



Stockholm
University

Bachelor Thesis

Degree Project in
Geology 15 hp

En petrologisk studie av granitombildning längs ramptunnel 411, Förbifart Stockholm

Malin Lindström



Stockholm 2019

Department of Geological Sciences
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm

Innehållsförteckning

1. ABSTRAKT	3
2. INTRODUKTION	3
2.1 GEOLOGISK BESKRIVNING AV STOCKHOLMSOMRÅDET.....	4
2.2 BESKRIVNING AV GEOLOGIN I OMRÅDET KRING RAMPTUNNEL 411	5
2.3 VITTRING AV GRANITER	6
3. SYFTE	6
3.1 HYPOTES OCH FRÅGESTÄLLNING	6
4. METOD	6
4.1 INSAMLING AV PROVER	6
4.2 FÖRBEREDELSE AV PROVER	7
4.3 MÄTNING AV GRUNDÄMNENS KONCENTRATIONER MED XRF.....	7
4.3.1 Datahantering.....	8
4.4 MÄTNING AV REAKTIONSVÄRDE (R-VÄRDE) MED SCHMIDTHAMMARE	8
4.4.1 Datahantering.....	9
5. RESULTAT	10
5.1 BESKRIVNING AV STUFFER OCH TUNNSLIP	10
5.1.1 Beskrivning av stuffer.....	10
5.1.2 Beskrivning av tunnslip	12
5.2 RESULTAT FRÅN XRF-MÄTNING OCH SCHMIDTHAMMARPROVTAGNING	15
5.2.1 XRF-mätning	15
5.2.2 Schmidthammarprovtagning.....	16
6. DISKUSSION	17
6.1 MINERALOGISKA OCH GEOKEMISKA OBSERVATIONER KOPPLAT TILL REAKTIONSVÄRDE (R).....	17
6.2 FELKÄLLOR	21
7. SLUTSATS	22
7.1 FÖRSLAG TILL FORTSÄTTA STUDIER	22
8. TACK TILL	22
9. KÄLLOR	22
10. APPENDIX	24
10.A.1 XRF-MÄTNINGAR.....	24
10.A.2 SCHMIDTHAMMARE	25
10.A.2.1 Detaljerat resultat från provslagnings för samtliga prover.....	26

1. Abstrakt

I denna studie har en observerad rödomvandling och vittring av granitisk bergmassa, i ramptunnel 411 i Förbifart Stockholm, förklarats med lågtempererade fluida processer som orsakat oxidering av biotit. Oxideringen har lett till en expansion av biotiten vilket har orsakat sprickbildning i kringliggande mineraler och utfällning av järnoxid som färgat graniten röd. Med hjälp av koncentrationsmätningar med XRF (*X-Ray Fluorescence Spectrometer*) och hårdhetsmätningar med Schmidthammare (*Proteq L-typ*) har koncentrationen av K^+ visats vara en indikator för hur hård graniten är, och förhållandet mellan koncentrationerna K/Fe visar om biotitoxidering har skett. För bägge fall motiverar låga värden för en mjukare och mer vittrad bergmassa, vilket följs av ökad utfällning av järnoxid.

2. Introduktion

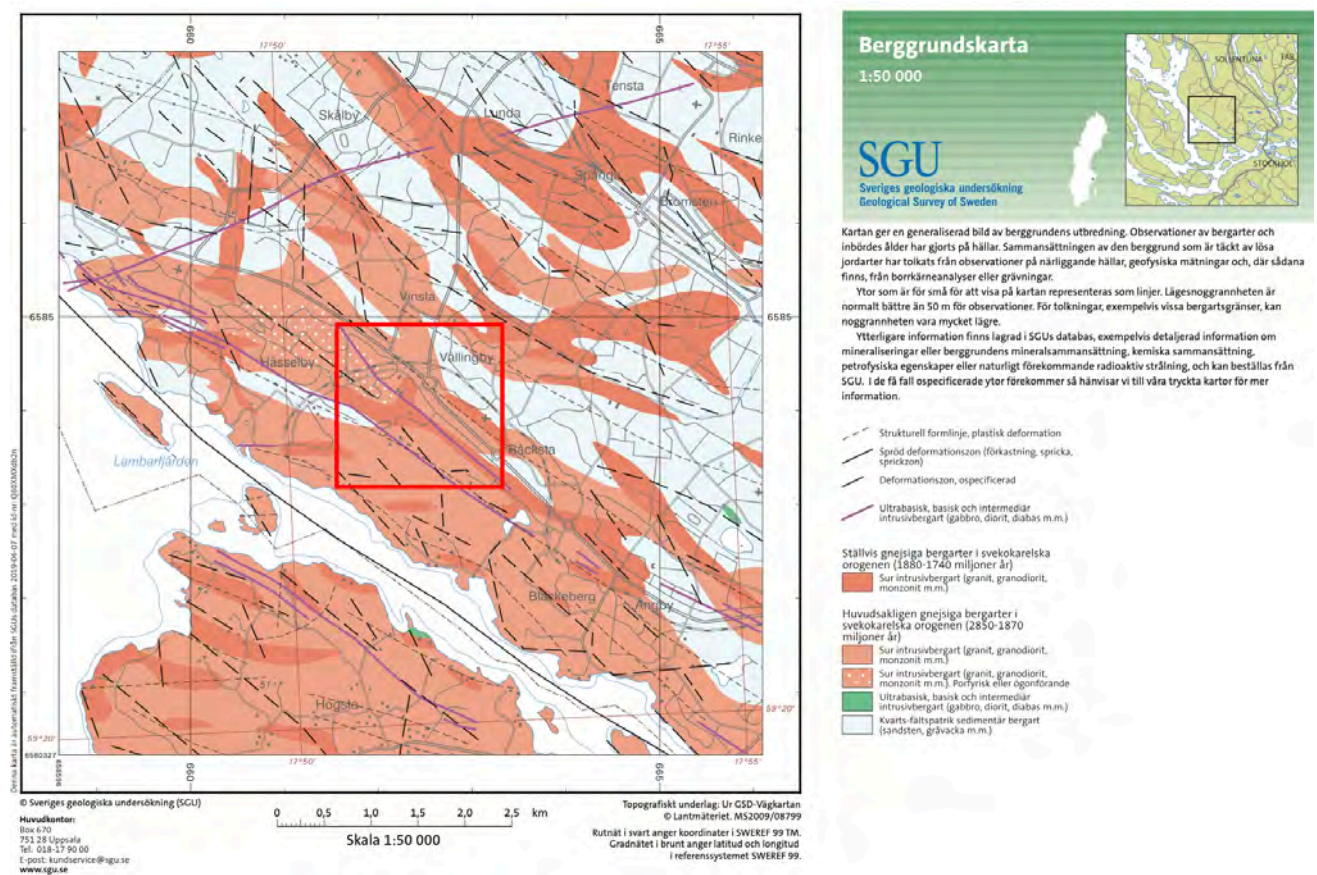
Detta arbete utfördes på önskan av geologorganisationen inom Förbifart Stockholm, i ett samarbete mellan Stockholm Universitet och ÅF. Förbifart Stockholm är ett infrastrukturprojekt som inleddes 2014 och planeras att stå klart till år 2026. Byggnationen gäller en omdirigering av E4:ans motorväg för att avlasta trafiken i Stockholm och effektivisera transporten genom staden. Förbifarten kommer att sträcka sig från Kungens kurva till Kallhäll, med 18 av 21 km vägsträcka i bergtunnlar. ÅF har ansvar för kartering och förstärkning av samtliga tunneldelar. På flera platser längs med tunnelsträckorna, ofta beläget i anslutning till svaghetszoner, har rödfärgade graniter och gnejser påträffats och i samband med dessa är sprickkvantiteten förhöjd. Extra tydlig är denna rödomvandling vid entreprenaden FSE403 i ramptunneln 411 i Johannelund, där en successivt ökande omvandling sker längs ca 90m fram till tunnelfronten (så långt man hittills har sprängt i tunneldelen). Berggrunden i denna tunneldel är porös och vittrad, där utfall av sten och grus förekommer (figur 1). Omständigheterna kräver kontinuerlig förstärkning med betong för att undvika större ras och för att möjliggöra fortsatt tunneldrivning. Ett behov av att analysera den omvandlade graniten finns för att kunna ta reda på hur den har bildats och således ta reda på var omvandlingen kan tänkas ha inträffat.



Figur 1. Rödomvandling i tunneldel km 0/367 i ramptunnel 411.

2.1 Geologisk beskrivning av Stockholmsområdet

Stockholmsområdets berggrund tillhör den Svekofenniska provinsen som har utsatts för metamorfos under den Svekokarelska orogesen (2-1,8 Ga) och består huvudsakligen av sedimentgnejser, granitiska gnejser och graniter (Wahlgren, et al., 2018). De äldsta bergarterna är kvarts- och fältspatsrika metasediment som intruderats av yngre kvartsdominerande metagranitoider vid ca 1,9 Ga. Bägge är kraftigt deformerade med gnejsig karaktär (Wahlgren, et al., 2018). Dessa har intruderats av ytterligare yngre granit mot slutet av bergskedjeveckningen, daterat till 1,79 Ga (Johansson, 2019). De yngre graniterna består av två grupper vilka skiljer sig i kornstorlek; en medelkornig innehållande porfyriter som täcker området kring Täby och Vallentuna och en fin- till medelkornig som täcker de mer södra delarna av Stockholm varigenom Förbifart Stockholm går. Denna fin- till medelkorniga graniten är rosa/röd till färgen och kallas för Stockholmsgranit. Då den intruderade i slutskedet av den Svekokarelska bergskedjeveckningen är den ställvis deformerad. Stora delar av graniten är dock opåverkad av de metamorfa processerna (Johansson, 2019).



Figur 2. Geologisk karta över området strax norr om Lovön och Lamberfjärden, där närområdet kring ramptunnel 411 är innanför de röda markeringarna. Deformationszoner är utmärkta och visar en huvudsaklig nordvästlig riktning. Källa: SGU:s kartgenerator.

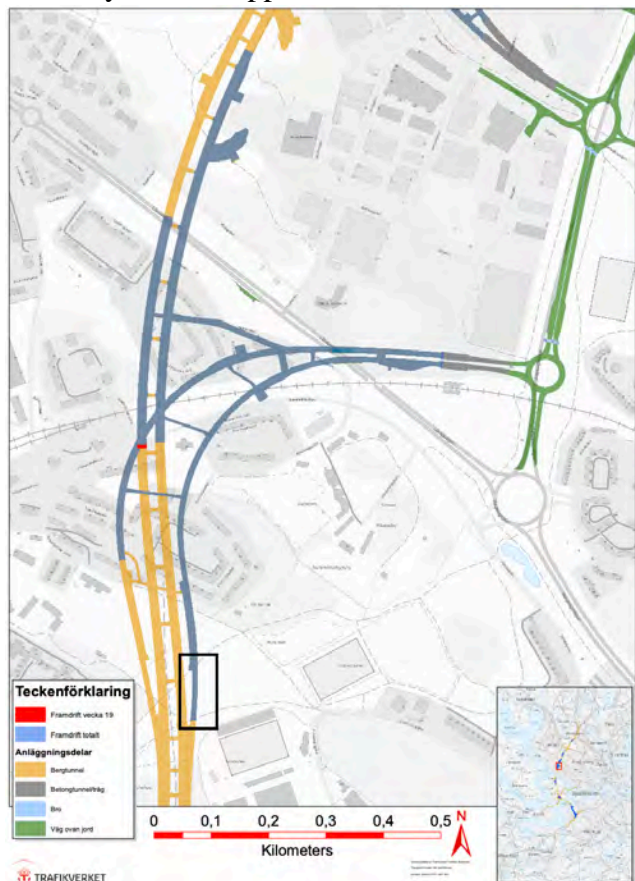
Från bergskedjeveckningen bildades flera stora plastiska deformationszoner som i Stockholmsområdet huvudsakligen stryker mot nordväst i norr och mot nordost i söder (Wahlgren, et al., 2018). Förbifarten passerar deformationszoner med huvudsakligen nordvästlig riktning (figur 2). För 1,6-0,9 Ga och ytterligare 0,51-0,4 Ga reaktiverades de plastiska deformationszonerna på grund av de bergsspänningar som uppstod från den Svekokarelska respektive Kaledoniska bergskedjeveckningen och spröddeformationszoner bildades (Wahlgren, et al., 2018). Detta har påvisats från upptäckten av mylonit i en nordvästlig spröddeformationszon som

går mellan Lovön och ut i Lambarfjärden (Wahlgren, et al., 2018). Åldern av spröddeformationen från den tektoniska utvecklingen i Forsmark, Oskarshamn och Olkiluoto i Finland är framtagen från dateringar av biotit med ^{40}Ar - ^{39}Ar -metoden och från paleostressanalyser, där den på samtliga platser har uppmätts till 1,6-0,9 Ga samt < 0.5 Ga (Wahlgren, et al., 2018). Stockholm som ligger inom dessa avgränsningar uppskattas därav ha en spröddeformation av samma ålder. Spröddeformationer kan även ha utvecklats på senare tid från variationer i belastning från sedimentation, erosion och upplyft efter senaste inlandsisen (Wahlgren, et al., 2018).

2.2 Beskrivning av geologin i området kring ramptunnel 411

Ramptunnel 411 är en kortare tunneldel som ska leda avfart för norrgående trafik. Den är belägen i den norra delen av Förbifarten i Johannelund vid trafikplats Vinsta (figur 3). Enligt karteringar utförda och sammanställda i Trafikverkets ingenjörsgelogiska prognos för projektet (Hjälml, 2015) uppskattas huvudsakliga sprickriktningar i det studerade området vara SV-NO respektive NV-SO (figur 2), vilket bekräftas av Wahlgren et al (2018). Sprickorna har uppmätts skära tunneln med 40 - 50° , och en kraftig deformationszon i området med nordvästligt riktning är uppmärksammas som tydlig och spröd. I området finns även riklig förekomst av sprickor med till synes varierande strykning och stupning. I anslutning till den utmärkande deformationszonen finns en lerjordfylld dalgång med ett utsträckt grundvattenmagasin. Lerjordlagret består av lera och morän och har klassats som väl genomsläppligt. Grundvattennivån är 1-4m under markytan men uppnår emellanåt *artesisisk grundvattennivå* (över markytan).

Berggrunden kring området har uppmätts med en ungefärlig hydraulisk konduktivitet på 1×10^{-8} m/s (Hjälml, 2015).



Figur 3. Översiktsskarta över Johannelunds tunnelbyggnationer. Lokal för den studerade sträckan i ramptunnel 411 är markerat i svart. Källa: Trafikverket juni 2019.

2.3 Vittring av graniter

När en granit kommer i kontakt med vatten kan den omvandlas genom vittringsprocesser. Studier utförda av Buss et al (2008), Goodfellow et al (2016) och Isherwood & Street (1976) har visat att hydrolys av biotit kan leda till oxidering och expansion av mineralen, som kan leda sprickor och färga graniten röd. En potentiell effekt av granitvittring är lerbildning som en produkt av vittrad plagioklas och biotit (Earle , 2015) och (Buss , et al., 2008). Kvarts är ett svårvittrat mineral men kan krossas från expansion av andra mineral.

3. Syfte

Detta arbete gjordes i syfte att undersöka vad som har orsakat rödomvandlingen och se om det finns en petrologisk koppling mellan omvandlingen och den ökade sprickbildningen, för att ta reda på var omvandlad berggrund kan finnas.

3.1 Hypotes och frågeställning

Två hypoteser är framtagna för undersökningen, följt av en frågeställning som gäller oberoende av hypotes.

-Rödomvandlingen orsakas av metamorfa processer som sker i samband med hydrotermala reaktioner där utbyte med fluider sker.

-Rödomvandlingen orsakas av fluidreaktioner på låg temperatur, där vittring inducerad av grundvattentillförsel omvandlar berggrunden.

-Är omvandlingen kopplad till tidigare deformationszoner eller har den bildats på grund av andra orsaker?

4. Metod

4.1 Insamling av prover

Längs en ca 90 m lång tunnelsträcka där omvandling noterats, samlades 16 stenprover in med avsikt att representera rödomvandlingen från minst omvandlad till mest omvandlad granit. På grund av rasrisken i den nämnda tunneldelen hade bergväggarna redan täckts med ett lager av fiberarmerad sprutbetong, vilket förhindrade provtagning direkt från bergytan. Istället insamlades samtliga prover in från de stenras som låg längs med väggarna. Dessa stenar bör med stor sannolikhet representera den tunnelsektion i närheten av där stenen låg.

Stenproverna namngavs efter provtagningsplats, givna enligt den längdmätning (km) de påträffats i tunneldelen, följt av antal samlade prover på platsen: 367-1;3, 379-1;2, 385-1;7, 455-1;4. Tre stenar avvek från resten då de var gnejser (Prov 455-03, 367-1 och 367-02).



Figur 4. Stenprover med tillhörande tunnslipsblock. De är uppställda efter ordningen som de insamlades i tunneln, från sträcka km 0/455 i övre vänstra hörnet till km 0/367 i nedre högra hörnet.

4.2 Förberedelse av prover

Samtliga stenar sågades med en rundsåg för att göra tunnslipsprover och förbereda stenarna inför test med Schmidthammare och XRF (*X-Ray Fluorescence Spectrometer*). För Schmidthammarmätning användes ISRM:s standardmetod (Aydin, 2009) och i enighet med denna sågades ett 1x1x3 cm tunnslipsblock från varje sten, och av den resterande stenen sågades 4 cm (+/- 0.5cm) tjocka bitar med parallella ytor (+/- 6°). Ytornas vinklar mättes med en vinkelhake och är enligt ISRM inom ramen för hur stor avvikelse som är acceptabel för provtagning med Schmidthammare. Stenproverna läts lufttorka i rumstemperatur i fyra dagar för att eventuellt vattenfyllda porer skulle torka. Tunnslipsbitarna skickades till *Vancouver Petrographics LTD* för tillverkning av tunnslip.

De granitiska proverna delades upp i två grupper som hädan efter refereras till som *delvis omvandlade* prover (455-01,455-02, 455-02, 385-01;03, 379-01;02, 367-03) och *omvandlade* prover (385-04;07). De gnejsiga proverna (455-03, 367-1 och 367-02) ingick inte i dessa grupper, men en liknande gruppering gjordes av dem (gnejserna ingår dock inte när referering görs till de olika grupperna i texten). Samtliga prover fotograferades och en sammanfattad mineralogisk beskrivning uppdelad i de två grupperna gjordes, där den gradvisa förändringen mellan proverna inom samma grupp tydliggjordes. På graniterna utfördes provtagning med XRF och Schmidthammare, vilket inte gjordes på de gnejsiga proverna. Anledningen till att de exkluderades vid provmätningar var för att de hade ett avvikande ursprung och dess egenskaper kunde således inte jämföras med graniternas. Gnejsarna kunde däremot användas för att se om rödomvandling är unikt för graniter eller om det påträffas även för gnejs.

4.3 Mätning av grundämnens koncentrationer med XRF

En handhållen XRF (*X-Ray Fluorescence Spectrometer*) av modell DP-6000, Delta dynamix XRF från Innov-X systems, användes för att utföra kemiska analyser av grundämnen med atomnummer mellan magnesium till uranium. XRF:en skickar ut röntgenstrålning som exciterar elektroner i de atomer som träffas, vilket sänder ut grundämnesunik strålning varpå

det registreras som viktprocent i XRF:en. På den största ytan av de sågade proverna mättes grundämnesinnehållet i 10-12 mätpunkter med jämna mellanrum. Huvudämnen vars viktprocent var lika med eller större än 1 noterades. Ämnen vars procentuella mängd underskred 1% ansågs inte vara av signifikans, då det framförallt är huvudämnen som är mineralbildande. Innan användning kalibrerades XRF:en med en titanplatta.

4.3.1 Datahantering

Mätvärden delades upp i grupperna delvis omvandlade prover och omvandlade prover. Varje huvudämne undersöktes med T-test för att se hur koncentrationerna mellan de två grupperna varierade. T-test är ett statistiskt test som är förprogrammerat i Excel och tar fram ett så kallat *Probability value*, P-värde. P-värdet visar om två populationer är statistiskt olika när de jämförs mot varandra. För att med 95% säkerhet fastslå att populationerna är olika så ska P-värdet vara mindre än 0.05, i annat fall kan inte olikhet påvisas på denna signifikansnivå. För varje grupp beräknades ett sammanslaget konfidensintervall med Excels funktion *Confidence.norm*, baserat på varje provpunkts standardavvikelse från populationen och antal provpunkter.

4.4 Mätning av reaktionsvärde (R-värde) med Schmidthammare

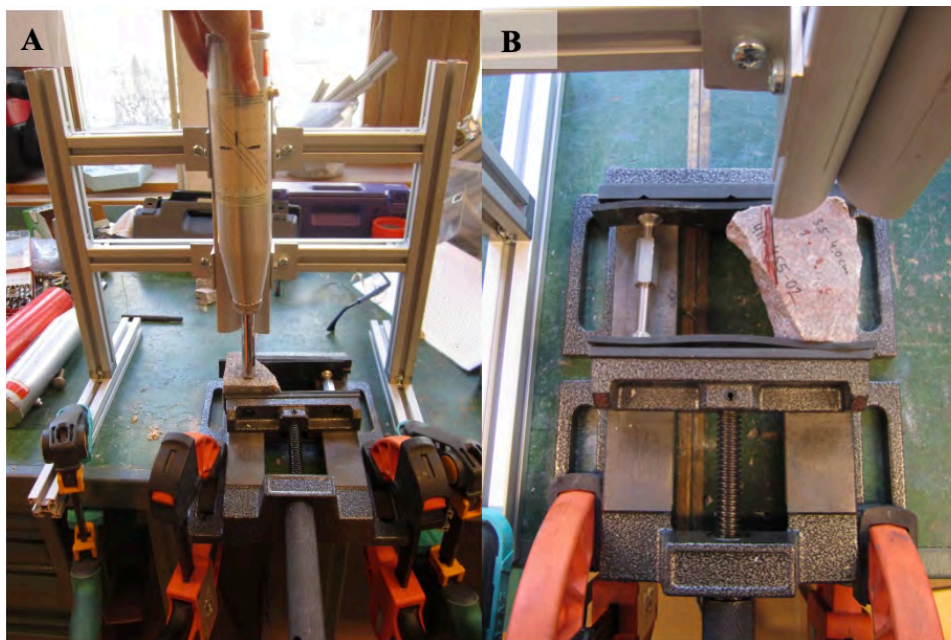
Det finns olika metoder för att mäta bergets styrka. Kompressionsstyrkan kan mätas genom att utsätta stenarna för ett högt tryck och undersöka när de går sönder; hastighetstest kan utföras med ljudvågor som skickas genom provet där pulsens hastighet genom provet motsvarar hur kompakt berget är; LOI (*loss on ignition*) påvisar porositet genom att mäta vikten av prover innan och efter torkning (Price, 2009). Flera av dessa metoder är bättre anpassade för porösa bergarter och inte färsk granit. Av denna anledning, i kombination med att det är en lätt utförd och mindre tidskrävande metod, användes Schmidthammarmetoden för denna studie.

För provtagning användes en handhållen Proteq L-typ Schmidthammare av originalmodell, med en nedslagsenergi på 0.735 Nm (Proteq instruktionsmanual, 2017). Mekanismen är en kolv, som är fäst till en fjäder, som skjuts ut när hammarhuvudet trycks mot en yta, där reaktionsvärdet, R, registreras. R-värdet är kvoten mellan längden på fjädern i maximalt utsträckt tillstånd och dess längd när den trycks ihop vid slag. Ju mer komprimerad fjädern blir, desto högre är reaktionsvärdet och desto hårdare är stenen, då mindre energi går förlorad i stenen.

Det finns två etablerade standardmetoder för provtagning med Schmidthammare: ISRM och ASTM (Aydin, 2009). I detta arbete har metoden beskriven i ISRM använts men anpassningar har gjorts efter provernas storlek. Enligt ISRM:s standardmetod (Aydin, 2009) ska blockformade prover ha en tjocklek på 10 cm, medan tester utförda av Demirdag et al (2008) visar på att tjockleken bör vara minst 11cm för att få korrekta mätvärden. Eftersom de samlade stenarna inte var tillräckligt stora för att såga 11cm tjocka prover så valdes 4cm som den största möjliga genomskärning. På grund av att stenarna hade olika storlekar och att det minsta provet hade en area på ca 17 cm² läts prover variera gällande area och form, trots att anvisningar enligt ISRM föreslår en gemensam area på minst 268cm² (Demirdag, et al., 2009). Den anpassningen gjordes med hänsyn till att mätvärden hade minskat avsevärt om samtliga prover hade begränsats till 17cm².

Inför provtagning fästes proverna på en 9 kg tung metallställning (figur 5a) för att få största möjliga stabilitet och undvika spridning av nedslagsenergin. Detta skiljer sig från ISRM:s standard som föreslår att ställningen vara minst 20 kg (Demirdag, et al., 2009). För att hålla

hammaren vertikalt mot slagytan monterades ytterligare en ställning som användes som stöd för hammaren (figur 5b). Slagytorna hölls fria från grus och damm under provtagningarna för att minimera risk för felkällor. Samtliga ytor fotograferades innan och efter provslag. Provtagning utfördes på ytan med minst area, med 1cm (+/- 0.5 cm) avstånd från kanten för att undvika spridning av mätvärden (Aydin & Basu, 2005). I kontrast till ISRM:s hänvisningar om att ha 1 cm avstånd mellan varje slagpunkt (Aydin & Basu, 2005), utfördes varje slag utan mellanrum för att få så många mätvärden som möjligt. Fem repeterade slag utfördes per provpunkt enligt anvisningar av Poole and Farmer (1980). För de mindre omvandlade stenarna i gruppen delvis omvandlade prover avslutades provtagning om sprickor uppstod. Däremot utfördes slag trots redan existerande eller ny sprickbildning för de mer omvandlade proven i gruppen delvis omvandlade prover och för samtliga prover i gruppen omvandlade prover.



Figur 5. A) Ställningen som användes för att hålla Schmidthammaren vertikalt mot ytan. B) Ställningen som prover fästes i.

4.4.1 Datahantering

Hur många slag som ska utföras per prov och hur mätvärden ska hanteras varierar mellan olika metodbeskrivningar. Enligt ISRM ska 20 enstaka slag utföras per prov, där medelvärdet av de översta 50% av värdena används (Aydin, 2009). ASTM föreslår att 10 enstaka slag utförs, där värden som avviker med mer än 7 enheter ska avfärdas för att sen ta medelvärdet av resterande värden (Demirdag, et al., 2009). Instruktionsmanualen till Schmidthammaren (Proceq, 2017) föreslår att avfärda det högsta och lägsta värdet, därefter ta medelvärdet av 8-10 enstaka slagmätningar. I kontrast till de andra metoderna anser Poole & Farmer (1980) att det högsta värdet från fem repetitiva slag per punkt ska användas.

Tillvägagångssättet som användes i detta arbete för att välja ut representativa mätvärden beskrivs inte i någon av de nämnda metoderna, men användes för att kunna hantera mätvärden som registrerades som <10 (nollvärden). Vid provtagning noterades nämligen proverna att röra sig vid de första slagen, vilket troligtvis resulterade i för låga värden. Därför ansågs det första värdet >10 som det mest representativa för stenens hårdhet. Den data som användes var därav endast de första registrerade värdena på 10 eller högre för respektive provpunkt. Därefter läts medelvärdet för mätpunkterna per sten representera R-värdet för stenprovet. Resultaten av R-värden delades, i enighet med XRF-uppdelningen, i de två

grupperna delvis omvandlad och omvandlad och jämfördes statistiskt med T-test enligt beskrivningen gjord för T-test för XRF. R-värden jämfördes med värden från XRF-mätningen för att se om det fanns en korrelation mellan de två mätmetodernas resultat.

5. Resultat

5.1 Beskrivning av stuffer och tunnslip

Av de 16 prover som undersöktes var två relativt icke-omvandlade och mindre röda än de andra proverna och beskrivs därför separat. De resterande granitproverna är antingen svagt eller starkt omvandlade och beskrivs i två grupper. De tre prover som består av metamorfoserad gnejs beskrivs separat. Omvandlingen som till synes sker gradvis i tunneln motsvaras inte av uppdelningen av proverna gällande omvandlingsgrad. De mest omvandlade proverna har påträffats på sträcka km 0/385km, vilket inte är närmast tunnelnfronten.

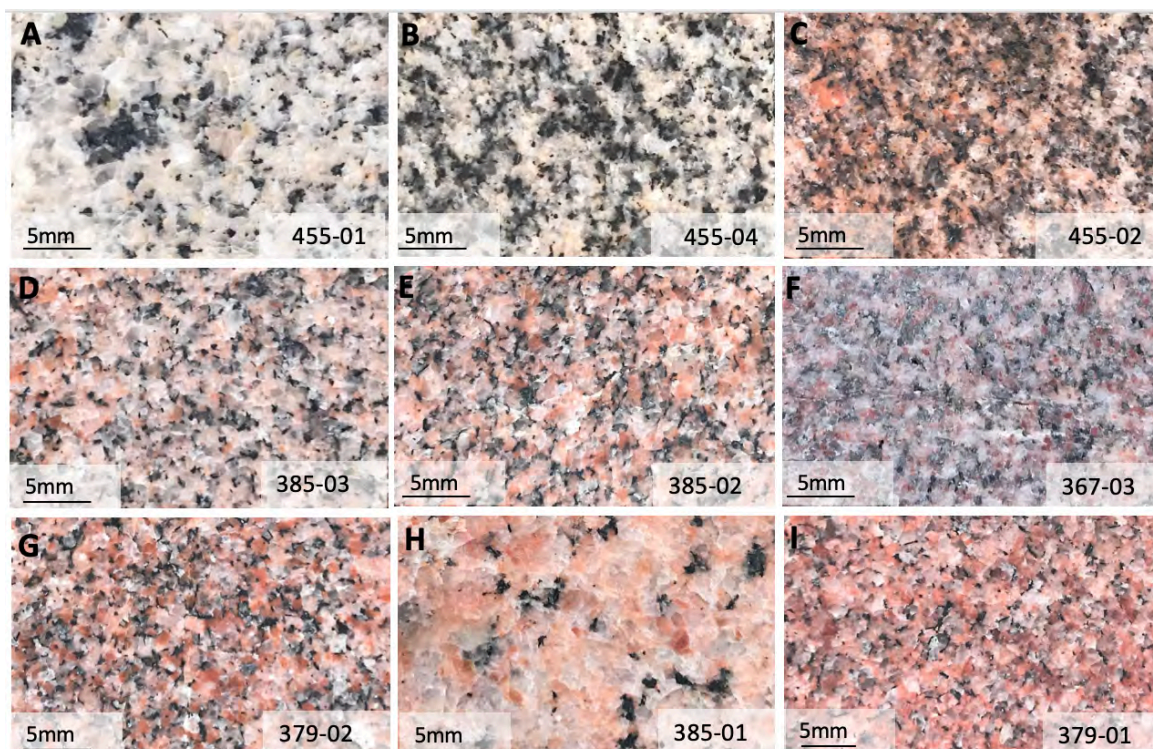
5.1.1 Beskrivning av stuffer

Minst omvandlade graniter (Prov 455-01 och 455-04)

Stenarna har en ljusgrå och vit färg (leukokratisk) med lite rosa inslag. Texturen är faneritisk med jämnstora, fin- till medelkorniga, sammanväxta kristaller som består av kvarts, biotit, kalifältspat och plagioklas. Mineralers placering har ingen prefererad riktning.

Delvis omvandlad granit (Prov 455-02, 385-01;03, 379-01;02, 367-03)

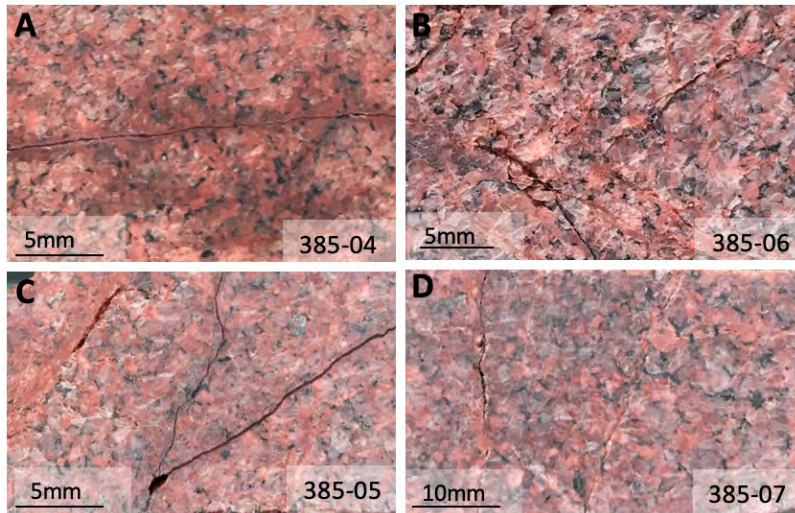
Samtliga stenar är rosa och grå till färgen (leukokratisk) men nyansen av rosa kan variera något sinsemellan dem. De har en faneritisk textur med fin- till medelkorniga, subhedrala korn som är sammanväxta. Stenarna innehåller biotit, kalifältspat, plagioklas och kvarts, med röda fläckar på samtliga mineral. Dessutom förekommer 1-2mm tjocka sprickor med vitt och ljusrosa fyllnadsmaterial.



Figur 6. A-I) Stuffbilder på alla prover som ingår i gruppen *delvis omvandlade prover*.

Omvandlad granit (Prov 385-04;07)

Stenarna är kraftigt vittrade och starkt röda och rosa till färgen. Texturen är faneritisk med jämnstora, fin- till medelkorniga kristaller som är sammanvuxna och har ett grynigare utseende än de andra gruppernas mineral. De innehåller kvarts, kalifältspat, plagioklas och biotit. Proverna är påtagligt uppspruckna och flera sprickor har rosa fyllningsmaterial, medan andra är utan fyllning. På flera prover går bitar att ta loss med händerna och smular sönder längs sprickorna.



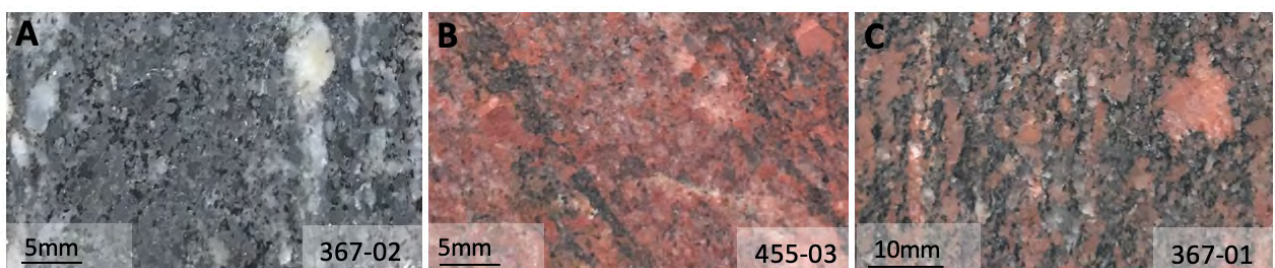
Figur 7. A-D) Stuffbilder på alla prover som ingår i gruppen *omvandlade prover*.

Icke-omvandlad gnejs (Prov 367-02)

Stenen har en mörkt grå (melanokratisk) färg med en finkorning, afantisk textur. Grå och vita bandningar förekommer i en riktning med grå, oidentifierbara mineral och vita plagioklas och kvarts. Biotiter syns tydligt i anslutning till kvartskristaller, men det finns ingen förekomst av rödomvandling.

Delvis omvandlad gnejs (Prov 455-03 och 367-01)

Färgen är mörkt röd och grå (melanokratisk) och innehåller mineral som inte går att urskilja på grund av den gnejsiga strukturen. Det finns tydliga bandningar av mörka och ljusa mineral med röda fläckar som täcker hela provytan. Tunna sprickor med vitt och rosa fyllnadsmaterial inuti förekommer.

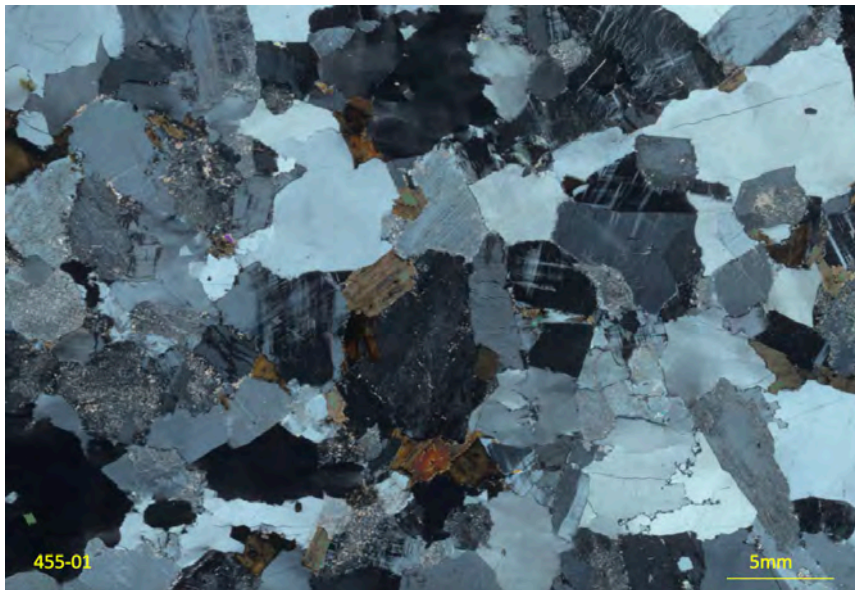


Figur 8. A-C) Stuffbilder på alla gnejsiga prover.

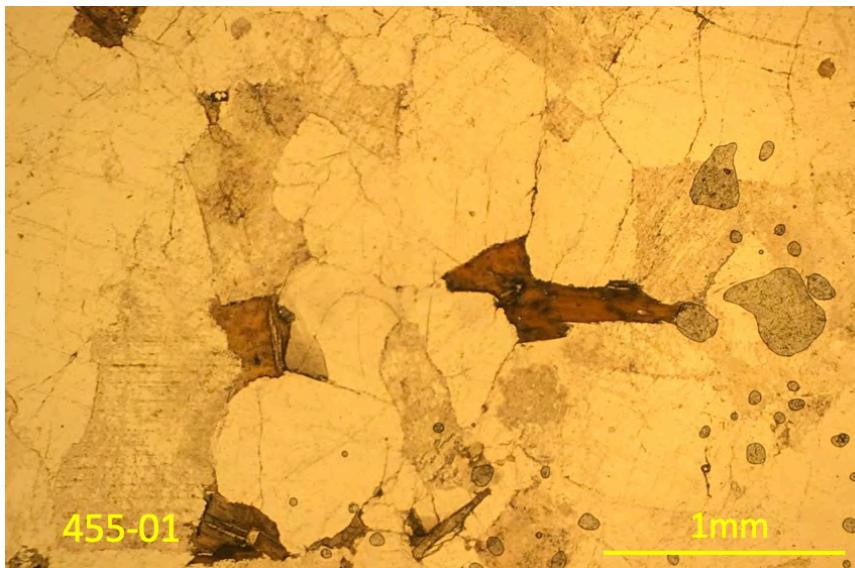
5.1.2 Beskrivning av tunnslip

Minst omvandlad granit (Prov 455-01 och 455-04)

Innehåller fin- till medelkorniga, jämnstora kvarts, kalifältspat, plagioklas och biotit i en mosaikstruktur. En del kvartskorn har mindre sprickor i sig och påträffas ställvis som inneslutningar i poikilitiska fältspater. Då kvartsinneslutningarna har samma utsläckning är de antagligen del av samma korn som blivit överväxt av fältspaten. De flesta plagioklaser har tydlig tvillinglamellering med lite sericitisering från mitten av kornen. Kalifältspat finns som ortoklaser med pertittexturer och mikrokliner med *tartan*-tvillingstrukturer. Biotiter har brun pleokroism och ett fåtal har kloritisering längs dess spaltningssplan. Det förekommer några få kalcitfyllda sprickor. En liten mängd röda fläckar finns kring plagioklas och biotit.



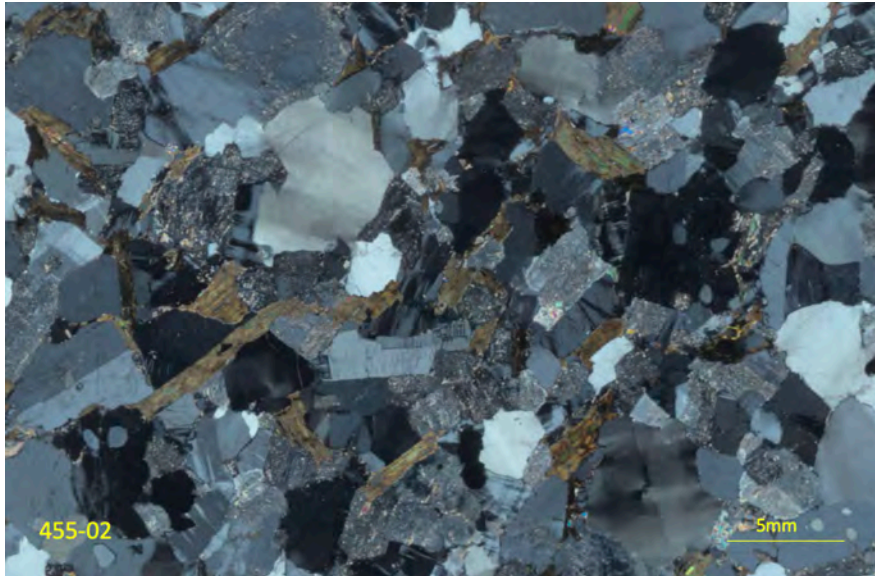
Figur 9. Översiktsbild av mineralogin för prov 455-01 (i XPL). Biotiter är färska, lite sericitisering sker men provet är inte uppsprucket.



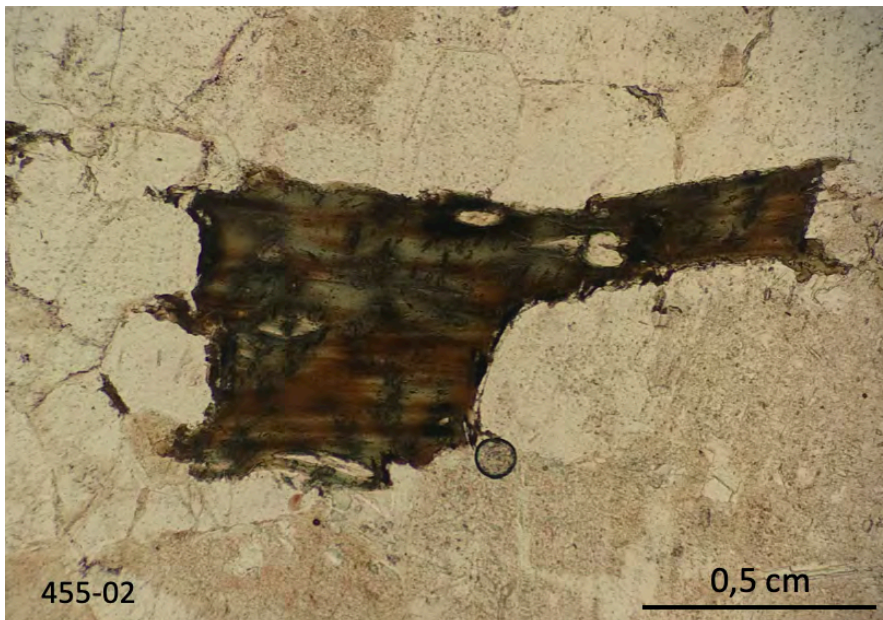
Figur 10. Biotit med brun pleokroism i PPL.

Delvis omvandlad granit (Prov 455-02, 385-01;03, 379-01;02, 367-03)

I dessa prover sker en mer genomgående sericitisering som växer från mitten av plagioklaskornen, men tvillinglamelleringen går fortfarande att urskilja i de flesta korn. Majoriteten av alla mikrokliner är här sammanväxningar av kvarts, biotit och sericitiserad plagioklas. Det sker en ökning av kloritisering längs biotiters spaltningssplan, ett flertal biotitkorn har mörkgrön pleokroism som skiljer sig från kloritens färg och indikerar oxidering. Det sker en ökning av sprickor som ser ut att ledas från biotiter, dessa spricker upp kvarts och fältspater. Röda fläckar förekommer i sprickorna, i biotit och i sericit. Det förekommer kalcitfyllda sprickor som är bredare än de som leds från biotiter, och i omnejd av sprickorna är kloritisering av biotit mer påtaglig.



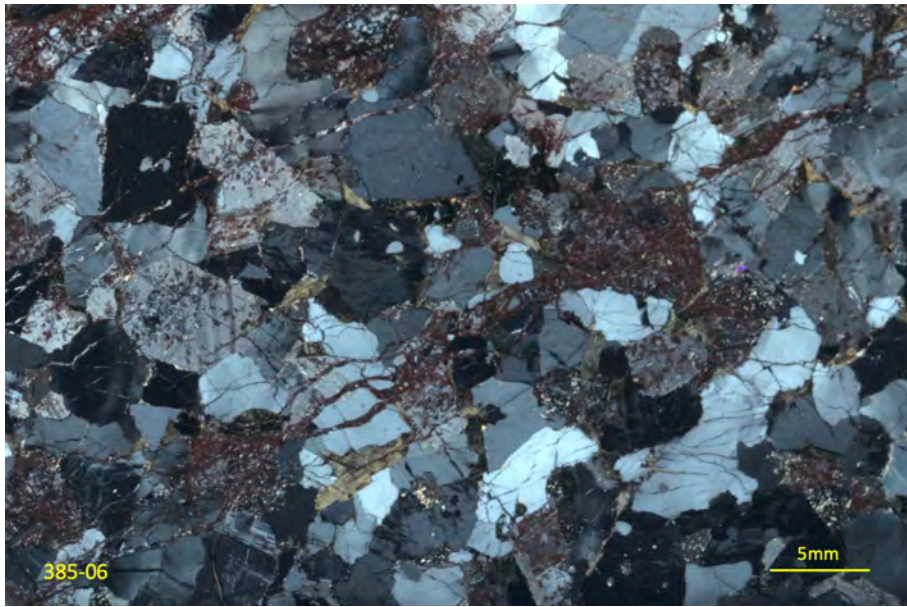
Figur 11. Översiktssbild av mineralogin för prov 455-02 (XPL) som anses representera samtliga delvis omvandlade graniters mineralogi.



Figur 12. Biotit i PPL med ljusgrön omvandling längs spaltningssplan vilket indikerar kloritisering.

Omvandlad granit (Prov 385-04;07)

Proven är kraftigt uppspruckna med mycket sericitisering av plagioklas och röda fläckar som förekommer främst i sprickor, i biotit och plagioklas. En del sprickor saknar fyllnadsmaterial medan vissa innehåller fragment av fältspater, det finns däremot inget kalcit som fyllnadsmaterial. Sprickorna skär alla mineral förutom biotit vilka ser ut att leda sprickorna. Plagioklaser är nästan helt omvandlade till sericit med få eller inget synligt tvillingplan. All biotit har suddig, och ofta avlång form, med mörkgrön pleokroism som generellt är för mörk för att vara klorit.



Figur 13. Översiktligt bild av mineralogin för prov 385-06 (XPL) som anses representera samtliga omvandlade graniters mineralogi. Provet är kraftigt deformerat med sprickighet och sericitisering som också är rödomvandlad.



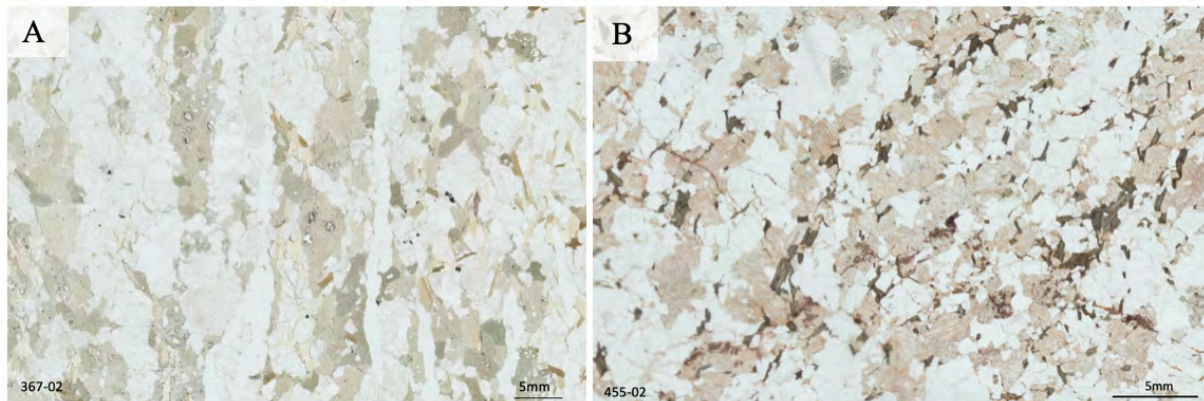
Figur 14. Visar ett flertal mörkt gröna (oxiderade) biotiter som spricker upp kvarts. Sprickor och sericitiserad plagioklas har röda fläckar.

Icke-omvandlad gnejs (Prov 367-02)

Generellt ovittrad sten som innehåller biotit, plagioklas, kvarts och hornblend. Det förekommer tydlig bandning av biotit, plagioklas och hornblend, och i samma riktning som bandningen förekommer kvartsådror. Biotiter har brun pleokroism och plagioklas har ingen till minimal sericitisering. Det förekommer inget kalifältspat eller röda fläckar.

Delvis omvandlad gnejs (Prov 455-03 och 367-01)

Innehåller kvarts, biotit, sericitiserad plagioklas och kalifältspat. Provet har tydlig bandning av biotit och kvarts, med sprickor som innehåller kalcit med röda fläckar. Biotit är både kloritiserad och mörkgrön (oxiderad).



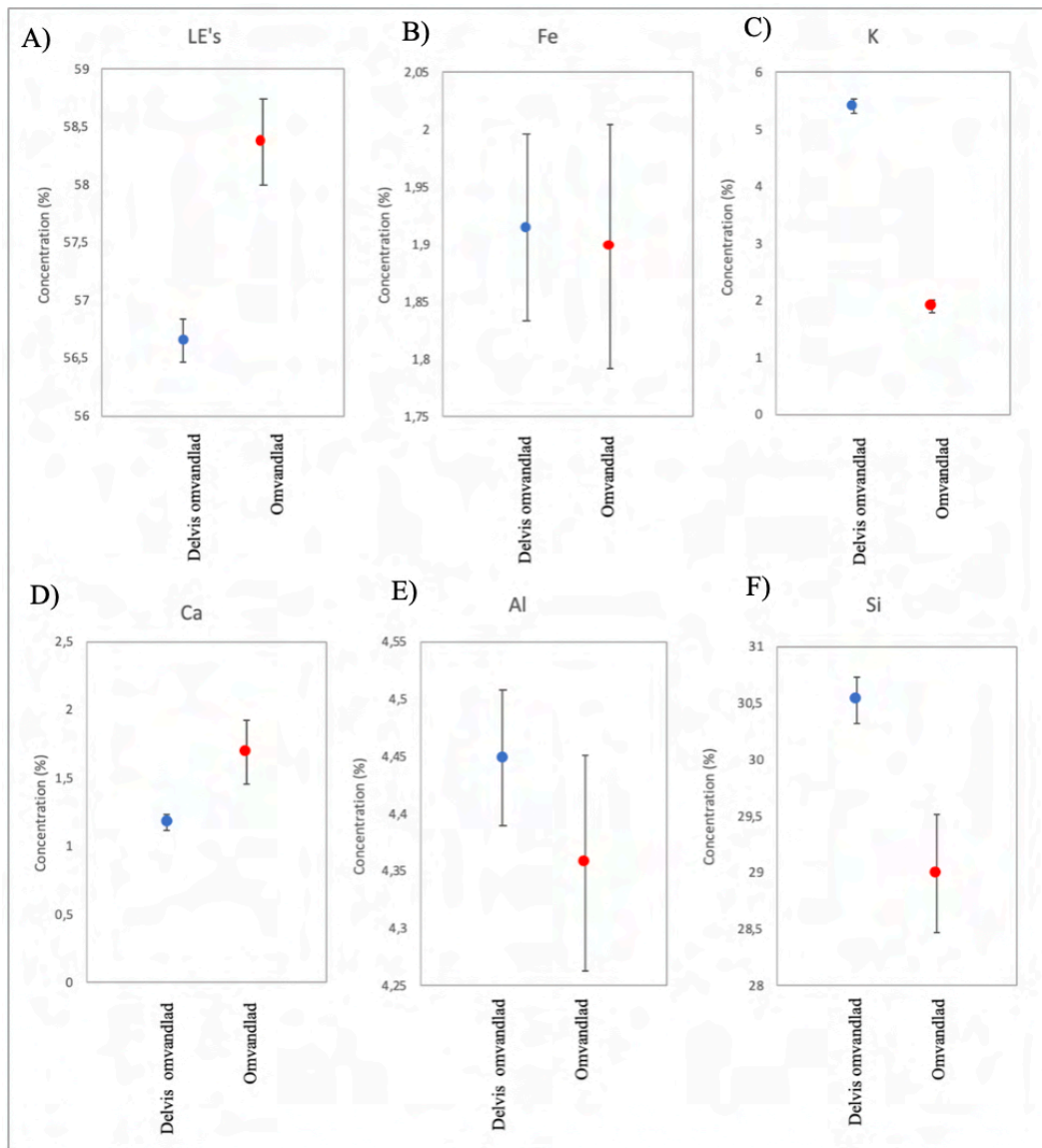
Figur 15. A) Översiktsbild i PPL av icke-omvandlad gnejs. B) Översiktsbild i PPL av delvis omvandlad gnejs. Den delvis omvandlade gnejsen har riklig sericitisering, röda fläckar, mörkgrön biotit och sprickighet.

5.2 Resultat från XRF-mätning och Schmidthammarprovtagning

Uppdelningen av mätresultaten från XRF och Schmidthammarprovtagningen gjordes till de två grupperna delvis omvandlade prover och omvandlade prover. I gruppen för de delvis omvandlade proverna ingick även de prover som saknar rödomvandling (dessa kan benämnas *icke-delvis omvandlade* prover och är prov 455-01 och 04). Anledning till uppdelningen var för att gränsen mellan icke omvandlad, delvis omvandlad och omvandlad inte är helt tydlig och därför krävs en övergripande kategorisering för att få jämförbara resultat. De tre gnejsiga proverna var inte inkluderade i provtagningsmetoderna och är därför inte heller en del av resultatet, vilket innebär att det är ett resultat av 13 prover.

5.2.1 XRF-mätning

De huvudämnen som överskred 1% var följande: Si, Al, Fe, K, Ca och LE (*lätta ämnen*) (tabell A.1 i appendix). *Lätta ämnen* är en sammanställning av de grundämnen vars atomnummer är lägre än natrium (atomnummer 11). Bland dessa finns syre, väte och kol, vilket sannolikt motsvarar förekomst av vatten och koldioxid. De beräknade P-värdena visade att koncentrationen mellan de delvis omvandlade proverna och omvandlade proverna skiljer sig för LE, K, Si och Ca. Al och Fe är inte statistiskt olika då de båda har ett P-värde >0.05 (tabell 1). Medelvärden av de delvis omvandlade- och omvandlade proverna för respektive ämne, inklusive konfidensintervall för varje grupp presenteras i figur 16. Kalium visar störst variation med 3.5% skillnad mellan delvis omvandlade- och omvandlade prover.



Figur 16. A-F: Koncentrationsskillnader mellan delvis omvandlade- och omvandlade prover för de uppmätta huvudämnena.

Huvudämne	LE	Fe	K	Ca	Al	Si
P-värde	6.1431E-11	0.80184935	1.8068E-07	0.00036911	0.10954553	1.9314E-06

Tabell 1. Resultat av T-test för huvudämnenas koncentrationer presenterade i P-värden. Järn och aluminium ger P-värden >0.05 vilket gör att de delvis omvandlade proverna och omvandlade proverna inte är statistiskt olika.

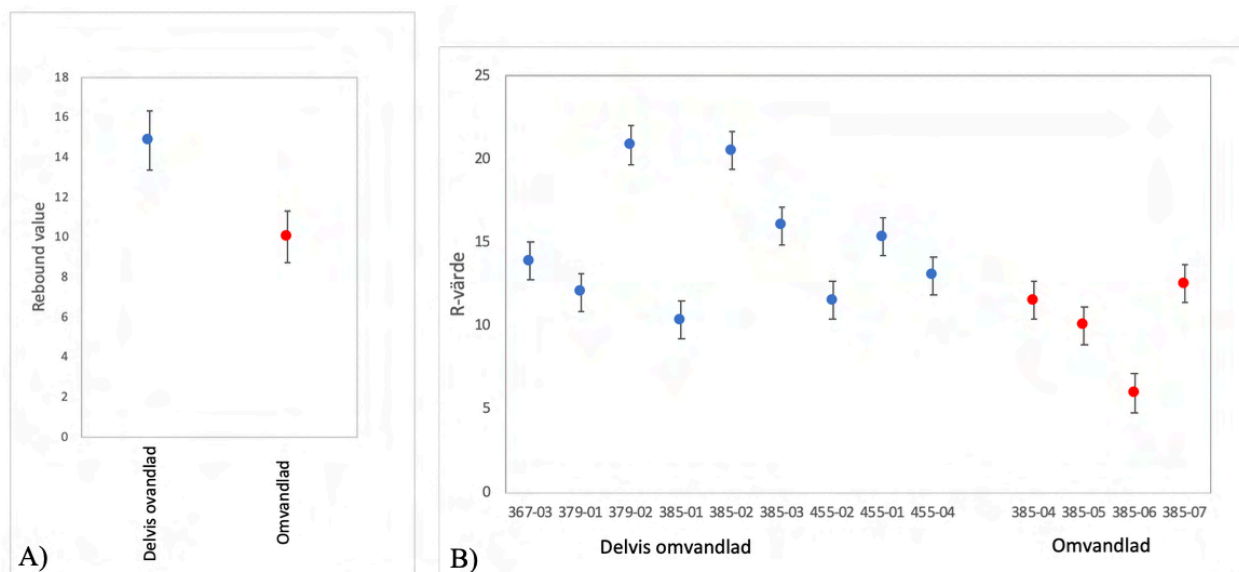
5.2.2 Schmidthammarprovtagning

Medelvärdet från de första R-värdena >10 för samtliga stenar visar en minskad hårdhet hos de omvandlade proverna jämfört med de delvis omvandlade proverna (tabell 2). Från T-test framtogs ett P-värde på 0.036, vilket är <0.05 och innebär att de delvis omvandlade- och omvandlade proverna är statistiskt olika. Medelvärde och konfidensintervall för populationerna togs fram (se tabell A.3 i appendix) och presenteras i figur 18. Resultaten tyder på att de omvandlade proverna är mjukare med ett lägre R-värde än de delvis omvandlade proverna. Detta styrks av de visuella observationer som kunde göras efter hammarslagning på stenarna, där de omvandlade proverna deformerades mest vid slag, även

om några av de delvis omvandlade proverna också gick sönder (se sektion 10.A.2.1 i appendix).

Prov	Medel-R-värde
367-03	13.88
379-01	12
379-02	20.83
385-01	10.33
385-02	20.5
385-03	16
455-01	15.33
455-02	11.5
455-04	13
385-04	11.5
385-05	10
385-06	5.95
385-07	12.5

Tabell 2. Medelvärde från de första uppmätta R-värden >10. Omvandlade prover är markerade i grått.



Figur 18. A) Skillnad i R-värde mellan delvis omvandlade- och omvandlade prover, baserat på dess medelvärde och konfidensintervall. R-värden från de omvandlade stenarna är 5 enheter mindre än de delvis omvandlade proverna. B) Sammanställda R-värden för varje prov.

6. Diskussion

6.1 Mineralogiska och geokemiska observationer kopplat till reaktionsvärde (R).

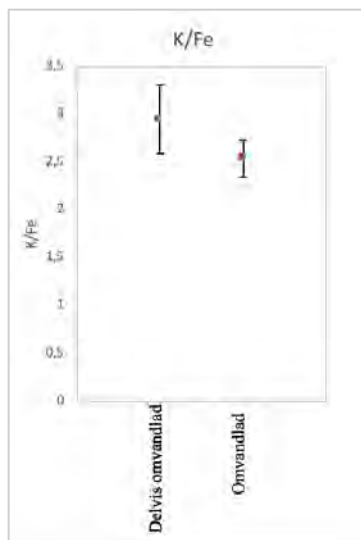
Det faktum att kalifältspat och kvarts inte har ändrats gällande storlek och form men har spruckit upp i de omvandlade proverna, indikerar att spröddeformation har skett under låg temperatur. Detta eftersom kvarts deformerar sprött först under 250-300°C. Uppspruckna kvartskristaller har påvisats med biotit inuti som ser ut att leda sprickbildningen, vilket tyder på att biotit troligtvis orsakat sprickorna. Att biotiten går från att vara färsk med brun pleokroism, till suddig ljusgrön och mörkgrön pleokroism ju mer omvandlade proverna är,

indikerar kloritisering och oxidering av biotiten. För båda dessa reaktioner krävs tillförsel av vatten (-OH) vilket påvisas av den förhöjda koncentrationen lätta element (LE) för de omvandlade proverna (figur 16a). Då kloritisering av biotit främst är ett resultat av retrograd metamorfos (Philpotts & Ague, 2009) medan oxidering är resultat av vittringsprocesser (Goodfellow, et al., 2016), kan dessa altereringar skett i olika händelseförlopp.

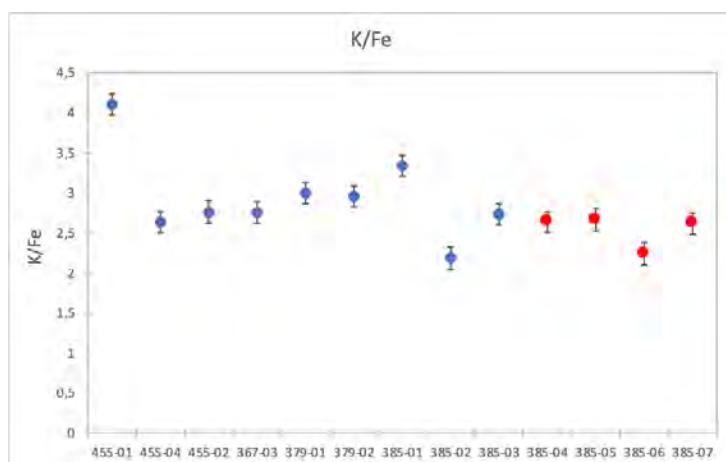
Från områdets geologiska historia framgår att Stockholmsgraniten intruderade i slutet av bergskedjeveckningen som orsakade den plastiska deformationen i området. Från beskrivning av ramtunnel 411 framgår en kraftig deformationszon i området. Det kan innebära att i slutskedet av orogenesis när temperaturerna minskade så utsattes graniten närmast deformationszonen för lågradsmetamorfo i kombination med vatteninflöde. Det ledde till kloritisering av biotit, medan graniten som var längre från zonen förblev opåverkad av metamorfosen. När de plastiska deformationszonerna reaktiverades sprött via bergsspänningar kan samma granit vars biotiter hade blivit kloritiserade (närmast deformationszonen) ha blivit utsatt för vattenflöde via den spröda svaghetszonen, vilket orsakade oxideringen av biotiter närmast den.

Sericitisering är också en process som inleds genom tillförsel av vatten. Med utförda metoder går det inte att avgöra om plagioklas blev sericitiserad genom vittringsprocesser eller om det skedde under den metamorfa omvandlingen. Det som stödjer att sericitisering har skett i vittringsprocesser är att när biotit oxideras frigörs K^+ genom att den byts ut mot en vattenmolekyl (Isherwood & Street, 1976), och för att plagioklas ska sericitiseras krävs tillförsel av K^+ ($NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8 + H_2O + K^+ \rightarrow KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$) (Winter, 2013). Det skulle kunna tyda på att ett utbyte mellan biotit och plagioklas har skett under oxideringen. Däremot visar XRF-data en minskning av K^+ för högre omvandlingsgrad (figur 16c), vilket snarare talar för att K^+ från oxideringen försvinner från stenen. Den observerade ökade sericitisering trots minskad koncentration av K^+ stödjer att sericitisering initierades under metamorfosen, där källan för K^+ istället kom från kloritiseringen av biotit ($(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(F, OH)_2 + H_2O \rightarrow (Mg,Fe)^3(Si,Al)^4O^{10}(OH)^2 \cdot (Mg,Fe)^3(OH)^6 + K^+$). Det kan innebära att den uppmätta skillnaden i K-koncentrationen mellan proverna endast är ett resultat av oxidering av biotiterna, då K^+ inte tas upp av något annat mineral utan försvinner från systemet.

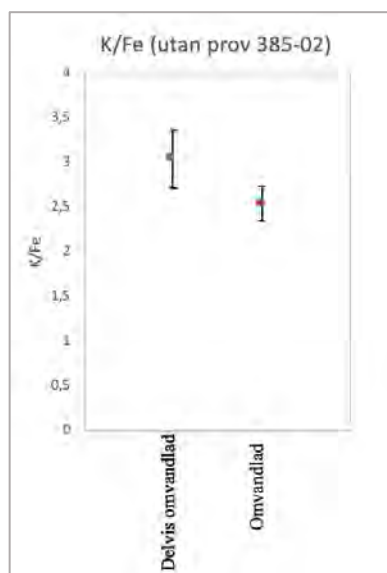
Eftersom biotit är det enda mineral i graniten som innehåller järn och eftersom biotitmängden i graniten kan variera för olika prover, utfördes T-test, enligt samma metod som för de enskilda huvudämnena, för förhållandet mellan K och Fe (K/Fe). Resultatet gav ett P-värde på 0.075, vilket innebär att de två grupperna inte är statistiskt olika, således är skillnaden mellan grupperna inte tillräckligt stor för att statistiskt kunna stödja att biotitoxideringen är orsak till minskningen av K^+ (figur 19). Förhållandet mellan Fe och K för varje enskilt prov (figur 20 och tabell 3), visar däremot att de omvandlade proverna har något lägre värden för K/Fe än de delvis omvandlade, med undantag för det delvis omvandlade provet 385-02, som har uppmätts med det lägsta värdet. Om prov 385-02 skulle behandlas som ett avvikande värde och exkluderas från beräkningarna uppmätts ett P-värde på 0.025, vilket gör att K/Fe för grupperna är statistiskt olika (figur 21) och kan således stödja biotitoxidering som huvudsaklig orsak till förlust av K^+ . Detta konstateras även av Buss et al (2008) som med hjälp av en Synchrotron X-ray mikrosond visade att färsk biotit har hög K/Fe ratio, medan oxiderad har låg.



Figur 19. Den sammanställda kvoten K/Fe för delvis omvandlade- och omvandlade prover.



Figur 20. Visar ration K/Fe för varje enskilt prov.



Figur 21. Sammanställda kvoten K/Fe för delvis omvandlade- och omvandlade prover där prov 385-02 är exkluderat.

Prov	K/Fe
455-01	4.10224401
455-04	2.62892347
455-02	2.76397852
367-03	2.75498274
379-01	3.0006571
379-02	2.95263587
385-01	3.33839058
385-02	2.18404295
385-03	2.73579651
385-04	2.63642469
385-05	2.66176471
385-06	2.24389522
385-07	2.61455437

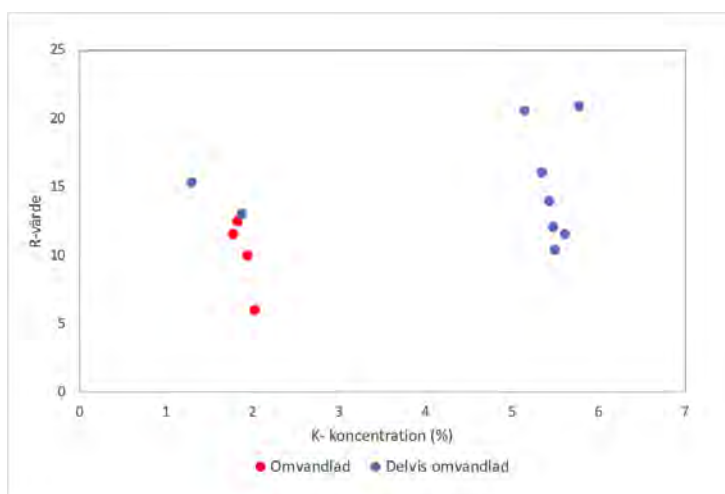
Tabell 3. K/Fe för de enskilda proverna. Prov 385-02 är gråmarkerat eftersom det uppvisar ett lägre värde än de andra.

Sericiticerings leder till förlust av kalcium och natrium (Mathieu, 2018) vilket kan vara källan till kalcitutfällningarna i sprickorna. Lösligheten av kalcit minskar med ökad temperatur (Philpotts & Ague, 2009), vilket indikerar att kalcium tillsammans med de fluider som intruderade i den metamorfa händelsen har bildat kalcit som fällts ut. Det bekräftas av att kalcitfyllda sprickor huvudsakligen påträffas i de mindre omvandlade proverna. Detta skulle stödja teorin om att sericiticerings (och kalcitutfällning) skett under metamorfosen. Därefter,

när temperaturen var lägre och vatten och koldioxid (kolsyra) trängde in via den spröda deformationen, löstes kalcit istället upp till lösa joner och karbonater och försvann ur systemet ($\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$). Den ökade kalciumkoncentrationen i de omvandlade proverna talar dock emot detta (figur 16d).

När biotit oxiderar så bildas järnoxid genom att Fe^{2+} blir till Fe^{3+} och oxiden hematit (Fe_2O_3) bildas, vilket fläckar provet rött (Buss, et al., 2008). Eftersom hematitutfällning finns i en mindre mängd även i de minst omvandlade proverna, är det rimligt att anta att biotiten har oxiderats även i dessa. Oxideringen av järn påverkar inte järnkonzentrationen i biotiten, vilket bekräftas med XRF-data som visar en relativt oförändrad mängd Fe mellan de delvis omvandlade- och omvandlade proverna (figur 16b). Den konstanta järnkonzentrationen tyder på en in situ-kemisk omvandling, vilket innebär att det inte har skett ett utbyte av järn med vattnet. Det styrker teorin om att biotit (vilket är den enda järnbärande mineralen) är källan till det järn som oxiderar och rödfleckar stenarna, istället för en extern källa (Plümper & Putnis, 2009).

När järnet oxiderar sker även expansion av biotiten (Fletcher, et al., 2006), som leder till ökad elastisk spänning av kringliggande mineral, vilket leder till sprickbildning. Denna teori stöds av studier gjorda av Buss et al (2008), Goodfellow et al (2016) och Isherwood & Street (1976) där biotitoxidering och expansion har påvisats som grundorsak till vittring av granitoider. I studier av Isherwood & Street (1976) och Goodfellow et al (2016) beskrivs att biotitoxidering leder till ökad porositet och minskad densitet, vilket, i sin tur, leder till ökad hydraulisk konduktivitet. Goodfellow et al (2016) uppmätte att konduktiviteten ökade med en till tre magnituder mellan färskt berg och biotitvittrat berg. Resultaten av Schmidthammarprovtagningen bekräftar att vittringsgraden ökar ju mer omvandlade proverna är, då de omvandlade proverna har lägre uppmätt R-värde. Att R-värdena för omvandlade prover ökade vid upprepade slag tyder på stenmassan komprimerades och att porositeten var högre för dessa prover. Då orsaken till vittringen förväntas vara biotitoxidering, vilket påvisas av en minskad kaliumkoncentration, bör en minskning av R-värde följas av en minskad mängd kalium, vilket visas i figur 22. Eftersom omvandlade prover uppskattas vara mer porösa och grundvattenståndet i området kring ramptunnel 411 är högt, är det relevant att ta hänsyn till den befintliga sprickbildningen, som på sikt kan utökas vid fortsatt vatteninflöde och biotitoxidering. Däremot har denna studie inte utforskat hur lång tid vittringsprocessen tar och därför utelämnas vidare analyser kring detta.



Figur 22. R-värdena plottade mot kaliumkoncentrationen för de delvis omvandlade- och omvandlade proverna. De hårdare stenarna innehåller mer kalium än de mjukare.

6.2 Felkällor

Följande felkällor har uppmärksammats i metodutförandet.

- De omvandlade proverna representerar endast fyra stenar medan de delvis omvandlade representerar nio stenar, och dessa nio stenar varierar i omvandlingsgrad från icke omvandlad till påtagligt omvandlad. Det innebär att det dels finns mer data hämtat från de delvis omvandlade stenarna, men också att denna grupp representerar flera olika omvandlingsgrader.
- Trots att stenarna samlades för att representera den ökande omvandlingsgraden, så motsvarar inte provernas ursprungsplats (km) den observerade omvandlingen. De mest omvandlade proverna har påträffats på längdmätning km 0/385, vilket längdmässigt är mitt emellan de minst delvis omvandlade proverna (455-01,04) och de mer delvis omvandlade proverna (367 och uppåt). Det kan dels bero på att längs sträckan förekommer partier utan sprickor och således ingen omvandling, dels att det finns en osäkerhet gällande stenarnas ursprungsplats eftersom att de togs från marken.
- Under koncentrationsmätningen med XRF:en fanns en risk att ämnen i luften mättes vid förekomst av ojämnheter av provytan eller om XRF:en inte hölls fullkomligt jämt längs med ytan (vilket väger in den mänskliga faktorn). Dessutom hindras fullständig analys av geokemin eftersom ämnen med atomnummer mindre än Na eller större än Mg inte registreras.
- För Schmidthammarmätningen hade stenarna inte tillräckligt stor volym, provställningsplattan var inte tillräckligt tung och formen på proven varierade så att vissa stenar fästes sämre och rörde på sig vid slag. Alla dessa parametrar kan ha resulterat i för låga R-värden vid provslag.
- På proverna utfördes hammarslag utan tillräckligt stort avstånd mellan provpunkterna, vilket kan innebära att slag på en punkt kan ha försvagat ytan för nästa punkt. Slag utfördes emellanåt med mindre än 1cm avstånd till kanten, vilket kan ha lett till spridning av reaktionsvärdet.
- Slag utfördes trots sprickbildning på de mest delvis omvandlade proverna och på de omvandlade proverna, medan provslagning på resterande delvis omvandlade prover avslutades vid sprickbildning. Anledningen till att utförandet var inkonsekvent beror på att flera prover hade sprickbildningar redan innan provtagning. Enligt ISRM:s standardmetod så borde dessa ha avfärdats, men det hade resulterat i få mätvärden och proverna hade då inte kunnat jämföras med varandra.
- Att endast R-värden som var högre än 10 användes innebar att nollvärden uteslöts som representativa mätvärden. Det blir ett problem framförallt vid provslagning på mer omvandlade stenar, där tidigt uppmätta nollvärden potentiellt representerar bergets faktiska hårdhet, medan upprepade slag snarare visar på vittringsgrad. Vid upprepade slag förväntas R-värdet att öka om porer komprimeras, men minska om uppkomst av mikrosprickor uppstår (Aydin & Basu, 2005). I detta fall ökade värden vid upprepade slag, vilket tyder på att kompression av porer har lett till ökad motståndskraft i stenen och därför förväntas omvandlade prover att ha felaktigt för höga R-värden (för mätning av bergets hårdhet).

7. Slutsats

Från studien kan de följande slutsatser dras.

- Både metamorfa- och vittringsprocesser har orsakat de observerade omvandlingar av berggrunden, med fluidinducerad biotitvittring som huvudsaklig orsak till den sprickbildning som orsakar porositeten och rödomvandlingen.
- Omvandlingen av berggrunden har visats vara kopplad till deformationszoner som format bergmassan både plastiskt och sprött i olika skeden.
- För att ta reda på omvandlingsgraden av granit kan koncentrationsmätningar av kalium och järn utföras, där K/Fe visar om biotitoxidering har skett. Ett lågt värde indikerar mer vittrad bergmassa.

7.1 Förslag till fortsatta studier

- Rödomvandlade stenar från olika platser längs Förbifarten skulle kunna undersökas, för att se om biotitoxidering orsakar vittring på flera ställen.
- Ytterligare bevis för oxidering kan tas fram genom att göra mätningar med en Synchrotron X-Ray mikrosond, där kvoten Fe^{2+} till Fe^{3+} kan detekteras på individuella biotitkorn (Goodfellow, et al., 2016) och (Buss, et al., 2008).
- Densitets- och porositetstester kan utföras på stenprover för att se hur stor mängd vatten som genomsläpps, vilket kan indikera hur omvandlad berggrunden är, då mängd fluider (LE) är direkt kopplat till biotitoxideringen.
- Som komplement till Schmidhammarmätning skulle mätning av *brottgräns under kompression* kunna göras, där stenar utsätts för högt tryck istället för enskilda provslag. Det är mer representativt för de påfrestningar som berget utsätts för i verkligheten och mer relevant för tunnelkonstruktioner.

8. Tack till

Jag vill tacka mina handledare Alasdair Skelton (SU) och Felix Makowsky (ÅF) för deras stöd och hjälp under detta arbete, med ett extra stort tack till Felix för hans ovärderliga engagemang och intresse att handleda mig i projektet. Tack till ÅF för att jag fick möjligheten att skriva projektet för er, och för att jag fick följa med under en arbetsdag på företaget. Till sist men inte minst vill jag tacka Draupnir Einarsson för tillverkning av Schmidthammarställningar och för att jag fick ockupera en liten del av hans verkstad.

9. Källor

- Aydin, A., 2009. ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised version. *International journal of rock mechanics & mining sciences*, Volume 46, pp. 627-634.
- Aydin, A. & Basu, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, Volume 81, pp. 1-14.
- Basu, A. & Aydin, A., 2004. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 41, p. 1211-1214.
- Buss, H. L., Peter, S. B., Samuel, W. M. & Brantley, S. L., 2008. Weathering of the Rio Blanco quartz diorite, Luquillo Mountains, Puerto Rico: Coupling oxidation, dissolution, and fracturing. *Geochimica et Cosmochimica*, Volume 72, p. 4488-4507.

- Demirdag, S., Yavuz, H. & Altindag, R., 2009. The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46 (2009) 725–730), Volume 46, pp. 725-730.
- Earle, S., 2015. *Physical Geology*. Victoria, B.C: BCcampus.
- Fletcher, R., Buss, H. & Brantley, S., 2006. A spheroidal weathering model coupling porewater chemistry to soil thicknesses during steady-state denudation. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 244, p. 444–457.
- Goodfellow, B. W. et al., 2016. The chemical, mechanical, and hydrological evolution of weathering granitoid. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Volume 121, pp. 1410-1435.
- Hjälm, K., 2015. *Ingenjörsgelogisk prognos Bergteknik Handling 13.5. E4 Förbifart Stockholm. FSE403 Bergtunnlar Johannelund*, Stockholm: Trafikverket.
- Iserwood, D. & Street, A., 1976. Biotite-induced grossification of the Boulder Creek Granodiorite, Boulder County, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, 7(87), pp. 366-370.
- Johansson, Å., 2019. A refined U-Pb age for the Stockholm granite at Frescati, east-central Sweden. *GFF*, Volume 141:1, pp. 40-47.
- Mathieu, L., 2018. Quantifying Hydrothermal Alteration: A Review of Methods. *Geosciences*, 8(245), pp. 1-27.
- Philpotts, A. R. & Ague, J. J., 2009. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. 2nd ed. Cambridge: Pearson Education.
- Plümper, O. & Putnis, A., 2009. The Complex Hydrothermal History of Granitic Rocks: Multiple Feldspar Replacement Reactions under Subsolidus Conditions. *Journal of Petrology*, 50(5), pp. 697-987.
- Poole, R. & Farmer, I., 1980. Consistency and repeatability of Schmidt hammer rebound data during field testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 17(3), pp. 167-171.
- Price, D. G., 2009. *Engineering Geology Principles and Practice*. 1st ed. Berlin: Springer.
- Proceq, 2017. *instruktionsmanual för Proteq L-hammare*. [Online] Available at: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/OriginalSchmidt_Operating%20Instructions_Multilingual_high.pdf [Accessed 04 05 2019].
- Wahlgren, C.-H., Schoning, K., Tenne, M. & Hansen, L. M., 2018. Stockholmsområdets berggrund, jordarter, geologiska utveckling och erfarenheter från infrastrukturprojekt. *SGU-rapport 2018:08*.
- Winter, J. D., 2013. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. 2nd ed. s.l.:Pearson Education.

10. Appendix

10.A.1 XRF-mätningar

Huvudämne	LE		Fe		K		Ca		Al		Si	
	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad
Vikt %	56.833	58.489	1.522	1.264	4.271	4.563	1.27	1.433	4.366	4.277	32.4	29.667
	56.376	58.705	1.211	2.068	6.07	4.661	1.099	1.384	4.58	4.534	30.311	28.277
	56.576	59.097	1.195	2.366	5.633	4.825	1.248	1.056	4.836	4.349	30.253	27.885
	56.394	59.083	1.096	1.721	5.845	5.168	1.05	1.432	4.275	4.372	31.107	28.33
	56.56	58.817	1.362	1.492	4.607	4.712	1.097	2.789	4.343	4.152	32.114	29.384
	55.929	58.492	1.661	1.845	5.349	4.998	1.108	1.593	4.568	4.579	31.663	28.267
	56.408	58.405	1.133	1.224	5.443	4.187	1.08	2.322	4.319	4.863	30.979	28.226
	56.324	58.932	2.179	1.832	5.668	4.698	1.333	1.54	4.429	4.609	30.398	27.974
	57.041	58.414	1.644	1.803	5.78	4.093	1.243	1.122	4.59	4.538	30.244	28.423
	55.912	57.127	1.652	2.252	5.132	5.2	1.226	1.238	4.031	4.867	32.686	28.564
	57.686	57.153	1.842	2.082	4.38	5.753	1.013	2.253	4.38	4.09	29.623	30.176
	56.581	58.484	2.36	2.111	4.941	4.357	1.469	1.094	4.503	3.813	30.674	29.858
	56.614	57.694	1.802	2.15	5.089	4.424	1.329	1.101	4.586	3.839	30.441	30.681
	56.938	57.456	2.043	1.856	5.168	4.906	1.028	3.023	4.28	4.23	30.293	29.906
	56.949	57.142	1.638	1.425	5.145	5.612	1.052	1.978	4.26	4.215	29.825	30.991
	55.842	56.196	2.106	1.786	5.736	5.894	1.317	2.143	4.026	4.086	31.5	31.44
	57.076	58.936	1.563	1.71	4.487	5.406	1.055	1.988	4.914	4.352	29.575	28.005
	56.356	58.67	1.775	1.805	4.553	4.208	1.085	1.942	4.198	3.959	31.954	30.083
	56.202	57.406	1.973	2.104	4.619	5.825	1.189	1.781	4.366	4.591	30.932	29.197
	55.518	57.747	2.479	2.419	5.382	5.381	1.038	1.349	4.322	4.074	31.745	29.701
	56.573	58.841	2.008	1.779	5.066	4.545	1.114	1.027	4.706	4.467	30.44	27.736
	56.793	58.645	1.589	2.755	5.055	4.454	1.076	1.545	4.556	4.308	29.873	28.277
	56.61	57.725	1.78	1.929	5.531	5.507	1.572		4.723	4.421	29.642	28.867
	56.329	62.411	2.432	2.302	6.383	3.793	1.039		4.716	4.699	30.063	23.36
	56.735	61.867	2.558	1.626	5.79	4.579	1.425		4.504	4.579	29.651	25.855
	56.035	59.715	1.817	1.793	5.259	4.7	1.012		4.47	4.682	30.925	26.599
	56.297	60.211	1.469	2.595	5.59	4.321			4.306	4.514	30.428	25.941
	56.621	58.9	1.981	1.413	5.289	4.971			4.675	4.594	29.171	27.877
	55.571	59.338	1.839	2.342	5.877	3.849			4.247	4.343	31.896	27.966
	56.12	58.445	2.154	1.737	5.007	4.767			4.638	4.285	30.689	29.04
	57.31	57.267	1.78	1.628	5.005	4.716			4.134	3.958	30.51	31.556
	55.954	57.119	1.4	2.098	5.644	5.223			4.303	4.374	31.728	30.058
	59.019	57.243	2.057	1.421	6.67	5.664			4.01	4.553	28.019	30.242
	59.586	57.251	1.578	1.879	6.59	5.112			4.65	4.679	28.67	30.034
	57.87	57.323	1.646	1.753	4.932	4.846			4.59	4.083	29.17	31.165
	59.596	57.681	1.967	2.055	5.889	4.316			4.336	4.173	30.665	30.792
	57.435	57.843	1.558	1.86	4.376	4.35			4.187	3.642	30.519	31.161
	58.327	58.111	2.353	2.092	4.87	4.503			4.038	4.895	31.272	28.985
	59.49	57.44	1.769	1.903	5.161	4.81			4.047	4.019	29.046	30.522
	59.123	58.872	2.009	1.656	5.848	4.424			4.281	4.629	29.339	28.543
57.305		1.791		4.818				4.205		29.867		
59.623		1.526		5.764				3.851		30.223		
56.649		2.442		5.814				4.415		30.248		
55.78		1.864		5.72				4.608		31		
56.299		2.11		6.609				4.643		30.767		
56.036		1.858		6.465				4.498		29.586		
56.017		1.99		5.003				4.73		30.061		
56.844		1.87		6.089				4.251		30.691		
55.794		2.154		5.123				4.484		30.81		
56.796		2.053		6.09				4.439		30.629		
56.013		1.909		5.236				4.798		30.313		
57.109		1.879		5.479				4.33		30.127		
57.004		1.293		4.162				4.2		31.927		
57.584		1.105		4.395				4.396		30.59		
56.793		2.411		4.75				3.298		33.839		
56.199		2.532		6.13				3.91		32.397		
56.292		2.429		5.612				4.627		30.043		
55.606		2.321		6.02				4.294		33.398		
55.953		2.657		6.223				4.594		31.659		
56.721		2.246		6.736				4.667		30.089		
56.159		2.361		5.503				4.557		30.738		
57.426		2.116		5.839				3.669		31.896		
57.126		2.159		4.4				4.685		28.554		
56.809		1.768		4.918				4.32		30.517		

55.674	2.307	5.587		4.68	30.944
55.697	1.844	5.312		4.849	30.335
55.635	1.682	4.825		5.029	29.767
56.561	2.201	4.772		4.35	30.807
56.523	2.006	5.413		4.529	30.562
56.448	2.492	5.179		4.413	30.377
55.521	1.577	5.279		4.406	30.863
56.314	1.455	4.696		4.744	30.237
56.328	2.152	6.295		4.515	31.136
56.544	2.06	5.942		4.854	28.842
55.603	1.688	5.058		4.566	31.015
56.602	2.199	5.287		4.402	30.952
56.743	1.82	5.078		4.636	29.635
56.612	2.609	6.002		4.418	30.355
55.445	1.465	5.343		4.403	30.523
56.14	2.347	5.472		4.768	30.696
56.054	2.26	4.318		4.185	31.655
56.492	2.368	5.449		4.899	30.025
56.272	1.961	5.774		4.422	30.415
56.254	1.582	5.756		4.572	30.321
56.283		5.858		4.764	29.659
56.388		6.362		5.054	29.424
56.257		5.222		5.129	28.125
57.134		5.976		4.378	30.559
56.32		5.721		4.604	29.421
55.561		5.388		4.437	30.078
56.897		4.683		4.438	29.412
57.144		5.366		4.04	30.81
55.76				4.491	31.655

Tabell A.1. Mätvärden från XRF-data.

Huvudämne	Medelvärde(vikt%)		Standardavvikelse		Konfidensintervall	
	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad	Delvis omvandlad	Omvandlad
LE	56.65217204	58.367325	0.913122842	1.204375593	0.18558199	0.373233
Fe	1.91546429	1.898275	0.37890777	0.34367844	0.1065051	0.1065051
K	5.406967391	1.898275	0.59951758	0.34367844	0.12250564	0.1065051
Ca	1.17565385	1.68786364	0.15504707	0.56128164	0.05959708	0.23454036
Al	4.44874194	4.35715	0.29178111	0.30197517	0.05930124	0.09358135
Si	30.52695699	28.990275	1.02360183	1.6835792	0.20803561	0.52173701

Tabell A.2. Medelvärde, standardavvikelse och konfidensintervall för huvudämnena i de två grupperna.

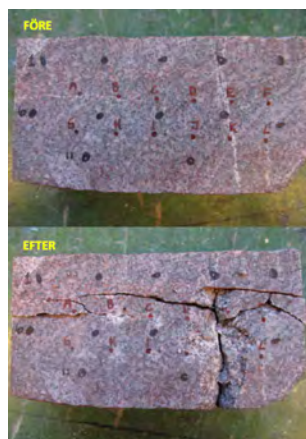
10.A.2 Schmidthammare

Grupp	Delvis omvandlad	Omvandlad
Medelvärde (R)	14.8198765	9.9875
Standardavvikelse	3.54885377	2.49508893
Konfidensintervall	1.45034819	1.30698349

Tabell A.3. Medelvärde, standardavvikelse och konfidensintervall för medelvärdet av de två gruppernas R-värde.

10.A.2.1 Detaljerat resultat från provslagning för samtliga prover

Prov: 367-03			
Tjocklek: 3,5-3,8cm			
Area på slagyta: 43,8cm ²			
Vinkel på slagyta: 3°			
Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1 -		FÖRSTÖRD AV SLAG PÅ B
	2 -		
	3 -		
	4 -		
	5 -		
B	1	0	
	2	0	
	3	10	
	4	10	
	5	0	HELA PUNKT A SPRICKER BORT HÄR.
C	1	0	
	2	0	
	3	10	DET SPRICKER UPP RUNTOMKRING (KANSKE MOSAS DET IHOP HÄR DÄRAV HÖGRE VÄRDE)
	4	13	
	5	12	
D	1	13	
	2	14	
	3	14	
	4	14	
	5	14	
E	1 -		
	2		
	3		
	4		
	5		
F	1	18	SPRICKER UPP MYCKET I PUNKTEN
	2	18	
	3	20	
	4	16	
	5	17	
G	1	18	EXISTERANDE SPRICKA VID A,B SPRICKER UPP MER
	2	20	EXISTERANDE SPRICKA VID A,B SPRICKER UPP MER
	3	19	EXISTERANDE SPRICKA VID A,B SPRICKER UPP MER
	4	20	NY LITEN SPRICKA INTILL A,B SPRICKAN
	5	20	
H	1	16	SPRICKA VID E,K DAMMAR.
	2	16	
	3	16	
	4	15	
	5	15	
I	1	10	
	2	0	EXISTERANDE SPRICKA VID E,K SPRICKER UPP
	3	0	
	4	0	
	5	0	
J	1	16	DET SPRICKER UPP VID PUNKTEN.
	2	20	
	3	20	
	4	20	
	5	20	
K	1 -		GICK SÖNDER VID HAMMAR PÅ L
	2 -		
	3 -		
	4 -		
	5 -		
L	1	14	DET SPRICKER UPP FRÄMST OMRING PUNKTEN. PUNKT K BLIR FÖRSTÖRD. MEN DENNA PUNKT MÄTS INNAN K.
	2	17	
	3	18	
	4	18	
	5	16	



Prov: 379-01
 Tjocklek: 4,3-4,5cm
 Area på slagyta: 33,7cm²
 Vinkel på slagyta: 4°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	stenen åkte ner rejält
	2	14	stenen åkte ner lite
	3	14	existerande ifyllt spricka till vänster om A börjar spricka upp
	4	14	sprickan spricker upp helt
	5	12	breddar sprickan något
B	1	0	
	2	0	
	3	0	
	4	11	stenen har möjligtvis tryckts ner i stället bättre här pga blev lite ojämnt placerad efter sprickbildningarna.
	5	12	
C	1	0	ifyllt spricka till höger om C spricker upp helt
	2	0	stenen sjunker ner lite
	3	0	stenen sjunker ner lite
	4	11	stenen har möjligtvis tryckts ner i stället bättre här pga blev lite ojämnt placerad efter sprickbildningarna.
	5	10	
D	1	0	Resten av slagen har tydlig påverkan av sprickan till höger och sprickan till vänster om A.
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	0	



Prov: 379-02
 Tjocklek: 3,7-3,9cm
 Area på slagyta: 43,8cm²
 Vinkel på slagyta: 0°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	ÅKTE NER LITE
	2	14	
	3	15	
	4	16	
	5	16	
B	1	27	
	2	27	
	3	28	
	4	27	
	5	26	
C	1	30	
	2	30	
	3	30	
	4	32	
	5	31	
D	1	16	
	2	15	
	3	17	
	4	17	
	5	16	
E	1	18	
	2	16	
	3	20	
	4	15	
	5	15	
F	1	20	
	2	18	
	3	18	
	4	19	
	5	18	



Prov: 385-01

Tjocklek: 4,0-4,2cm

Area på slagyta: 17,278cm²

Vinkel på slagyta: 1°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	11	ÅKTE NER LITE
	2	12	
	3	12	
	4	12	
	5	10	
B	1	10	ÅKTE INTE NER SÅ MYCKET ALLS.
	2	10	
	3	0	
	4	10	
	5	10	
C	1	10	ÅKTE NER LITE
	2	11	
	3	13	
	4	12	
	5	11	



Prov: 385-02

Tjocklek: 4,0-4,4cm

Area på slagyta: 24.75cm²

Vinkel på slagyta: 5°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	18	
	2	17	
	3	18	
	4	19	sprickan ovanför A börjar spricka upp
	5	18	
B	1	23	
	2	24	
	3	26	
	4	24	
	5	24	
C	1	18	
	2	26	
	3	28	
	4	28	
	5	27	
D	1	23	
	2	23	
	3	23	
	4	23	
	5	24	



Prov: 385-03

Tjocklek: 3,6-3,8cm
 Area på slagyta: 25.55cm²
 Vinkel på slagyta: 2°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	22	
	2	22	
	3	24	
	4	24	
	5	24	
B	1	0	
	2	10	
	3	10	
	4	10	
	5	10	
C	1	0	ÅKER NER LITE
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	0	



Prov: 455-02

Tjocklek: 3.5-4,0 cm
 Area på slagyta: 29cm²
 Vinkel på slagyta: 5°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	
	2	12	
	3	14	
	4	14	
	5	12	
B	1	0	pga vinkeln?
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	0	
C	1	11	
	2	14	
	3	13	
	4	14	
	5	13	



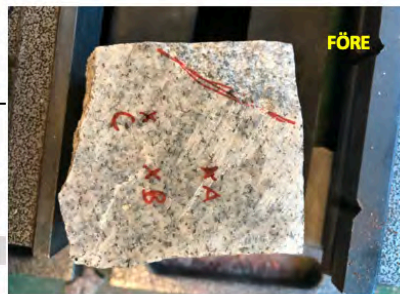
Prov: 455-01

Tjocklek: 4,3 cm

Area på slagyta: 18.75 cm²

Vinkel på slagyta: 2°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	
	2	0	
	3	10	
	4	11	
	5	12	
B	1	20	
	2	20	
	3	20	
	4	18	
	5	21	
C	1	16	
	2	16	
	3	18	
	4	16	
	5	16	

**Prov: 455-04**

Tjocklek: 3.8-4.5cm

Area på slagyta: 28,975cm²

Vinkel på slagyta: 6°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	16	Sten sjönk ner lite vid slag
	2	18	
	3	19	
	4	18	
	5	17	
B	1	0	Pga vinkel?
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	0	
C	1	10	
	2	10	
	3	10	
	4	10	
	5	10	



Prov: 385-04

Tjocklek: 4,0-4,1cm

Area på slagyta: 24cm²

Vinkel på slagyta: 0°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	
	2	0	BITEN MELLAN HUVUDSPRICKORNA BÖRJAR SPRICKA UPP I MÅNGA RIKTNINGAR
	3	0	FORTSÄTTER FÖR ATT SE OM VÄRDEN ÖKAR VID "KOMPAKTION AV UPPSPRUCKET MATERIAL)
	4	0	
	5	0	
B	1	0	HELA BITEN MELLAN DE TVÅ EXISTERANDE SPRICKORNA SJÖNK NER.
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	0	
C	1		SKIPPAR DENNA EFTERSOM PROVER ÄR SÅ TRASIGT, KOMMER EJ GE RESULTAT.
	2		
	3		
	4		
	5		
D	1	12	spricker upp
	2	12	spricker upp
	3	0	nedsjunkter och mosat
	4	0	nedsjunkter och mosat
	5	0	nedsjunkter och mosat
E	1	11	åker ner, småsprickor vid punkten
	2	12	mer uppsprucket
	3	10	mer uppsprucket
	4	0	
	5	0	insjunket och deformerat



Prov: 385-05

Tjocklek: 3,7-4,0cm

Area på slagyta: 21cm²

Vinkel på slagyta: 4°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	
	2	10	BÖRJAR SPRICKA UPP PÅ FLERTAL STÄLLEN
	3	10	
	4	0	GÅR SÖNDER I BITAR.
	5	0	
B	1	0	SJÖNK NER
	2	0	
	3	0	GENOMGÅENDE EXISTERANDE SPRICKA (GENOM PUNKT B) BÖRJAR SPRICKA UPP
	4	10	SPRICKAN SPRICKER UPP MER
	5	10	
C	1	10	DET SPRICKER UPP MER I DE ANDRA SPRICKORNA, INTE EN NY I PUNKTEN
	2	12	
	3	12	SPRICKAN UNDER PUNKT C SPRICKER UPP LITE MER
	4	12	
	5	11	



Prov: 385-06

Tjocklek: 3,5-4,2cm

Area på slagyta: 57,75cm²

Vinkel på slagyta: 0°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	11	
	2	10	existerande sprickor spricker upp vid slag
	3	12	ny spricka mot punkt A
	4	11	mer uppsprickning GENOM och runt A och resten av stenen
	5	12	högt värde trots sprickor igenom, pga kompression?
B	1	0.9	uppsprickning i punkt och resten av sten
	2	0.8	uppsprickning i punkt och resten av sten
	3	0	för trasigt nu
	4		
	5		
C	1		Gick sönder när slag på A
	2		
	3		
	4		
	5		

**Prov: 385-07**

Tjocklek: 3,5-4,2cm

Area på slagyta: 29.75cm²

Vinkel på slagyta: 0°

Provpunkt	Slag#	R value	Notering
A	1	0	
	2	15	EXISTERANDE SPRICKOR BÖRJAR SPRICKA UPP
	3	17	SPRICKA GENOM A PUNKT
	4	20	
	5	20	MER UPPSPRICK GENOM A
B	1	0	ÖKANDE UPPSPRICKNING FÖR VARJE SLAG.
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	10	

