020	-
Handhållen XRF	Olympus innov-X: Delta Premium	¹² Mg och uppåt
Kalkyler samt grafitning	Excel 2013	-

3.2.1 Tillverkning av tunnslip

Proverna som inkluderade eventuella pseudomorfer av aragonit skickades till Stockholm Universitet där en förberedelse för sex tunnslipar påbörjades. I universitetslaboratoriet skars bitar ut i storlek 40x20 mm från proverna med hjälp av en såg. Dessa delar valdes noga ut för att tunnsliparna ska innehålla maximal information om texturen samt kontakter mellan varierande bergarter inför framtida mikroskopstudier. Delarna bestod av två uppsättningar av olika tjocklekar. Den bredare delens ena sida täcktes av silikonkarbid och namngavs med årtal (18), lokal (NI = Norra Islay) samt nummerordning (ex. 01) för att senare kunna sammankopplas med respektive tunnslip. Den tunnare delen fastsattes på en glasskiva i storleken 45x25 mm och namngavs på samma sätt. Slutligen skickades tunnsliparna till Vancouver Petrographic Ltd för tillverkning av tunnslip.

3.2.2 Mikroskopi

Två polariserande petrografiska mikroskop av olika märken, Nikon och Leica, användes vid analysen av tunnslipar. Nikon var uppkopplad till en EC3-kamera om gjorde det möjligt att kunna studera tunnslipen på en dataskärm samt fota sektioner. Utseende och textur studerades via detta mikroskop. Leica med förstoring av 2,5x, 20x och 40x användes för att kunna

beräkna proportioner av olika mineral. Mikroskopets mekaniska X-Y-plattform var uppkopplad till en dator som innehöll ett program där varje siffra på tangentbordet kunde programmeras genom att sammankoppla denna till ett specifikt mineral. Genom att trycka på rätt siffra som symboliserade mineralet som precisionskorset i mikroskopet centrerade, förflyttades x-ledet automatiskt 0,1 mm av den mekaniska X-Y-plattformen under en förstoring av 40x. Denna metod möjliggjorde att mineralproportionen kunde beräknas för respektive bergart.

3.2.3 Handhållen XRF-analys

De insamlade proverna inom de fem olika skiffergraderingarna analyserades vid ett senare tillfälle med en handhållen XRF för att studera halter av olika grundämnen och eliminera felkällor under fältbedömning i områden med diffus skiffergrad.

Den handhållna anordningen kalibrerades inledningsvis med en titanbricka, sedan genomfördes minst tio mätpunkter på proverna inom varje kategori för att uppnå ett mer noggrant resultat och öka reliabiliteten för studien. Metoden används för att studera halterna av kalium/(kalium + kisel), dessa halter som visualiseras i ett diagram ska indikera andelen muskovit som varje prov innehåller och ger därmed ett resultat av skifferkategorierna som kunde jämföras för att se om kategorierna som fastställdes med blotta ögat i fält var korrekt tolkade. Den kemiska formeln för muskovit är $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ och för kvarts är SiO_2 vilket innebär att kisel är befintlig i båda mineral medan kalium är befintlig endast i muskovit (Klein & Philpotts, 2013). Om kaliumhalten successivt ökar i samband med halten av muskovit innebär att XRF-datan överensstämmer med fältanalysen för skiffergraderingarna.

Datakollektionen överfördes till excel, $\text{K}/(\text{K}+\text{Si})$ beräknades följt av en medelvärdeskalkyl för respektive kategori inklusive standardavvikelse för att kunna plotta avvikelser i grafen från medelvärdet.

3.3 Information om mikroskopi- och handhållen XRF-analys

3.3.1 Information om mikroskopimetod

Ett polariserande petrografiskt mikroskop kan identifiera olika optiska egenskaper hos mineral (Klein & Philpotts, 2013). Det kräver att mineralet är tillräckligt tunt för ljus att passera igenom vilket tillåter ljuset att böjas och brytas under en långsammare hastighet. Planpolariserat ljus begränsas till att endast vibrera i ett plan, genom att addera en till polariserad ljuskälla och orientera denna i 90° till den första polariserade ljuskällan skapas en interaktion mellan ljuset och mineralstrukturen som uppvisar många optiska egenskaper. Med

kunskap och förståelse för ljusets beteende som passerar ett material samt effekten hos mineral som utsätts för tvärpolariserat ljus är detta en bra analysmetod för att studera petrologi (Klein & Philpotts, 2013).

3.3.2 Information om XRF-metod

XRF står för röntgenfluorescens (X-Ray Fluorescence), enheten bestrålar med röntgen ett prov av fast material med elektronövergångar i de inre elektronskalen för att ge ett resultat av elementmångfalden i provet (Winter, 2014). Återgången för energiska elektroner till grundtillståndet utsänder fluorescerande röntgenstrålar med ett individuellt spektra för röntgenstråleintervallet av högre energi. För att dessa ska kunna diffundera krävs ett orienterat kristallgitter där en röntgendetektor sedan kan uppfatta spridningen av spektrumet som utsänds och sammankopplar utsläppet av korresponderande energi till ett individuellt grundämne. Mätningen kan ske ner till endast ett fåtal PPM och anses vara en noggrann analysmetod (Winter, 2014).

3.4 Felkällor

Felkällor baseras huvudsakligen på mänskliga faktorer. Under mikroskopin genomfördes vissa generaliseringar; när gränsen mellan två mineral centrerades under proportionsberäkningen kunde endast ett av dessa mineral fastställas.

För studien av den aluminiumrika bergarten låg de olika skiffergraderingarna i fält nära varandra vilket kan ha lett till några missbedömningar samt att den mättes i hela centimeter istället för millimeter vilket medförde avrundningar. XRF-analysen kunde inte beräkna lätta grundämnen, dvs. grundämnen som är lättare än Mg. Vissa felmätningar av XRF kan ha orsakats av skakningar eller en yta som inte var helt plan. För att minska felkällor under XRF-analyserna insamlades data för ett antal analyser av samma prov inom varje skiffergradering och sedan beräknades medelvärde och standardavvikelse för respektive kategori.

4. Resultat

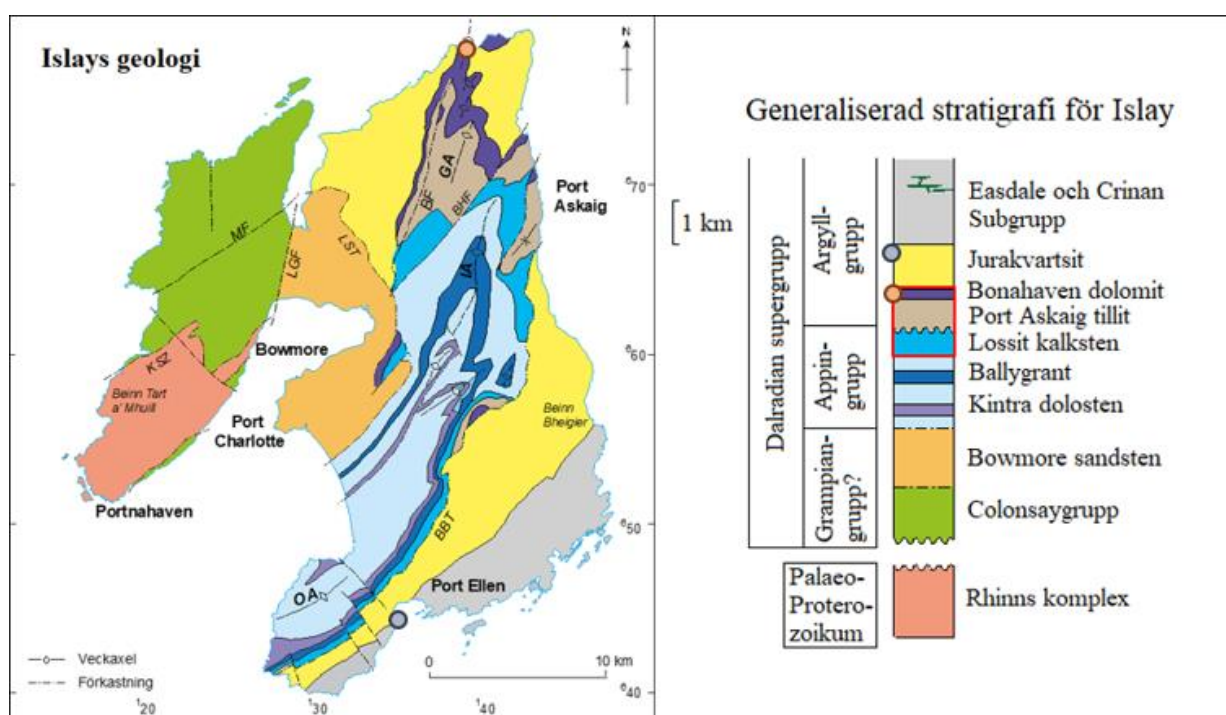
Den röda punkten på den geologiska kartan av Islay samt stratigrafikolumnen i figur 4 symboliserar studieområdet för eventuella pseudomorfer av aragonit i BDF.

Bergartsformationen som innehåller övergången till en varmare klimatsekvens som stratigrafiskt bildades efter PAF dvs. tidsintervallet som omfattar bergartlagringen av tilliter kopplat till hypotesen om snowball Earth.

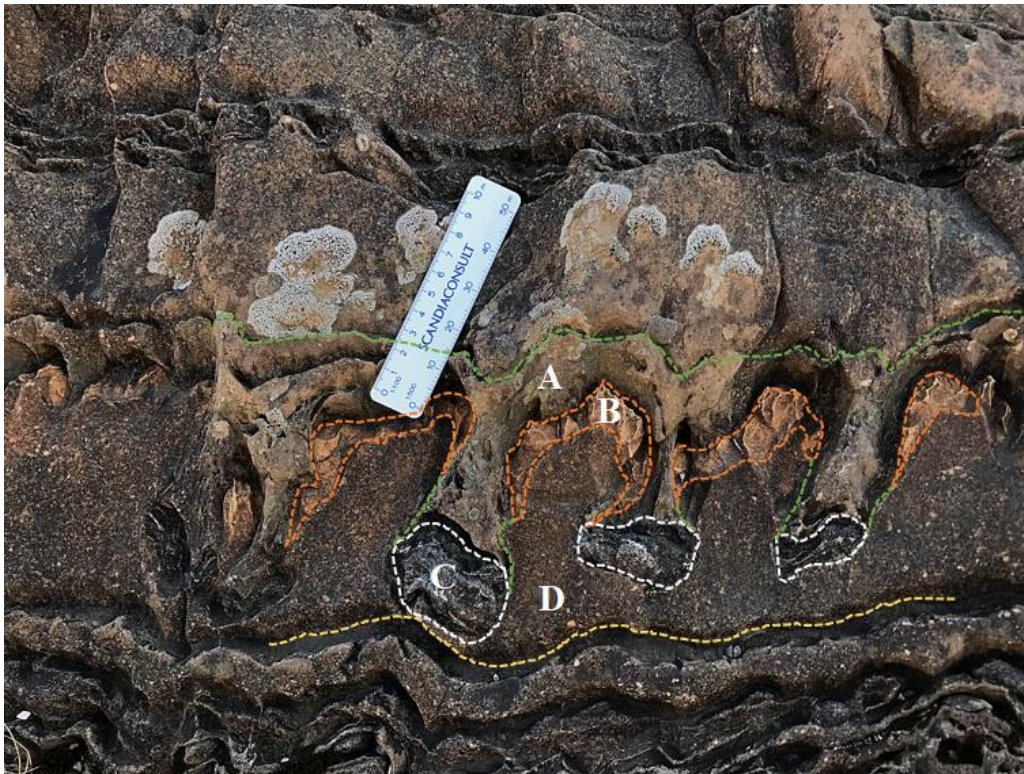
Den blå punkten symboliserar studieområdet för den aluminiumrika bergarten och är lokaliserad i JKF som stratigrafiskt bildades efter BDF.

4.1 Analysresultat för eventuella pseudomorfer i BDF

Den horisontella lagringen av intresse som är lokaliserad på den röda punkten i figur 4 är ca 1,5 meter lång och 20 cm hög i klippblocket. Den består av fyra bergarter som är markerade A, B, C och D i figur 5. Alla fyra bergarter har en finkornig textur av sedimentärt ursprung. Bergarten, markerad som C utgör gråsvarta semirundade kluster i storlek ca 6x4 cm och är omgiven av lager D. Dessa kluster ser ut att ha droppat genom lager A och B, sedan avstannat i lager D. Den horisontella kontakten mellan lager A respektive B till lager D har rubbats av att C har trängt sig ner i D. Lager B uppvisar en starkt oxiderad yta, däremot vid färska exponerade ytor visar den en ljusgrå sammansättning och påminner därför om A som tenderar att ha en mindre naturligt oxiderad yta än B.



Figur 4. Positioner på karta och stratigrafikolumn för provtagning och datainsamling.



Figur 5. Strata för bergartsformationen som innehåller potentiella pseudomorfer av aragonit, respektive lager är definierat som A, B, C och D.

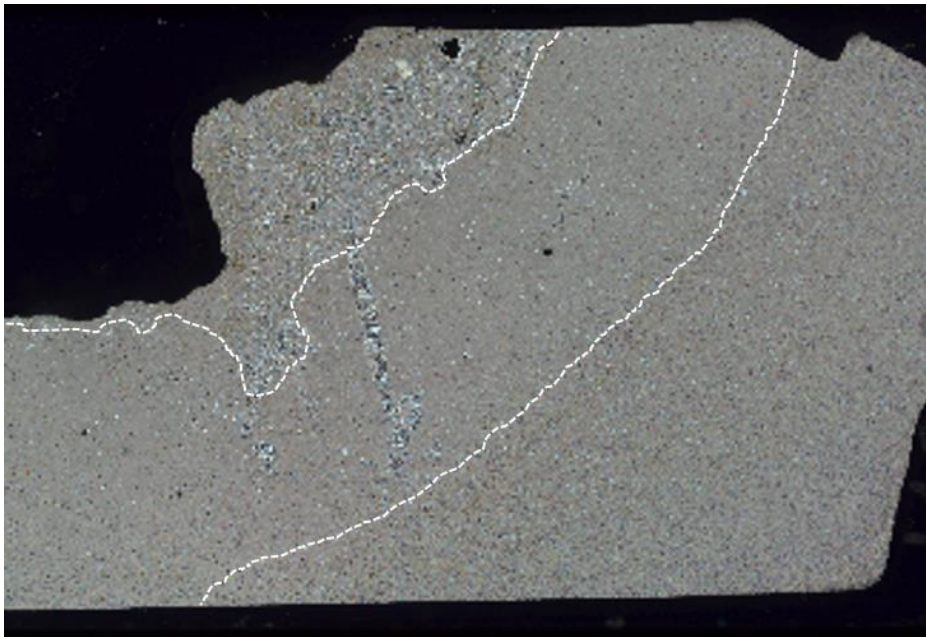
Mikroskopistudien utfördes på sex tunnslipar med huvudsakligt fokus på bergart C som utgjorde droppstensstrukturen bestående av högre densitet än omgivande bergarter.

TUNNSLIP, NUMMERORDNING	INNEHÅLLANDE BERGARTSLAGER
18NI01	A och måttlig mängd av B
18NI02	A
18NI03	A och små fragment av B
18NI04	A och mindre mängd av C samt D
18NI05	A, C och D
18NI06	A och D

Utifrån selektion av tunnslipar valdes nr 18NI05 att studeras i mer djupgående detalj eftersom denna uppvisade tydliga gränser och bestod av tre lager som var identifierbara och innehöll fragment av lager A och D utöver C, samtliga analyserades, se figur 6 och 7. Tunnslip nr 18NI05 är sannolikt utskuren ur en liknande del som den streckade rektangeln i figur 8.



Figur 6. Tunnslip nr 18NI05 skapades från detta bergartsfragment som uppvisar lagerföljden.

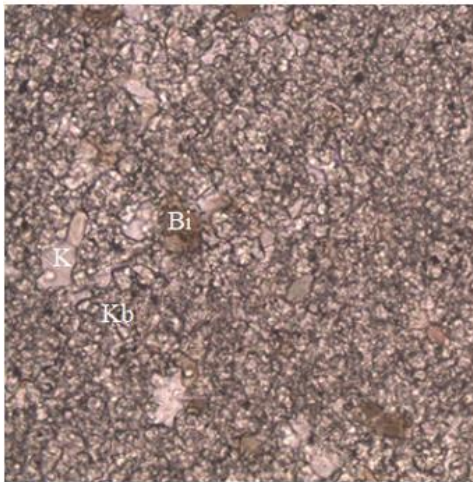
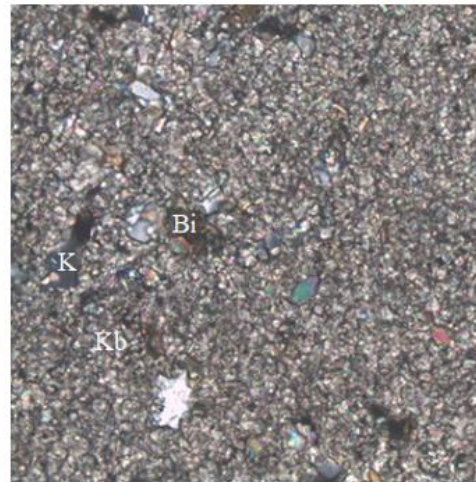


Figur 7. Tunnslip nr 18NI05 i tvärpolariserat ljus med markerade kontakter mellan lager.

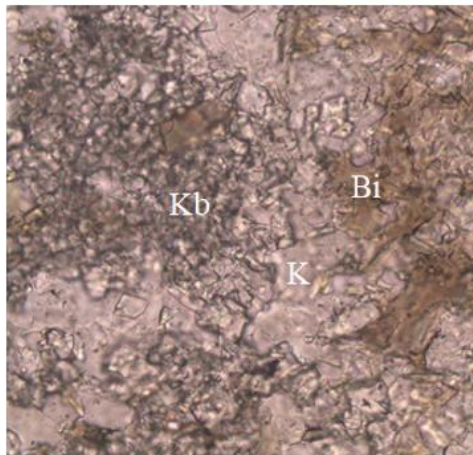
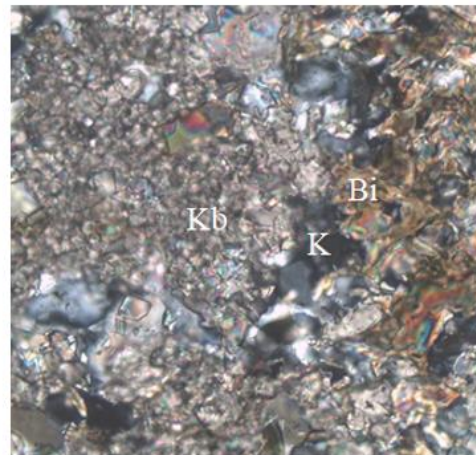


Figur 8. Markerad rektangel visar ett potentiellt exempel på ett område som tunnslip nr 18NI05 är skapad ifrån.

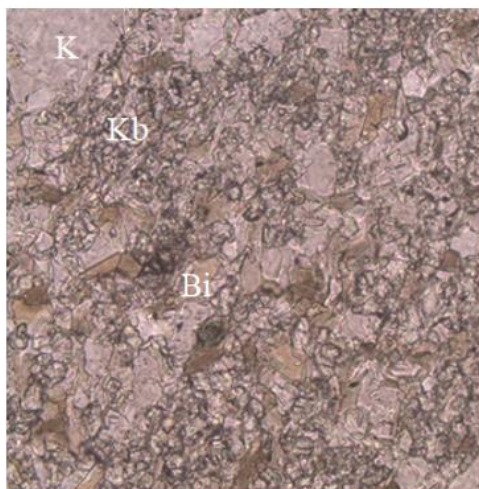
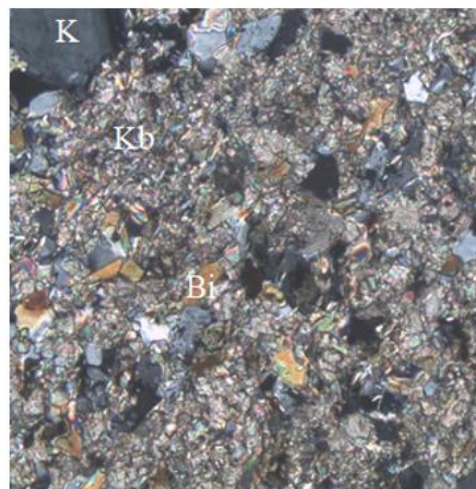
Figur 9, 10 och 11 visar bild på ett område i lager A, C respektive D under planpolariserat samt tvärpolariserat ljus med 40x förstoring. Tre mineral identifierades; karbonat, biotit och kvarts. Kristaller av kvarts och biotit var aningen större än karbonat trots en finkornig textur för hela lagerföljden. Storleken på kvarts och biotit varierar mellan olika lager där C och D tenderar att ha aningen större kornstorlek än B. Lagerföljden uppvisar ingen tydlig orientering på kristallerna. Formen för karbonat och kvarts är semirundade medan biotit är mer kantformad. En överblick på tunnslipen visas i figur 7.

Planpolariserat ljus*Tvärpolariserat ljus*

Figur 9. En sektion av lager A i plan- samt tvärpolariserat ljus. K = kvarts, Bi = biotit, Kb = Karbonat.

Planpolariserat ljus*Tvärpolariserat ljus*

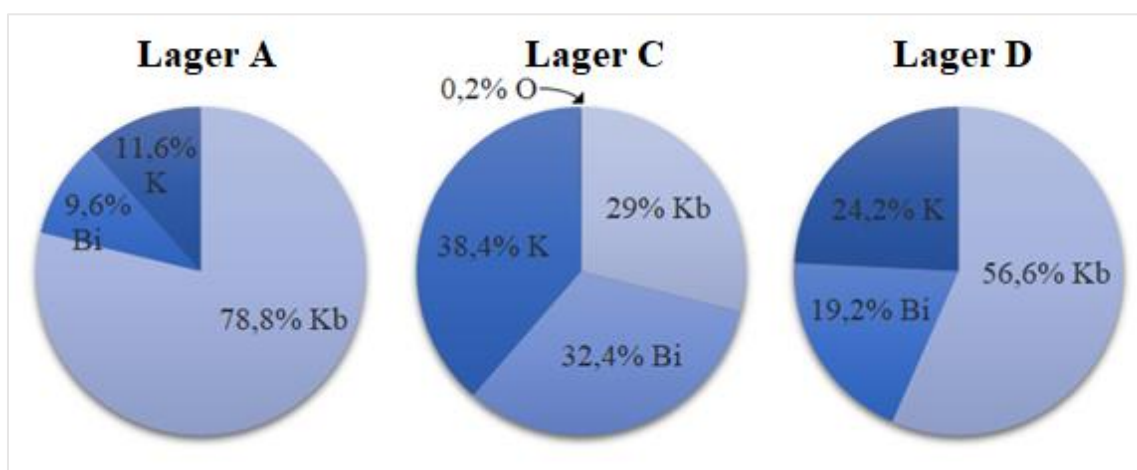
Figur 10. En sektion av lager C i plan- samt tvärpolariserat ljus. K = kvarts, Bi = biotit, Kb = Karbonat.

Planpolariserat ljus*Tvärpolariserat ljus*

Figur 11. En sektion av lager D i plan- samt tvärpolariserat ljus. K = kvarts, Bi = biotit, Kb = Karbonat.

Proportionen såg ut att variera för lagerföljden och vidare studerades genom att systematiskt beräkna mängden av varje mineral för respektive lager. Resultatet presenteras i tabellen nedan och visualiseras i figur 12. Lager A innehöll mest karbonat följt av D. C hade en jämn proportion mellan karbonat, biotit och kvarts medan D innehöll ca 10 % mer kvarts respektive biotit än lager A.

Litologi	Karbonat	Biotit	Kvarts	Opak	Total
Lager A (%)	78,8	9,6	11,6	-	100
Punkter	394	48	58	-	500
Felmarginal (%)	3,7	2,6	2,8	-	-
Lager C (%)	29	32,4	38,4	0,2	100
Punkter	145	162	192	1	500
Felmarginal (%)	4,1	4,2	4,4	0,4	-
Lager D (%)	56,6	19,2	24,2	-	100
Punkter	283	96	121	-	500
Felmarginal (%)	4,4	3,5	3,8	-	-

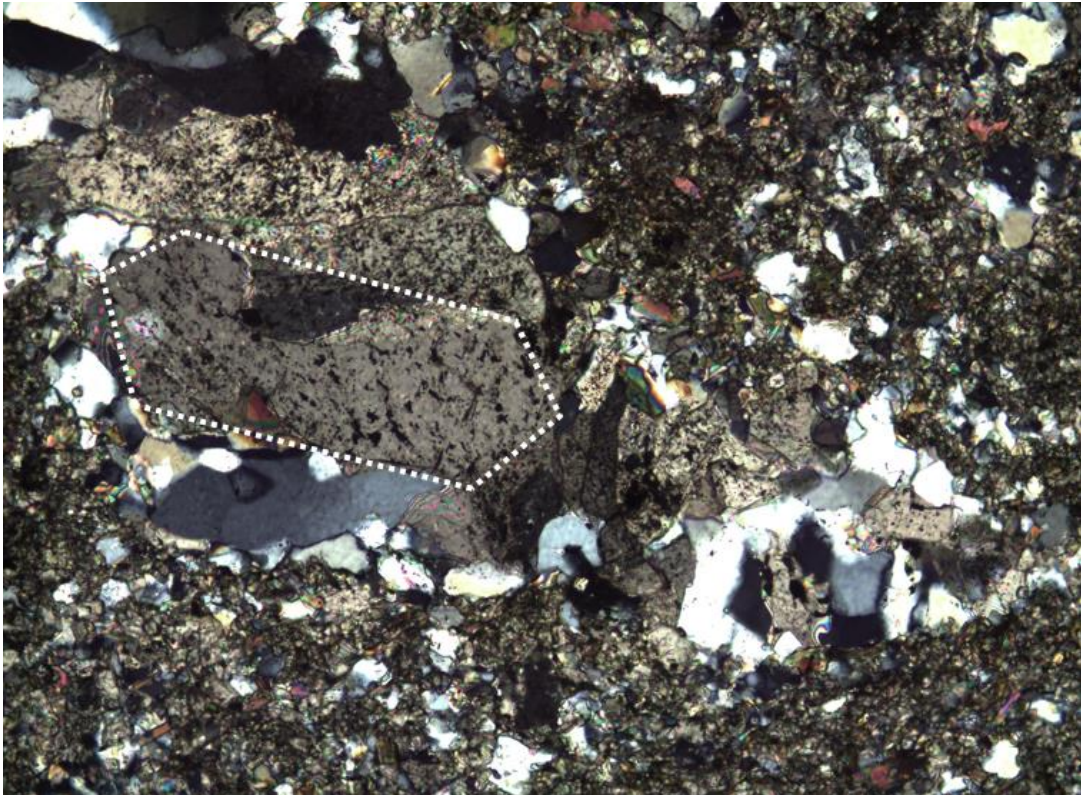


Figur 12. Mineralproportion för respektive lager. K = kvarts, Bi = biotit, Kb = Karbonat, O = Opaka mineral.

En större subhedral kristall i lager C med en hexagonal form innehållande kalcit gick att urskilja från grundmassan i planpolariserat ljus, se figur 13. Under tvärpolariserat ljus noteras två små deformationer längsmed båda långsidor av kristallen varav den nedre deformationen uppvisar en tydlig biotitkristall, se figur 14. Kalcitkristallen innehåller en generell trend av orienterade sprickor i ca 135 graders vinkel till kristallytan. Den övre belägna deformationen inom kristallstrukturen omfattar samma spricksystem under en mörkare nyans dominerat av kalcit.



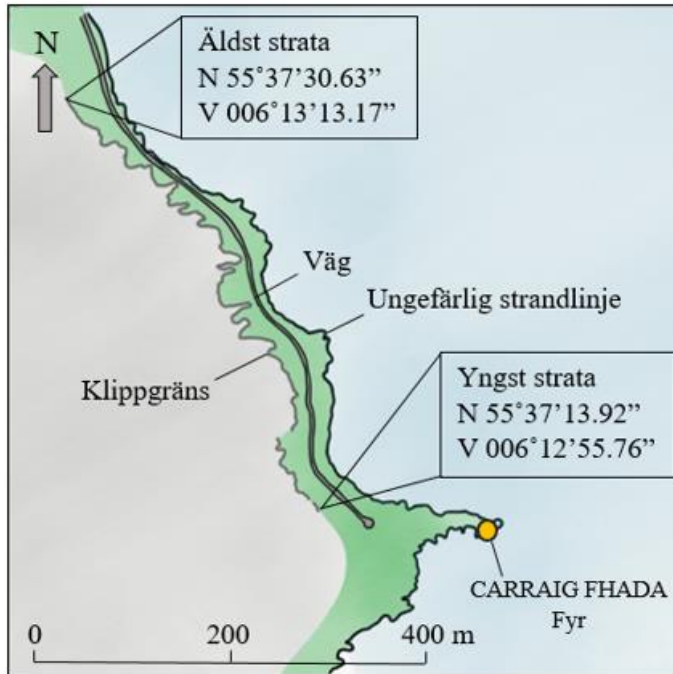
Figur 13. Markerad hexagonal kristallform innehållande karbonat i lager C visualiseras under planpolariserat ljus.



Figur 14. Markerad hexagonal kristallform innehållande karbonat i lager C visualiseras under tvärpolariserat ljus.

4.2 Resultat för den aluminiumrika bergarten som stratigrafisk profil i JKF

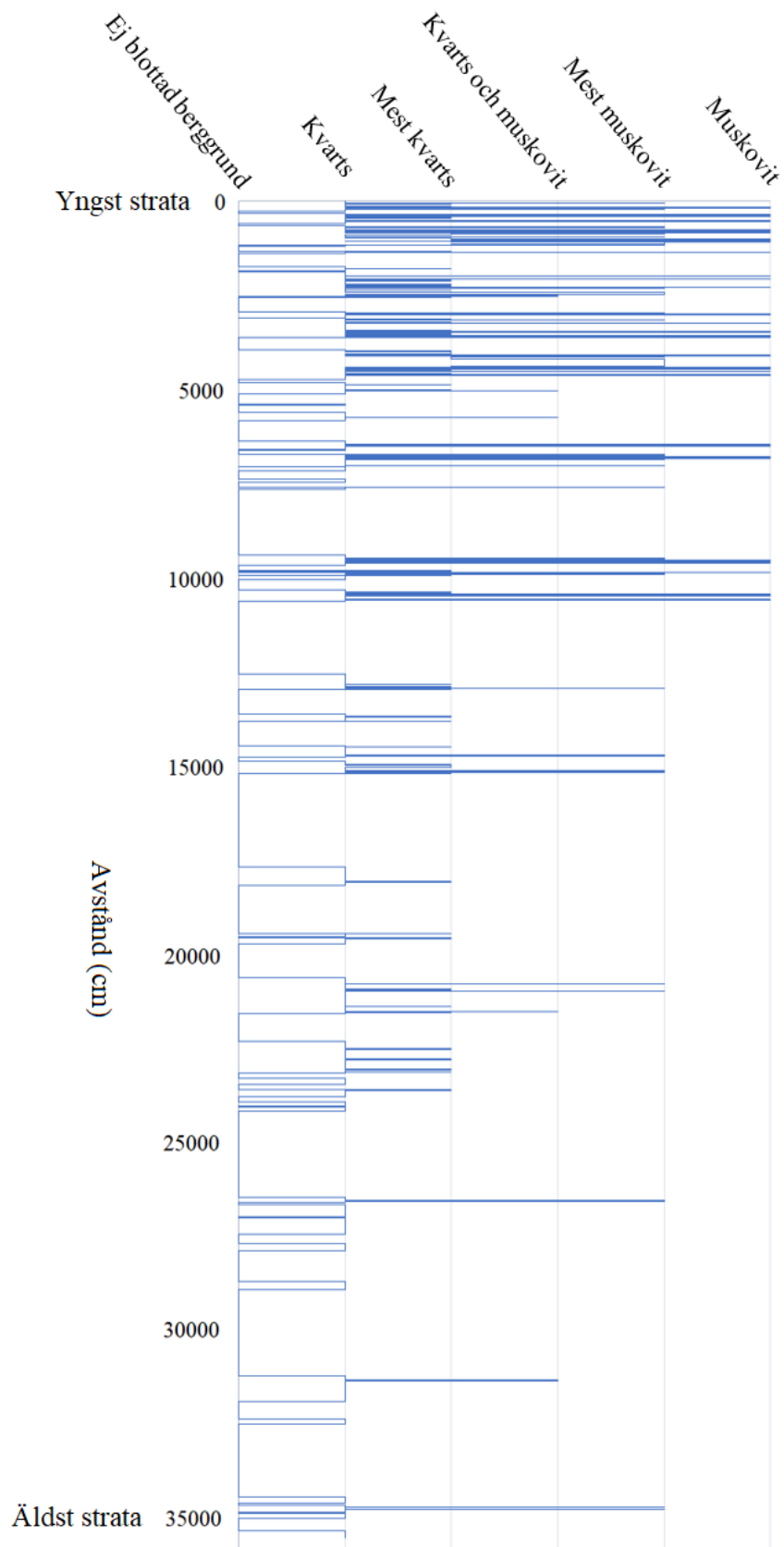
Profilens lokalisering symboliserar den blå punkten i figur 4. En simpel illustration som visar strandsektionen med den exponerade klippsekvensen som analyserades visas i figur 15.



Figur 15. Illustration över studieområdet där klippgränsen som analyserades är markerad med grå linje. Konturerna är framtagna av bilder från Google Earth.

Resultatet av analysen presenteras som en överblick på hela sekvensen i form av en stratigrafisk profil i figur 16. Profilen är uppbyggd av ett linjediagram där linjen integrerar skiffergraderingarna som omnämndes i sektion 3.1. Tjockleken på formationen uppmättes till ca 355 meter där den yngre stratan utgör den översta delen av diagrammet, följt av en successivt äldre strata längre ner i formationen.

Profilen visar att den yngre lagringen har ett tätare och mer komplext intervall av kvarts samt muskovit i jämförelse med den centrala och äldre delen som omfattar ett återkommande mönster mellan muskovit och kvarts även om den inte når lika höga halter av muskovit som den yngre sekvensen. Klippsekvensen innehöll inte alltid blottad berggrund vilket innebar att sekvensen mättes horisontellt och omräknades med 45° vinkel för att få fram höjden på strata som saknades. Denna vinkel framtogs med hjälp av en klinometer.

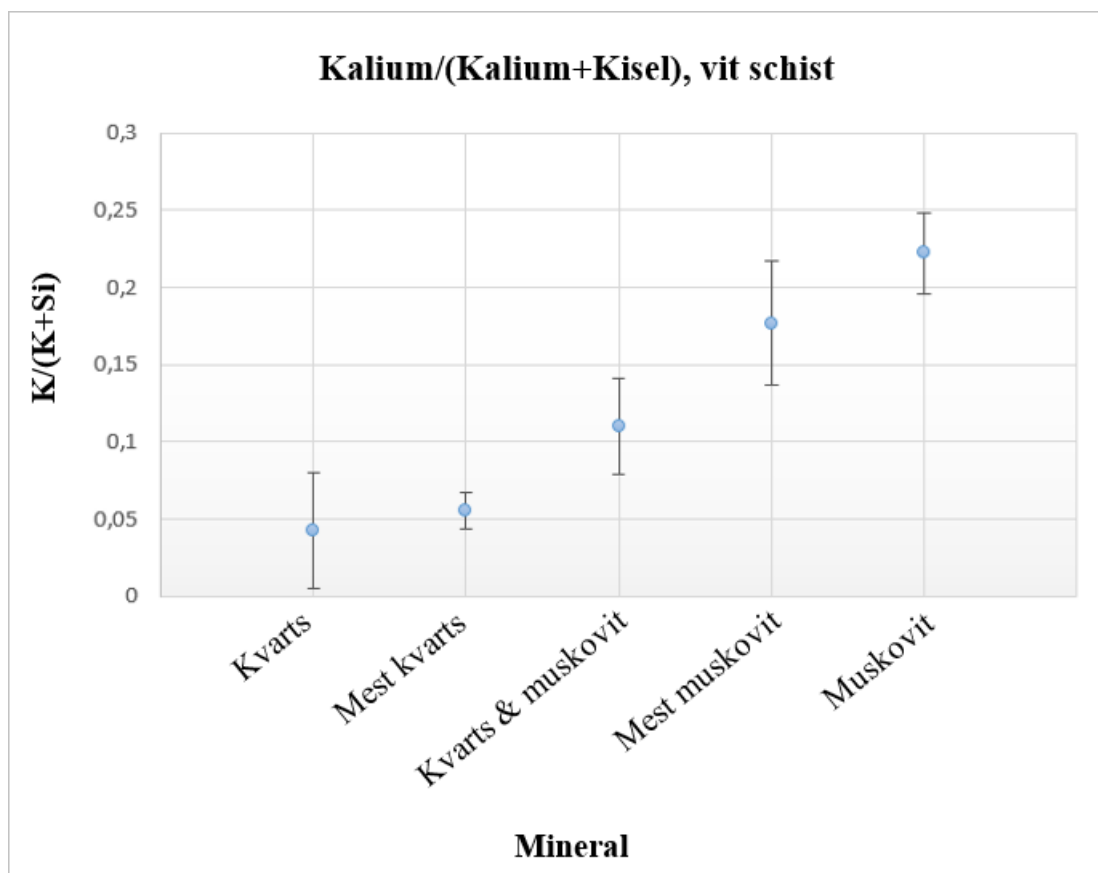


Figur 16. Stratigrafisk profil av strandsektionen i figur 15.

4.3 XRF-data

Datan för kalium- respektive kiselhalten som insamlades med en XRF användes till att säkerställa tolkningen av skiffergraderingarna som bedömdes i fält med blotta ögat.

Diagrammet i figur 17 visualiserar halten av kalium och kisel som respektive lager innehåller. Punkterna i diagrammet utgör medelvärdet av kalium/(kalium+kisel) och standardavvikelseerna visualiseras i form av vertikala linjer som integrerar medelvärdet. Kategorierna refererar endast till olika haltsammansättningar av kvarts och muskovit kopplat till de fem olika skiffergraderingarna i studien. Kaliumhalten stiger successivt desto mer muskovit som tillkommer bland mängden kvarts som därmed minskar.

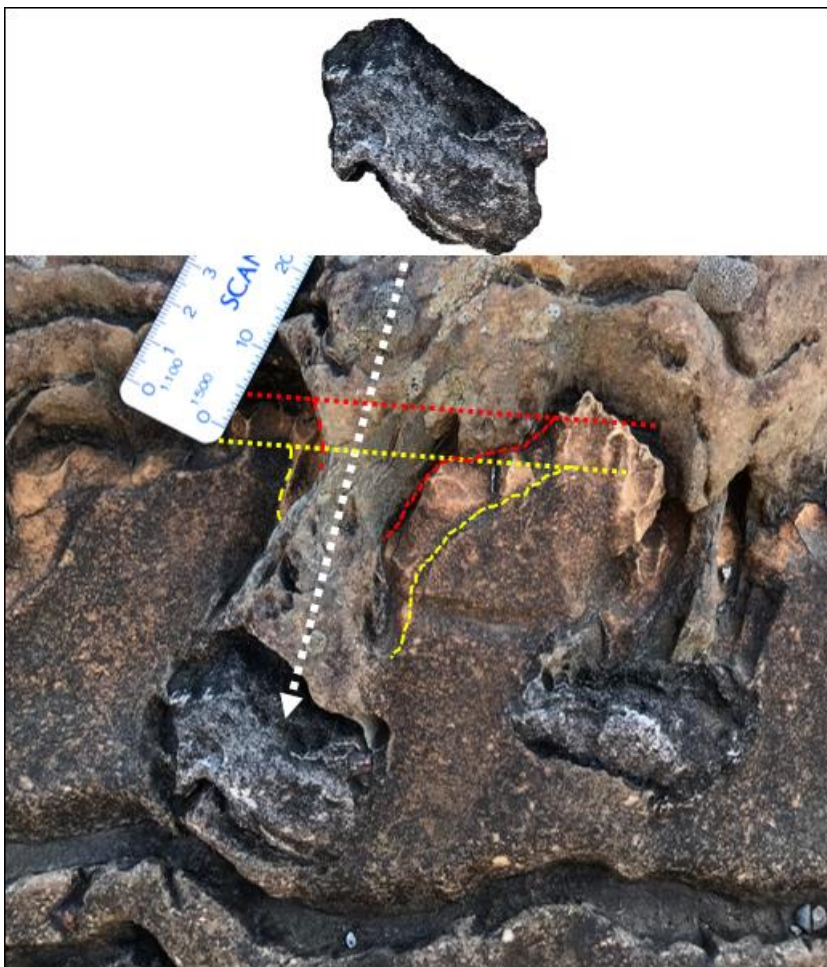


Figur 17. Kalium respektive kisel för skiffergraderingarna.

5. Diskussion av resultat

5.1 Eventuella pseudomorfer av aragonit i BDF

Strukturen uppvisar en tydlig densitetsskillnad mellan bergarterna. Bergart C verkar ha sjunkit ner i underliggande lagerföljd, se figur 18, som tydligt indikerar att lagerföljden var horisontell enligt punktlinjerna i rött och gult innan bergart C avsattes ovanpå dessa lager som sedan omformades under nedsjunksprocessen enligt streckade linjer i gult och rött. Detta indikerar att bergart C har en högre densitet än underliggande bergartslagringar och har därför bildats av ett tätare mineral, exempel aragonit ($2,9 \text{ g/cm}^3$) eller baryt ($4,3 - 4,6 \text{ g/cm}^3$) jämförelsevis med densiteten av kalcit som motsvarar $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Wooley et al., 1977).



Figur 18. Den runda bergartsenheten har sjunkit ned i underliggande lager.

Endast ett resultat av tunnsliparna för pseudomorfism från aragonit till kalcit uppvisar en potentiell pseudomorf av aragonit. Detta beror på att den hade en tydlig hexagonal kristallform trots den subhedrala egenskapen. Aragonit har en ortorhombisk form vilket innebär att från vissa vinklar dvs. 45 grader observerat från ett hörn av kristallen kan denna

uppvisa en hexagonal prisma (Klein & Philpotts 2013). De två mindre deformationerna längsmed båda långsidorna på kristallen kan bero på metamorfism efter pseudomorfism, eller tryck under tillväxt av aragonit som har gjort att kristallformen har blivit subhedral, det kan inte ha skett under själva pseudomorfismen eftersom kristallformen efter det föregående mineralet bibehålls.

Genom att studera kalcitkristallen observeras en struktur av orienterade sprickor i ca 135 graders vinkel till kristallytan, detta stärker påståendet av att det kan vara en pseudomorf efter aragonit på grund av att ersättningsprocessen till kalcit åtföljs med sprickor och håligheter (Perdikouri et al., 2011). Molvolymen ökar och bildar fraktionering i ursprungskristallen av genererad stress under processen. Dessa sprickor kan ha bidragit med kärnbildning av kalcit på flera positioner inom kristallen och fungerat som ett transportsystem av lateral spridning för reaktionerna (Perdikouri et al., 2011).

På grund av den finkorniga texturen i resterande tunnslipar av lager C är reliabiliteten för låg för att kunna bekräfta ytterligare kristallformer av kalcit som kan vara pseudomorfer av aragonit trots högsta förstoring i mikroskopet.

5.2 Aluminiumrik bergart i JKF

Al-O som ingår i muskovit samt Si-O som bygger upp mineralet kvarts består av kovalenta bindningar och utgör bergartsformationen som studerades. Den aluminiumrika egenskapen beror på kemisk vittring då de flesta kovalenta bindningar för mineral och grundämnen har motstått vittring medan joniska bindningar har brutits isär, urlakats och efterlämnat en aluminium- samt kiselrik bergart.

Resultatet visar växlande lager av muskovit och kvarts. Muskovit deriveras från lera och kvartsit deriveras från sand, dvs. före metamorfos (Blatt et al., 2006). Detta innebär att innan metamorfosen tog plats bestod formationen av växlande ler- samt sandlager vilket bekräftar att formationen har ett sedimentärt ursprung. Lera är ett finkornigt material som kan suspenderas i vatten och avsättas i lugn ström- eller havsmiljö (Marshak, 2008). Berggrunden som sedimentet har deriverats från har genomgått en intensiv kemisk vittring i en koldioxidrik miljö som har urlakat de flesta grundämnen, särskilt kemiskt lättvittrade grundämnen som kalcium (Ca) och magnesium (Mg) (Winter, 2014). Dessa grundämnen utgör de vanliga lermineralen klorit och kalcit som i denna mineralsammansättning är frånvarande. Det vittrade sedimentet fick en fattig mineralsammansättning som kan liknas vid kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), därmed kunde endast muskovit bildas av dessa lerlager efter litifiering och

metamorfos, till skillnad från kaolinit måste K fortfarande finnas närvarande för att muskovit ska kunna bildas (Winter, 2014).

Vad gäller JKF som är belägen nära kusten har detta lersediment ackumulerats i grunda hav eller laguner (Webster et al., 2015). Sand avsätts på stränder av vågenergi (Marshak, 2008). Detta innebär att fysiska vittringsfaktorer har skapat sedimentationen och de växlande mineralformationerna antyder därmed att havsnivån har stigit och sjunkit ett antal gånger. Formationen har varit belägen både som strandsektion och djupare havsområden innan den genomgick metamorfos vid bildningen av Islays antiklinala bergveck. De olika skiffergraderingarna antyder hur högt havsnivån stod under ackumulation, mer muskovit leder till att det har funnits mer lera än sand som innebär en högre havsnivå och tvärtom.

Diagrammet uppvisar en successiv ökning av muskovit genom hela sekvensen. Intervallen av muskovit blir kontinuerligt tätare allteftersom avsättningen pågår, varav de yngsta lagringarna innehåller mer muskovit än kvarts. Detta kan betyda att hela bergartsformationen avsattes under en enda process. Studier av stormar har påvisat att en storm avsätter grövre material under själva processen, allteftersom stormen avtar och vågorna minskar avsätts finare material vilket ger en sedimentfrekvens som liknar den aluminiumrika bergartsformationen i JKF (Fujiwara & Kamataki, 2008). På grund av oscillerande strömmar under stormeventet kan sedimentavsättningens material variera mellan grövre och finare för att sedan avsätta det finaste materialet när stormen avtar (Fujiwara & Kamataki, 2008).

5.3 Tolkning av miljö samt klimat

Observationer i BDF visade hönsnätsliknande strukturer av anhydrit, polygonala lerspricksbildningar och ett antal stromatoliter i närheten av samma bergartsenhet där proverna som antogs var pseudomorfer av aragonit insamlades.

Gips består av kalciumsulfat och två vattenmolekyler ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), när gips avger sina vattenmolekyler kvarstår endast kalciumsulfat som då bildar anhydrit (Blatt et al., 2006). Reaktionen som sker i grunda förhållanden gör att formationens volym minskar och under hopdragningsprocessen skapas sprickor som fylls av omgivande sediment. Den rosa hönsnätsliknande strukturen som ses i figur 19 är långsträckta noduler av företrädande gips dvs. anhydrit med en mörkare omgivande grundmassa av mikrokristallint sediment. Bildningsprocessen sker några centimeter ner i jordarterna under riktigt varma förhållanden vilket indikerar ett tropiskt klimat. Förutom anhydrit innehåller denna baryt (BaSO_4) och

kalcit (CaCO_3) vilket har konstaterats efter mikroskopanalys (Alasdair Skelton, personlig kommunikation, 20 mars 2018).



Figur 19. Hönsnätsliknande struktur av anhydrit.

Lersprickbildningarna formar hexagonala sprickor som har bildats under torra och varma förhållanden som gör att vattnet i leran dunstar, volymen av leran minskar och sprickor uppstår. Överliggande biofilmer dvs. en extracellulär grundmassa som har skapats av bakterier fyller sprickorna, resultatet ses i figur 20 (Romeo, 2008).



Figur 20. Hexagonal struktur för lersprickbildningar.

De största stromatoliterna som observerades var 170 cm i diameter. Dessa består av biokemiskt lagrade strukturer tillverkade av mikroorganismer, främst cyanobakterier. De binder sedimentärt material genom cementering av korn i grunda vattenförhållanden under varma klimat, se figur 21 (Webster et al., 2015).



Figur 21. Stromatolit, ca 50 cm i diameter.

BDF domineras av dolosten (Webster et al., 2015). Det är oklart om BDF är en kapkarbonat, om detta påstående stämmer eftersom aragonit är vanlig i neoproterozoiska kapkarbonater som havsbottenutfällning i samband med utfällt järn bildades aragoniten efter att BDFs kapkarbonatiska process hade påbörjats (Okubo et al., 2018). Detta innebär att klimatet hade nått tropiska förhållanden när aragoniten formades i samband med att den omfattande kemiska vittringen har orsakat utfällning av magnesium och kalcium i havsvattnet. Som tidigare nämnts påverkar magnesium kristallisering av kalciumkarbonat genom att hämma bildning av kalcit och därmed gynna aragonit.

Samma händelseförlopp av kemisk vittring har påverkat sedimentavsättningen för den aluminiumrika bergarten och urlakat Mg samt Ca vilket leder till en frånvaro av klorit i glimmeravlagringarna. Det är också resultatet av en hög fysisk vittring där det vittrade materialet har avsatts som kustnära sediment. Vittringshastigheten ökar under varma och fuktiga klimat (Marshak, 2008). Webster et al. (2015) menar att JKF formades under en djupare tidvattenmiljö på kontinentalsockeln som kan vara kopplad till bildandet av en golfström under hög aktivitet av tidvattenströmmar.

Diagrammets återkommande intervall mellan muskovit och kvarts kan betyda att vattennivån har gått upp och ner under ackumulationsperioden av lera och sand under kortlivade cykler vilket kan vara en eventuell koppling till tidvattenmiljö som Webster et al., (2015) föreslog. Den stora cykeln tyder på att den höga havsnivån successivt återkommer mer frekvent under avsättningsperioden, alltså torde klimatet resultera i en kontinuerligt stigande global temperatur (Webster et al., 2015). En annan teori tyder på att detta kan ha ackumulerats av en eventuell storm av oscillerande strömmar som avsätter intervall av varierande kornstorleksmaterial utifrån en kemiskt urlakad och fysiskt vittrad berggrund som leder till ytterligare mer frekvent återkommande lager av muskovit i den yngsta avsättningssekvensen när stormen avtar (Fujiwara & Kamataki, 2008).

5.4 Koppling till hypotesen om Snowball Earth

För att överkomma den positiva albedoeffekten som orsakade glaciation krävs en extremt hög halt av koldioxid i atmosfären. Deglaciation av en omfattande glacial epok är kopplad till en extrem växthuseffekt, hög koldioxidhalt leder till karbonatisk sur nederbörd som skapar en intensiv kemisk vittring. Koldioxid börjar reagera med bergarter samtidigt som den skapar ett extremt varmt klimat som sätter igång fysisk aktivitet och accelererar den hydrologiska cykeln som leder till efterföljande fysisk vittring sammankopplat med den kemiska vittringen. Utfällt kalciumkarbonat i havsvatten via kemisk vittring av berggrund kan leda till kristalltillväxt av kalcit eller aragonit. Om magnesiumjoner finns närvarande i havsvattnet som också har fällts ut via kemisk vittring gynnar detta kristalltillväxt av det relativt labila mineralet aragonit som sedan alterneras av kalcit. Studieområdet för eventuella pseudomorfer av aragonit är lokaliserad i BDF och är nästkommande formation efter PAF som innehåller bevis på ett antal glaciala epoker. Enligt strata kommer JKF efter BDF och innehåller den aluminiumrika bergartsformationen som är uppbyggd av sedimentavlagringar kopplad till fysisk vittring. Lagringens grundämnesinnehåll som kan liknas vid kaolinit tyder på en kemisk urlakad berggrund innan den fysiska vittringen började bryta ner berggrunden och slutligen avsattes de sedimentära lagringarna av havsvatten. I samband med att en eventuell snowball Earth successivt smälter under en stigande global temperatur samt stormevent torde havsnivån kontinuerligt stiga och av oscillerande strömmar ackumulera intervall av leravlagringar. Dessa leravlagringar torde öka under yngsta lagringssekvensen allteftersom stormen avtar som resulterar i fler frekventa bergartslagringar av muskovit efter litifiering och metamorfos.

Detta påvisar en potentiell sekvens av intensiva efterföljande vittringseffekter gällande en teori som handlar om att jorden har genomgått en snowball Earth-period, täckt av glaciärer.

6. Slutsatser

Slutsatser från denna studie är följande:

- En högre densitetsskillnad för lager C kan fastställas eftersom denna har sjunkit ner i resterande lagerföljd. Den torde ha bildats av ett tätare mineral än kalcit exempelvis aragonit eller baryt och sedan omvandlats. En pseudomorf av eventuellt aragonit till kalcit observerades, reliabiliteten för att bergarten ska ha bildats som aragonit och sedan omvandlats till kalcit är låg eftersom endast ett exempel gick att urskilja.
- Växlande lager av kvarts och muskovit i JKF tyder på kemiskt urlakad berggrund i en miljö av hög koldioxidhalt som fysiskt vittrats eftersom dessa har deriverats från sand respektive lera och skapats av att havsnivån har varierat mellan kortlivade cykler av lågt och högt vattenstånd under ackumulation eller oscillerande strömmar under en storm. En storm kan vara orsaken till att muskovit kontinuerligt ökar genom hela sekvensen, under stormen avsätts grövre material som sand. När stormen avtar och vågenergin minskar avsätts finare material som lera. Sedan har formationen utsatts för metamorfos under skapandet av Islays antiklinala bergveck.
- Frånvaron av klorit och kalcit i glimmeravlagringarna tyder på en omfattande kemisk vittring innan ackumulation som har urlakat Ca samt Mg och efterlämnat leravlagringar som kan jämföras med en sammansättning av kaolinit.
- BDF som innehåller den potentiella pseudomorfen av aragonit är äldre än JKF som omfattar den aluminiumrika bergarten. Eftersom aragonit är resultatet av kemisk vittring och följande aluminiumrik bergart är resultatet av fysisk vittring av en kemiskt urlakad berggrund stämmer klimatsekvensen för en eventuell snowball Earth. Den förhöjda koldioxidhalten efter snowball Earth startade kemisk vittring och urlakade berggrunden som resulterade i fysisk vittring när växthuseffekten tog fart, den hydrologiska cykeln intensifierades och den globala temperaturen steg.

7. Tack

Jag vill passa på att tacka min handledare Alasdair Skelton för hans engagemang och stöd genom hela studieprocessen av detta projekt. Jag vill också tacka honom för min tid på Stockholms universitet, hans inspiration och glöd har gjort dessa år enormt lärorika.

Jag vill tacka min fältpartner Joe Browning för att han hjälpte mig samla in data på Islay och gjorde fältstudieresan så mycket roligare.

Jag vill tacka mina föräldrar Margot Åström Strand och Håkan Strand för deras oändliga stöd som de aldrig gav upp trots motgångar.

Jag vill tacka min vän Sanna Pahkamaa som har gett mig massor av motivation och agerat bollplank under stunder då jag har kört fast.

Sist men inte minst vill jag tacka alla på Institutionen för Geovetenskap, Stockholms Universitet, för att de bedriver ett fantastiskt geovetenskapligt program med utmärkt undervisning och oförglömliga fältstudieresor.

8. Referenser

Andrews, D.A. & Scaller, W.T. (u.å.). Dolomite Pseudomorphous after Crystals of Aragonite. U. S. Geological Survey, (162), 135-140.

Berner, R.A. (1974). The role of magnesium in the crystal growth of calcite and aragonite from sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39, 489-504.

Blatt, H., Tracy, R.J., Owens, B.E. (2006). *Petrology Igneous, Sedimentary, and Metamorphic* (3. [1996, 1982] uppl.). New York: W. H. Freeman and Company.

Bonewitz, R.L. (2008). *Rocks & Minerals* (2. ed.). London: Dorling Kindersley Limited.

Carrol, D. (1970). *Rock Weathering*. New York: Plenum Press.

Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episode* 36: 199-204.

Dilshad, O.A., Spencer, A.M., Fairchild, I.J., Chew, K.J., Anderton, R., Levell, B.K., Hambrey, M.J., Dove, D., Le Heron, D.P. (2017). Indicators of relative completeness of the glacial record of the Port Askaig Formation, Garvellach Islands, Scotland. *Precambrian Research* xxx. xxx-xxx.

Fairchild, I.J. (1980). Sedimentation and origin of a late Precambrian "dolomite" from Scotland. *Journal of Sedimentary Research*. 50(2). 423-446.

Fairchild, I.J., Kennedy, M.J. (2007). Neoproterozoic glaciation in the Earth System. *Journal of the Geological Society*, 164, 895-921.

Fujiwara, O., Kamataki, T. (2008). Tsumamiites, Tsunami depositional processes reflecting the waveform in a small bay: Interpretation from the grain-size distribution and sedimentary structures. Amsterdam: Elsevier Science.

Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (2009). The Neoproterozoic and Cambrian: a time of upheavals, extremes, and innovations. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): *Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, 16. 3-11.

Geoff Tanner, P.W., Bendall, C.A., Pickett, E.A., Roberts, J.L., Treagus, J.E., Stephenson, D. (2013). The Dalradian rocks of the south-west Grampian Highlands of Scotland. *Proceedings of the Geologists' Association* 124. 83-147.

Hoffman, P.F., Abbot D.S., Ashkenazy, Y., Benn, D.I., Brocks, J.J., Cohen, P.A., Cox, G.M., Creveling, J.R., Donnadieu, Y., Erwin, D.H., Fairchild, I.J., Ferreira, D., Goodman, J.C., Halverson, G.P., Jansen, M.F., Le Hir, G., Love, G.D., Macdonald, F.A., Maloof, A.C., Partin, C.A., Ramstein, G., Rose, B.E.J., Rose, C.V., Sadler, P.M., Tziperman, E., Voigt, A., Warren S.G. (2017). Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Science Advances*. 3(11), e1600983. doi: 10.1126/sciadv.1600983.

Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., Schrag, D.P. (1998). A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 281, 1342-1346.

Hoffman, P.F., Schrag, D.P. (2002). The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14(3), 129-155.

Klein, C., Philpotts, A.R. (2013). *Earth Materials*. New York: Cambridge University Press.

Kloprogge, J.T., Lavinsky, R. (2017). *Photo Atlas of Mineral Pseudomorphism*. Amsterdam: Elsevier Science.

Le Hir, G., Donnadieu, Y., Godd eris, Y., Pierrehumbert, R.T., Halverson, G.P., Macouin, M., N ed elec, A., Ramstein, G. (2009). The snowball Earth aftermath: Exploring the limits of continental weathering processes. *Earth and Planetary Science Letters* 277, 453-463.

Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R.E., Fitzsimons, I.C.W., Fuck, R.A., Gladkochub, D.P., Jacobs, J., Karlstrom, K.E., Lu, S., Natapov, L.M., Pease, V., Pisarevsky, S.A., Thrane, K., Vernikovskiy, V. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis, *Precambrian Research*, 160(1), 179-210.

Marshak, S. (2008). *Earth Portrait of a Planet* (2 uppl.). New York: W.W. Norton & Company.

Okubo, J., Muscente, A.D., Luvizotto, G.L., Uhlein, G.J., Warren, L.V. (2018). Phosphogenesis, aragonite fan formation and seafloor environments following the Marinoan glaciation. *Precambrian Research* 311, 24-36.

Perdikouri, C., Kasiopas, A., Geisler, T., Schmidt, B.C., Putnis, A. (2011). Experimental study of the aragonite to calcite transition in aqueous solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75(20), 6211–6224.

Romeo, T. (2008). Bacterial Biofilms. *Current Topics in Microbiology and Immunology* 322. 1-293.

Rooney, A. D., Strauss, J. V., Brandon, A. D., & Macdonald, F. A. (2015). A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations. *GeoScienceWorld*, 43(5), 459-462.

Skelton, A., Lewerentz, A., Kleine B., Webster, D., Pitcairn I. (2015). Structural Channeling of Metamorphic Fluids on Islay, Scotland: Implications for paleoclimatic Reconstruction. *Journal of Petrology*. 56(11). 2145-2172.

Skelton, A., Löwhagen, L., Fairchild, I.J., Boyce, A., Mörth, C.-M., Siegmund, H., Webster, D. and Spencer, A.M. (2019). Stable isotopes of oxygen and hydrogen in meteoric water during the Cryogenian Period. *Precambrian Research* 320, 253–260.

Stephenson, D., Mendum, J.R., Fettes, D.J., Graham Leslie, A. (2012). The Dalradian rocks of Scotland: an introduction. *Proceedings of the Geologists' Association*. 124. 3-82.

Webster, D., Anderton, R., Skelton, A. (2015). *A Guide to the Geology of Islay*. Glasgow: Ringwood Publishing.

Winter, J.D. (2014). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. (1. Ed.). Edinburgh Gate: Pearson Education Limited.

Wooley A.R., Bishop, A.C., Hamilton, W.R. (1977). *Bergarter, mineral, fossil*. Stockholm: Albert Bonniers Förlag.