

Grön fältspat i Varbergskomplexet

Lara Schönherr

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 636
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2022

Grön fältspat i Varbergskomplexet

Kandidatarbete
Lara Schönherr

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2022

Innehåll

1	Introduktion	7
2	Bakgrund	7
2.1	Färg i mineral	7
2.2	Färg i fältspater	7
2.3	Charnockit	8
3	Material och metod	8
3.1	SEM-EDS	9
4	Resultat	10
4.1	Bergartsprover	10
4.2	Polarisationsmikroskopi	10
4.3	SEM-EDS	11
5	Diskussion	12
6	Slutsatser	15
7	Tack	15
8	Referenser	15
9	Bilaga	16

Omslagsbild: Grön Varbergscharnockit med slipad yta.

Grön fältspat i Varbergskomplexet

LARA SCHÖNHERR

Schönherr, L., 2022: Grön fältspat i Varbergskomplexet. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 636, 16 sid. 15 hp.

Sammanfattning: Den kända Varbergsharnockiten från Hallandskusten är en granitisk, pyroxenförande bergart som har både magmatiska och metamorfa drag. Bergarten har deformerats och omkristalliserats under högmetamorfa förhållanden men har sannolikt redan sedan den ursprungliga kristallisationen varit pyroxenförande. Olikt andra granitiska bergarter är Varbergsharnockiten mörkt grågrön. Denna färg orsakas av fältspat, som tillsammans med kvarts, pyroxen och hornblände är charnockitens dominerande mineral. Efter att fyra tunnslip, tre charnockiter och en deformerad pegmatit, från olika delar av Varbergskomplexet analyserats med polarisationsmikroskop och svepelektronmikroskop (SEM-EDS) visade sig fältspaten i charnockiten bestå av antipertitisk plagioklas, vilken består av oligoklas med avblandningsdomäner av K-fältspat, samt grå mikro-pertitisk K-fältspat, vilken sannolikt är ortoklas. Pegmatitens fältspater består av Na-bärande albit och röd K-fältspat, där albiten har bekräftats vara grön. Orsaken till den grönaktiga färgen hos plagioklasdomänerna har inte kunnat fastställas. Det är möjligt att fältspaten i Varbergsharnockiten färgas likt andra fältspater, nämligen genom spårämnen eller defekter i kristallstrukturen som genom excitation av elektroner absorberar vissa våglängder av inkommande ljus och därmed framhäver en viss färg.

Nyckelord: Färg, charnockit, fältspat, Varberg, optisk mineralogi, geokemi

Handledare: Charlotte Möller

Ämnesinriktning: Mineralogi

Lara Schönherr, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: la8215sc-s@student.lu.se

Green feldspar in the Varberg complex

LARA SCHÖNHERR

Schönherr, L., 2022: Green feldspar in the Varberg complex. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 636, 16 pp. 15 hp (15 ECTS credits) .

Abstract: The well-known Varberg charnockite from the coast of Halland in southern Sweden is a granitic, pyroxene-bearing rock which has both magmatic and metamorphic features. The rock has been deformed and recrystallized at high temperature and pressure but has probably been pyroxene-bearing since the original crystallization. Unlike other granitic rocks the Varberg charnockite has a dark grey green colour. The greenish colour is caused by feldspars, which in addition to quartz, pyroxene and hornblende are the predominant minerals in charnockite. Four thin sections, three charnockites and one deformed pegmatite, from different parts of the Varberg complex were analyzed using polarization microscopy and scanning electron microscopy (SEM-EDS). The results showed that the feldspars in the charnockite are antiperthitic plagioclase, which consists of oligoclase with exsolved K-feldspar domains, and grey, micro-perthitic K-feldspar, which likely is orthoclase. The feldspars in the pegmatite mostly consist of Na-bearing albite and pink K-bearing orthoclase, where the albite has been confirmed to have a green colour. The cause of the greenish colour could not be determined. It is possible that the colour of the Varberg charnockite is caused by similar colour-causing mechanisms as in other feldspars. These include trace elements and defects in the crystal structure which through the excitation of electrons absorb specific wave lengths of incoming light and consequently cause the resulting colour.

Keywords: Colour, charnockite, feldspar, Varberg, optic mineralogy, mineral chemistry

Supervisor: Charlotte Möller

Subject: Mineralogy

Lara Schönherr, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: la8215sc-s@student.lu.se

1 Introduktion

Charnockiten från Varberg i Halland (Fig. 1) är en pyroxenförande bergart med granitisk sammansättning, men till skillnad från graniters vanliga grå-rosa färg skiftar denna i grågrön. Fältspaternas som charnockiten består av, plagioklas och ortoklas, är de mineral som tillsammans med kvarts, pyroxen och hornblände orsakar bergartens färg. De geokemiska orsakerna bakom den gröna färgen är inte kända. Denna studie innehåller en översikt av olika orsaker till fältspaters färg samt en petrografisk och petrologisk beskrivning av tre charnockiter samt en deformerad pegmatit från Varbergskomplexet. Beskrivningen är baserad på analyser av stuffer och tunnslip med polarisationsmikroskop och svepelektronmikroskop (SEM-EDS).

2 Bakgrund

2.1 Färg i mineral

Mineralers färg uppstår som konsekvens av att ljus passerar genom kristallgittret i vilket det reflekteras, absorberas, diffrakteras eller refrakteras. Vilken färg som slutligen återstår beror på en mängd olika orsaker, dock oftast inte på mineralens generella kristallstruktur, så kallad idiokromatisk färgning, utan orsakas snarare av små skillnader på atomnivå som är beroende av utomstående faktorer, så kallad allochromatisk färgning (Nassau, 1978). Innehållet av övergångsmetaller, både i den generella strukturen och som förorening i form av spårämnen, samt defekter i kristallstrukturen orsakade av strålning har störst påverkan på färgen av icke-ledande mineral (Nassau, 1978). Metallbindningar i mineral, som exempelvis pyrit, blyglans eller rena metaller, ger på andra sätt upphov till färg. Principen kallas band theory och innebär att elektronernas fria rörelse orsakar att olika energinivåer breddas till band, mellan vilka elektroner kan hoppa (Nassau, 1978). Detta hänger även samman med metallers karaktäristiska lyster.

Vid absorption tas inkommande ljus upp av molekyler, atomer eller joner och elektroner i respektive partikel exciteras. Elektroner kan hoppa både mellan orbitaler i en atom eller jon och mellan olika joner som delar orbitaler, så kallade *crystal field transitions* respektive *molecular orbital transitions* (Wenk & Bulakh, 2004). En variant av den senare är *charge transfer*, vid vilken obundna elektroner hoppar mellan olika joner och utbyter laddning (Nassau, 1978). I både *crystal field transitions* och *molecular orbital transitions* är det ämnesspecifikt mellan vilka orbitaler det är stabilt att hoppa samt hur långt det är mellan orbitalerna. Båda varianter kräver energitillförsel för att hoppet ska vara möjligt. Energin tas från inkommande ljus som absorberas, olika våglängder för olika energimängder, beroende på hur långt hoppet är. De återstående våglängderna reflekteras istället och ger så upphov till mineralets färg. När partikeln eller molekyl deexciteras till grundtillståndet avges den upptagna energin. Dock har den elektromagnetiska vågen som sänds ut en lägre energi eftersom en del går förlorad i elektronens rörelse (Wenk & Bulakh, 2004). Den utsända

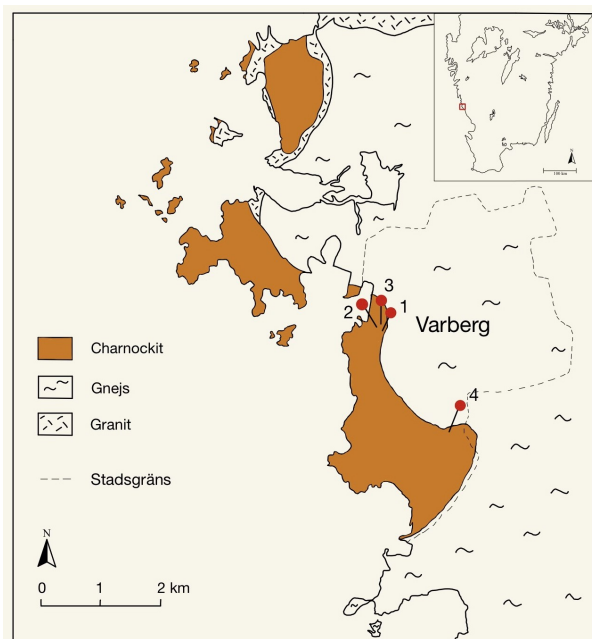


Fig. 1. Berggrundskarta över Varbergsområdet där berggrunden bestående av charnockit är markerad i orange. Charnockiten är omgiven av granodioritisk och granitisk gnejs samt av granit i norr. Koordinaterna där bergartsproverna (Fig. 2) togs ifrån är markerade med nålar 1-4. (Karta: Lara Schönherr, geodata från SGU:s kartvisare)

elektromagnetiska vågen utgör olika typer av fluorescens. Om vågens energi är tillräckligt hög är det synligt ljus som avges, vilket framför allt sker i samband med inverkan av ultraviolett strålning. Vanliga ämnen som orsakar färg, oftast övergångsmetaller som exempelvis Fe och Mn, kallas kromoforer (Wenk & Bulakh, 2004). Dessa ämnen har obundna elektroner i sina yttre orbitaler och är därför mer benägna att exciteras. Ett så kallat färgcentrum uppstår om det finns en defekt i kristallstrukturen och en elektron substituerar för den ursprungliga partikeln (Nassau, 1978; Wenk & Bulakh, 2004). Denna operade elektron är, liksom de operade elektronerna i övergångsmetallerna, benägen att absorbera ljus. Sådana defekter uppstår vanligen till följd av energirik bestrålning av mineralet (Nassau, 1978; Wenk & Bulakh, 2004). Olika färgningar av kvarts, som exempelvis ametist och rökkvarts, är exempel på mineral som får sin färg genom färgcentra (Nassau, 1978).

Det komplicerade med färger i mineral och varför det är svårt att fastställa vad som orsakar dem är att en viss typ av färg inte kan kopplas till ett specifikt ämne eller en specifik process. Ett ämne kan ge upphov till olika färger på grund av att olika elektronövergångar med olika energier är möjliga i en atom eller jon samt mellan olika partiklar. Detta leder till att olika ämnen, men även olika processer, kan ge upphov till liknande färger. Dessutom kan alla dessa ämnen och processer vara närvarande i olika mineral, vilket gör att färg, om den inte är idiokromatisk, aldrig är indikativ för ett specifikt mineral.

2.2 Färg i fältspater

Fältspaters färgskala varierar beroende på kemisk

sammansättning och struktur, vilken bestäms av temperatur- och tryckförhållanden vid kristallisation. Dessa faktorer är kopplade till bildningsdjup och avgör därför även vilka spårämnen som förorenar mineralen samt under vilka förhållanden mineralet bildas, exempelvis strålningsmängd. Att experimentellt identifiera vad exakt som orsakar en viss färg är svårt eftersom detta, som tidigare nämnt, ofta avgörs av mycket små kvantiteter av olika element samt fysiska skillnader på atomnivå, vilket kräver detaljerade kemiska analyser. Många studier av olika färger och deras orsaker har därför förblivit utan entydiga resultat. De mer omfattande studierna som genomförts på vissa typer av fältspater visar att en av de vanligare orsakerna till en fältspats distinkta färg är olika varianter av elektronövergångar, antingen charge transfer eller övergångar mellan interna orbitaler. Dock är det i många fall flera faktorer som avgör ifall ett mineral får en färg, samt färgens nyans och intensitet.

Vanliga färger i fältspat är vit och grå för plagioklas, samt vit och rosa för kalifältspat (Klein & Philpotts, 2017). Den vita, eller mjölkiga, färgen uppstår när mineralet kommer i kontakt med vatten och OH-grupper binds in i kristallstrukturen (Smith, 1974). Den grå färgen uppstår genom närvaron av övergångsmetaller från olika oxidmineral. Hur mörkt mineralet är beror på dessa ämnens halt (Lewicka, 2016; Smith, 1974). Att den grå färgen även kan bero på färgcentra borde vara möjligt men har inte bekräftats. Även den svarta färgen i en del fältspater beror ofta på oxidinklusioner som bland annat innehåller Fe eller Ti (Smith, 1974). Den typiska rosaröda färgen hos viss kalifältspat, främst mikroklin, kommer från små mängder järn som infogats vid mineralets bildning (Haldrar, 2020).

Ett exempel på en mindre vanlig variant av fältspat är amazonit, en blågrön variant av mikroklin och ortoklas. Här är Pb kromofor och den turkosa färgen uppstår genom charge transfer mellan Pb^+ och Pb^{3+} (Hofmeister & Rossman, 1985). Dock har Hofmeister och Rossmans studie visat att dessa joner bildas genom strålning, vilket även orsakar defekter i kristallstrukturen och därmed en mörkare färg. För att denna ska motverkas krävs strukturellt bundet H_2O som verkar som en katalysator för reduktion av den obundna elektronen i färgcentrumet, men även bildningen av de två Pb-jonerna. Studien visar att den turkosa färgen alltså inte bara är beroende av mängden Pb-joner utan även mängden strukturellt bundet H_2O . På samma sätt som mikroklin och ortoklas färgas blågrön av elektronövergångar i Pb-joner kan även plagioklas (albit och oligoklas) färgas blå (Hofmeister & Rossman, 1986).

Ytterligare ett exempel på fältspat utanför det vanliga färgspektrat är gul, Fe-bärande sanidin där Fe^{3+} substituerar Al (Smith, 1974). Färgen orsakas här av elektronövergångar i Fe-jonen, där minst absorption sker för ljusets våglängder runt 600 nm, varav den gula färgen i mineralet.

Även andra former av färgning än spårämnen och defekter kan förekomma i fältspat. Labrador (engelska labradorite) får sin skimrande blågröna färg genom optiska effekter istället för kemisk sammansättning (Nassau, 1978). Lameller i mineralet gör att det

inkommande ljuset diffrakteras i ett interferensmönster (Bolton *et al.*, 1966). Vilka våglängder som diffrakteras beror på avståndet mellan de avgörande strukturerna, i detta fallet lamellernas tjocklek, samt från vilken vinkel ytan betraktas (Nassau, 1978). Detta ger effekten att ytan ständigt skiftar färg.

2.3 Charnockit

Vad som ger den gröna charnockiten dess färg är en mindre undersökt och omdiskuterad fråga. En teori som etablerades av Howie (1967) efter analys av charnockiter från Chennai i Indien är att tunna ådror av järnrika mineral, goethit eller lepidocrocit, som går mellan och genom mineralkornen i bergarten orsakar den typiska mörkgröna färgen. Oliver och Schultz (1968) menar att dessa ådror istället består av klorit. Dock är klorit vanligen indikativt för lågmetamorfa facies vilket inte stämmer överens med charnockitens högmetamorfa bildningstillstånd i granulitfacies (Möller & Andersson, 2018; Yang *et al.*, 2021). Klorit är inte stabilt under dessa temperatur- och tryckförhållanden (Klein & Philpotts, 2017). Charnockiter kan bildas både magmatiskt och metamorft (Touret & Huizenga, 2012), vilket även diskuterats i samband med Varbergscharnockiten eftersom komplexet påvisar olika grad av deformation. Omfattande dateringar av bergarten visar att den ursprungligen kristalliserade som en magmatiskt intrusion för 1,4 miljarder år sedan och sedan genomgick metamorfos under den Svekonorvegiska orogenesisen för 980 miljoner år sedan (Christoffel *et al.*, 1999; Möller & Andersson, 2018).

En möjlig orsak är att den gröna fältspaten färgas likt andra vanliga färgningar i fältspater genom elektronövergångar i spårelement. I den pyroxenförande charnockiten skulle orsaken till denna sorts färgning kunna vara Fe.

3 Material och metod

Fyra stuffer (Fig. 2), tre charnockiter (stuff 2-4) och en deformerad pegmatit (stuff 1) från olika delar av Varbergskomplexet (Fig. 1), skickades av Jennie Dahl, geolog vid Implenia Sverige AB, i samband med konstruktionen av Varbergstunneln. Stuff 2 är en bit charnockit från norra delen av Varbergstunneln som befinner sig under centrala Varberg där berget är massivt och kornigt. Stuff 3 kommer från samma plats som stuff 2, men från mer yttre berg. Stuff 4 kommer från södra delen av Varbergstunneln vid Breared, där berget har liknande struktur som stuff 2 och 3. Stuff 1 är den deformerade pegmatiten som kommer från en krosszon bestående främst av amfibolit vid gränsen mellan gnejs och charnockit under centrala Varberg.

Från dessa stuffer sågades tunnslip, V1-V4 (Fig. 3), där tunnslip V1 motsvarar stuff 1, V2 stuff 2, V3 stuff 3 och V4 stuff 4. Tunnslipen undersöktes med polarisationsmikroskop för att analysera mineralsammansättning, struktur, mineralens form och möjliga inklusioner. Analysen gjordes med planpolariserat ljus (PPL) och korspolariserat ljus (XPL). Två av tunnslipen, en av charnockiterna (V4) och den deformerade pegmatiten (V1), detaljundersöktes även med svepelektronmikroskop (SEM-EDS) och en mineralkemisk analys gjordes med

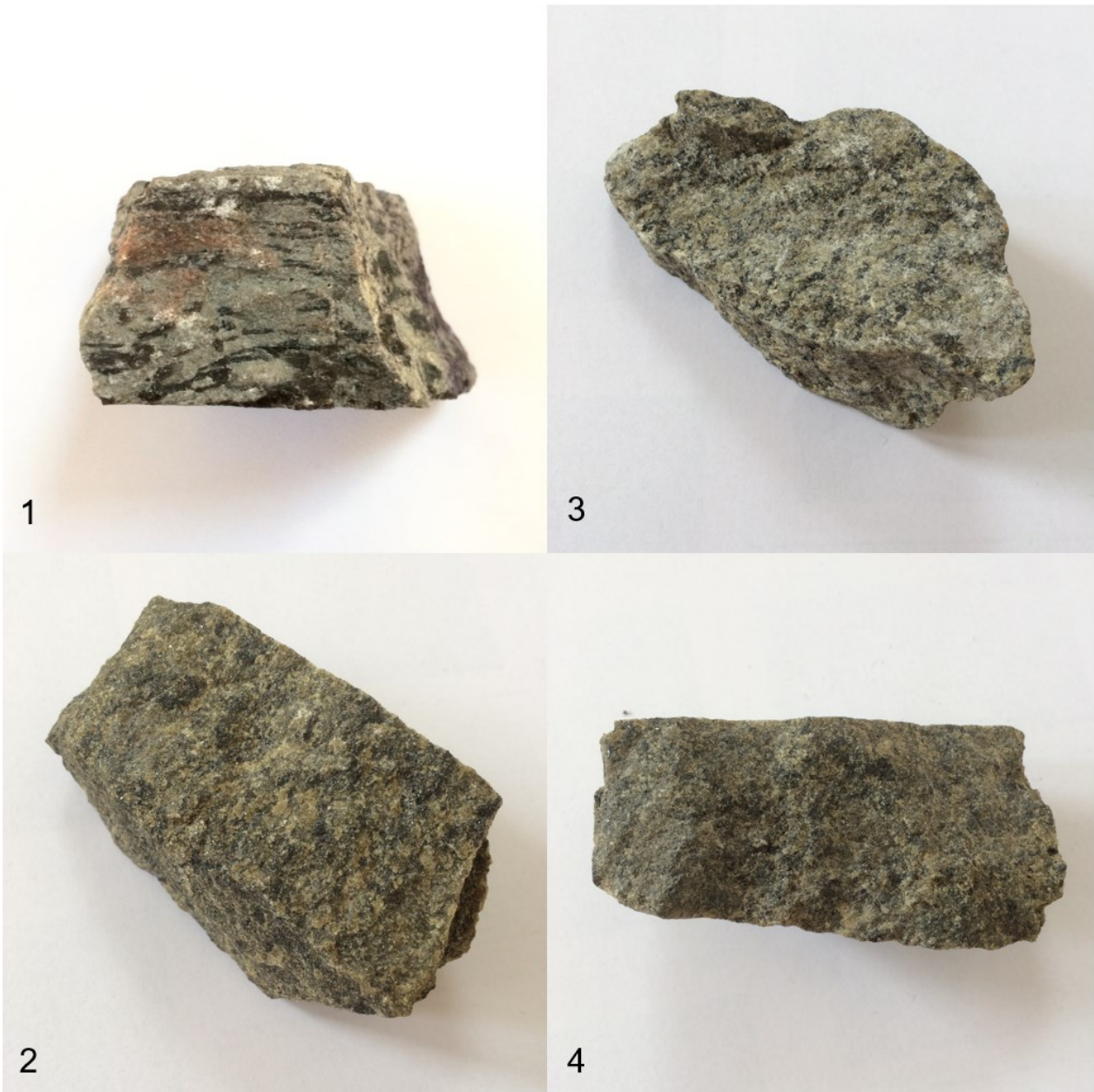


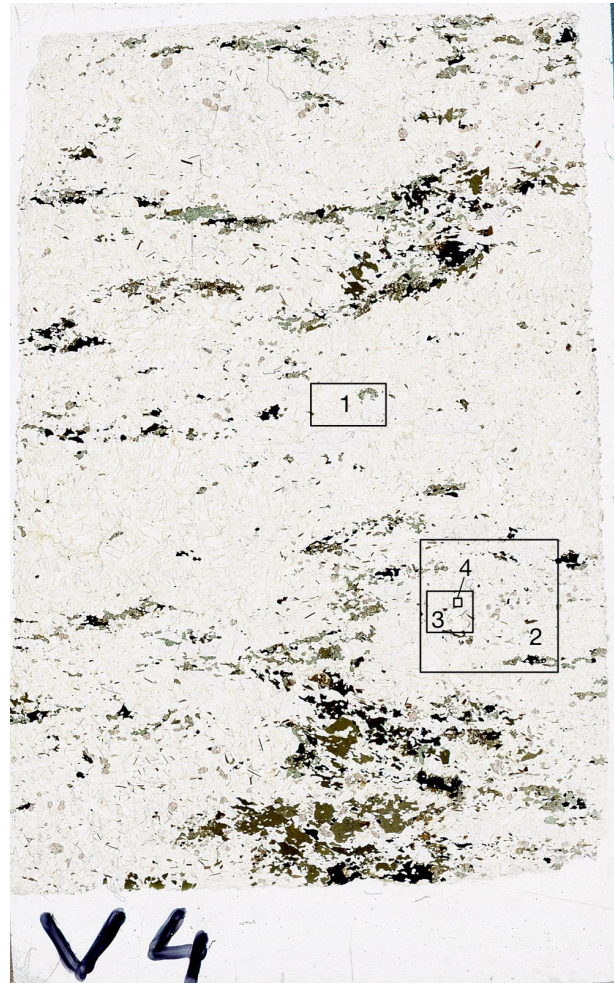
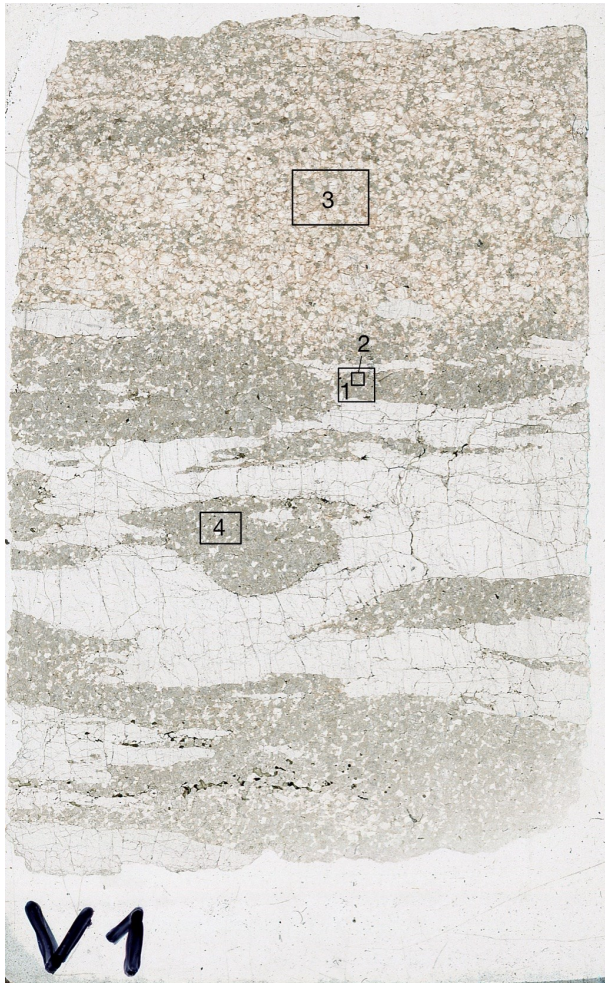
Fig. 2. Stufferna som tunnslipen sågats ifrån. Stuff 1 är den deformerade pegmatiten och motsvarar tunnslip V1. Stuff 2-4 är charnockiter och motsvarar tunnslip V2-V4. Platserna där stofferna kommer ifrån är markerade i kartan över Varbergsområdet (Fig. 1).

datorprogrammet AZtec för att undersöka elementkompositionen. Punkterna som analyserades kemiskt valdes utifrån observationer i polarisationsmikroskopet.

3.1 SEM-EDS

SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) analyserar prover genom riktad elektronbeskjutning av objektet, resulterande i sekundära och reflekterade elektroner som fångas upp av detektorer och skapar en topografisk bild av provet. De kemiska elementen i provet avger röntgenstrålning med olika våglängd beroende på vilket ämne som träffas av elektronerna. Spektra över vilka ämnen som är närvarande och deras kvantitet i förhållande till varandra registreras vilket gör att den kemiska sammansättningen i olika delar av

provet kan analyseras. Innan analysen kolbelades tunnslip V1 och V4 genom förångning av kolstift med en Agar Auto Carbon Coater tills tjockleken på lagret var 25-27 nm. Detta för att leda bort elektronerna efter de träffat slipets yta och förhindra uppladdning av partiklar i provet. Tunnslipen placerades sedan i en hållare med en koboltstandard i mikroskopets kammare och analyserades med olika förstoring visuellt och kemiskt med programmet AZtec. Svepelektronmikroskopet som användes är av typen Tescan Mira3 med Oxford EDS-system och tillhör geologiska institutionen vid Lunds universitet. Kemisk kartläggning av sju områden i tunnslip V1 och tre områden i tunnslip V4 gjordes. De generella områdena är markerade i Fig. 3, en del av elementkartorna är dock detaljundersökningar av dessa områden och därför inte markerade. Dessutom gjordes åtta



punktanalyser i form av mineralkemiska spektra i V1 och sju i V4 (Bilaga 1). Elementen som kartlades var O, Si, Al, Na, K, Fe, Mg, Ca och Ti. De kemiska kartorna exporterades som bilder och punktanalysdatan upprättades i tabeller vilka exporterades till Excel.

4 Resultat

4.1 Bergartsprover

Bergartsprovernans utseende visade tydliga skillnader

Fig. 3. Skannade bilder av tunnslipen som undersöktes. V1 är en deformerad pegmatit och V2-V4 är charnockiter. Rutorna i V1 och V4 markerar de med SEM-EDS detaljundersökta områdena.

mellan charnockiterna (2-4) och den deformerade pegmatiten (1). Charnockiterna hade en finkornig struktur med en sammansättning av mörkgröna, mörkgrå och svarta mineral. Enstaka små granater syntes på alla ytor. Stuff 3 var något ljusare i färgen och en svag fabric i form av de mörka mineralen som koncentrerats i orienterade aggregat observerades. Den deformerade pegmatiten (stuff 1) hade finkorniga gröna och rosa mineralaggregat koncentrerade i större domäner. Även grå kvarts fanns ansamlad i långdragna aggregat som bildats genom duktil deformation.

Den gröna färgen skiljde sig mellan charnockiten och pegmatiten. Charnockitens gröna färg var mörk med inslag av gul och varierade inom bergarten mellan ljusare och mörkare grön samt mer eller mindre gul. Pegmatitens gröna färg var ljusare och gick mot turkos.

4.2 Polarisationsmikroskopi

Liknande mineralinnehåll observerades i alla charnockiter, tunnslip V2-V4, genom polarisationsmikroskopi. Bergarten i respektive tunnslip bestod till stor del (cirka 70%) av kvarts och fältspat med mikropertitiska och antipertitiska texturer,

cirka 20 % hornblände och klinopyroxen (med ett förhållande på ungefär 2/3 hornblände och 1/3 klinopyroxen) samt mindre mängder ortopyroxen, biotit och opakmineral, sannolikt FeTi-oxid (Fig. 4). Även små korn av granat kunde hittas i varje prov. I polarisationsmikroskop var det svårt att skilja mellan plagioklas och kalifältspat på grund av få diagnostiska tvillingar och finskalig mikropertit som endast syns under starkare förstoring. Enstaka kristaller hade tartantvillingar, som är typiska för mikroklin. De största skillnaderna mellan de tre tunnslipen var en varierande mängd pertit och antipertit, förekomsten av ortopyroxen och mängden granat. Tydlig pertit hittades inte i V2, däremot observerades den i V3 och mycket svagt pertitiska korn hittades i V4. Antipertit förekom i alla tunnslip men med mindre förekomster i V2 och V3, samt större i V4. Ortopyroxen observerades i V3 och V4. Enstaka granatkristaller fanns i V2 och V3 medan antalet var större i V4. I V2 observerades även ett stort antal mindre kvartsinklusioner i fältspaterna, vilket inte var fallet i övriga tunnslip. I Fig. 3 syns att tunnslip V3 och V4

har ett fabric med orienterade aggregat av mörka mineral, vilket är som mest påtagligt i V4. Även i tunnslip V2 förekommer de mörka mineralen i aggregat men saknar tydlig orientering.

Tunnslip V1, pegmatiten, avvek kraftigt från resterande genom en annan mineralparagenes samt genom tydligt åtskilda områden av plagioklas, pertit med distinkta lameller och kvarts (Fig. 5). Plagioklasen var, till skillnad från pertit och kvarts, mycket omvandlad och hade en "smutsig" yta med grumlig brun färg i både PPL och XPL samt många mindre hål i mineralens yta. Även detta syns i Fig. 5. Denna omvandling observerades över hela mineralens yta och inte bara i kanterna. I Fig. 3 syns en tydlig grön färg över området med plagioklas och en rosa färg över området med pertit. Detta sammanfaller med den motsvarande stuffens färger. Tunnslipet visade, precis som stuffen, tydliga tecken på duktil deformation i form av strain.

4.3 SEM-EDS

Undersökningar av charnockitens kemiska

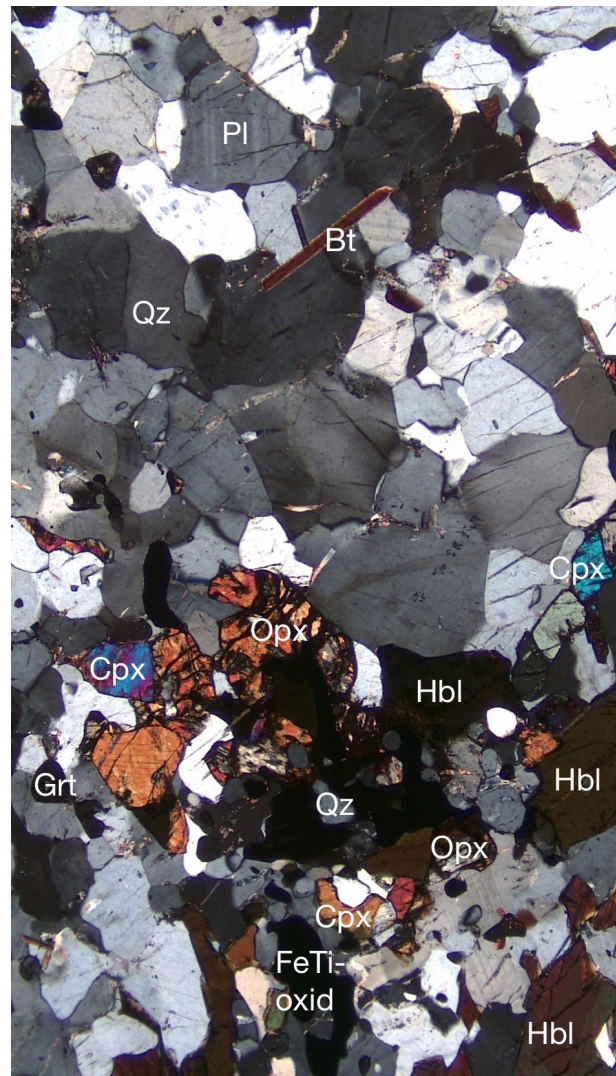
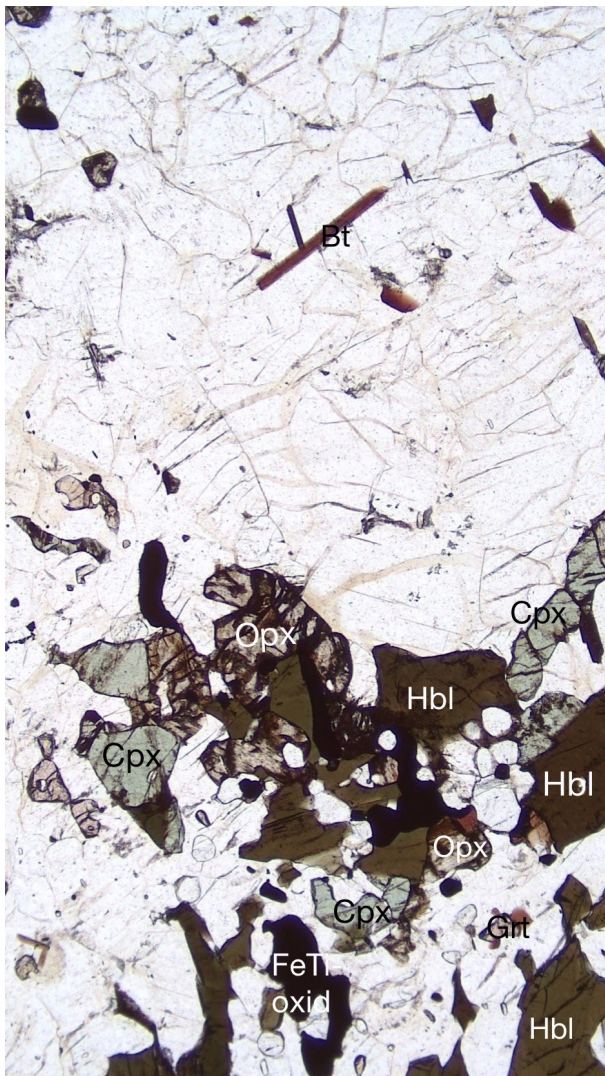


Fig. 4. En charnockit (tunnslip V4) i polarisationsmikroskop, planpolariserat (PPL) till vänster och korspolariserat (XPL) till höger, med ett urval av mineral markerade. Bilden är representativ för tunnslipets generella utseende och innehåller alla dess närvarande mineral: kvarts (Qz), kalifältspat (ej markerat), plagioklas (Pl), klinopyroxen (Cpx), ortopyroxen (Opx), hornblände (Hbl), FeTi-oxid, granat (Grt) och biotit (Bt). Tunnslip V2 och V3 har samma mineralparagenes.

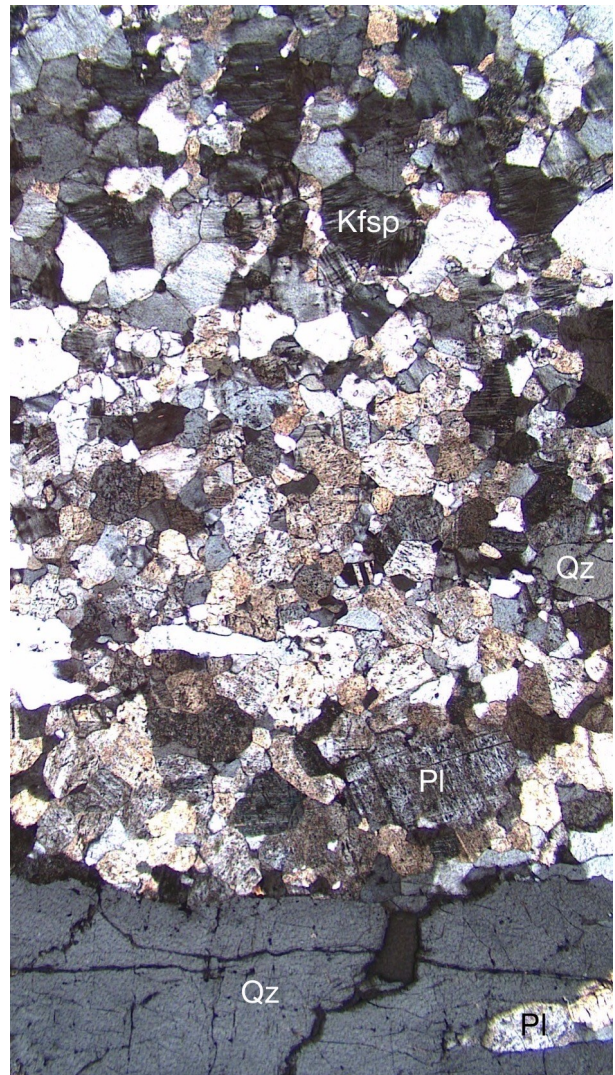
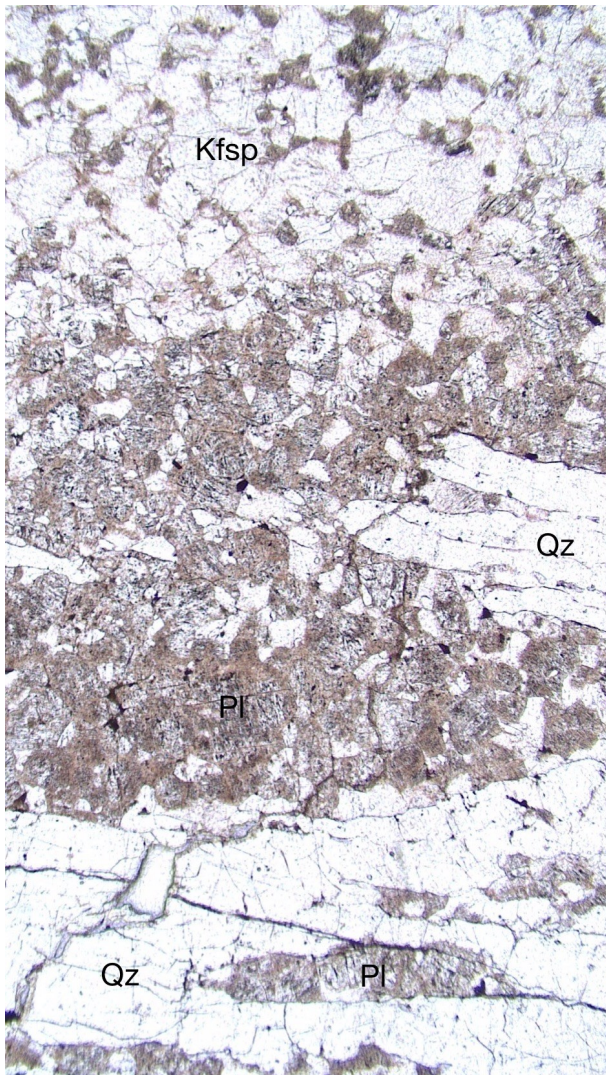


Fig. 5. Den deformerade pegmatiten (tunnslip V1) i polarisationsmikroskop, planpolariserat ljus (PPL) till vänster och korspolariserat ljus (XPL) till höger. Ett urval av mineral, kvarts (Qz), plagioklas (Pl) och kalifältspat (Kfsp), är markerade. Bilden visar en bit av alla tre ovanstående mineralzoner, kalifältspaten är i detta fallet pertit. Plagioklasen (centralt i båda bilderna) har, till skillnad från övriga mineral, en ”smutsigt” grumlig brun yta.

sammansättning i tunnslip V4 med SEM-EDS visade att plagioklasen generellt var Na-rik, med lägre halter Ca (Tabell 1). EDS-spektra uppmätte anortithalten till 17-20%. Kalifältspaten var K-rik, innehållande 85-88% K-förande fältspat, samt 11% albit. Den kemiska analysen visade även lika proportioner mellan fältspat innehållande främst K och fältspat innehållande främst Na (Fig. 6), vilket inte kunde identifieras i polarisationsmikroskopet på grund av att mineralen saknade synliga diagnostiska tvillingar. Mineralkornen av plagioklas och kalifältspat saknade euhedra former och har bildats genom avblandning under avkylning.

Detaljundersökningar av den deformerade pegmatitens yta med SEM visade att plagioklasens mineralkorn hade en fysiskt påverkad yta med ett större antal håligheter och sprickor (Fig. 7). En kemisk analys visade att plagioklasen hade en albitisk sammansättning och var rent Na-förande, utan Ca (Tabell 2). Genom förstoring till mikrometerskala detekterades dock små rester av plagioklas med högre Ca halt, 13-18% anortit, i albiten. Även ett flertal

muskovitkorn hittades. Elementkartor över utvalda områden visade förhöjda halter Fe och Mg i sprickor genom plagioklasens mineralkorn (Fig. 8). En detaljstudie av perititkornen visade en tydlig avblandning av Na-rik fältspat i lameller (Fig. 9). Dessa har uppstått under bergartens avkylningen.

5 Diskussion

Både charnockiterna och den deformerade pegmatiten visar tydliga tecken på duktil deformation. En gemensam indikator för metamorfos och omkristallisation i alla undersökta charnockiter var närvaron av granat samt den finkorniga texturen. Stuff 3 hade dessutom ett fabric av orienterade mörka mineralaggregat, vilket även gällde det motsvarande tunnslipet V3 och tunnslip V4. Tunnslip V2 uppvisade ett fabric av anrikade aggregat av mörka mineral, dock utan orientering. I pegmatiten, stuff 1, hade de ursprungligen grovkorniga mineralen omkristalliserats till många små kristaller. Dock var dessa fortfarande i sin ursprungliga position, vilket förklarar de fläckvis koncentrerade mineralen. Både stuffens och

Tabell 1. Värden från EDS-analys av en bit antipertit från tunnslip V4, (charnockit). Numret bredvid mineralförkortningen (plag = plagioklas, kfsp = kalifältspat) talar om vilket spektrum värdena kommer ifrån (Bilaga 1). Den övre delen visar de olika oxidernas viktprocent i mineralet, den undre visar katjonsumman. Stökiometrin har beräknats baserat på 8 syre.

	Plag-1	Plag-2	Plag-3	Plag-4	Plag-5	Kfsp-6	Kfsp-7
SiO ₂	61.26	60.91	61.05	61.00	61.61	61.97	62.31
Al ₂ O ₃	21.99	21.67	21.46	21.77	22.39	18.02	18.24
CaO	3.83	3.64	3.32	3.88	4.14		
BaO						0.83	0.87
Na ₂ O	8.76	8.9	8.64	8.55	8.75	1.19	1.21
K ₂ O	0.17	0.27	0.25	0.24	0.17	14.32	13.93
TOTAL	96.01	95.38	94.72	95.44	97.07	96.33	96.57
Si	2.81	2.82	2.84	2.82	2.80	2.98	2.98
Al	1.19	1.18	1.18	1.19	1.20	1.02	1.03
Ca	0.19	0.18	0.17	0.19	0.20		
Ba						0.02	0.02
Na	0.78	0.80	0.78	0.77	0.77	0.11	0.11
K	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.88	0.85
TOTAL	4.98	5.00	4.97	4.98	4.99	5.01	4.99

tunnslipets yta, med långdragna aggregat av kvarts och fältspat, påvisade en tydlig strain av bergarten.

På grund av samtliga bergarters finkornighet gick mineraltyperna ej att bestämma utifrån stofferna. Endast kvarts i pegmatiten samt de mycket små men tydligt mörkrött färgade granaterna i charnockiterna kunde identifieras utan mikroskop.

Genom undersökning av tunnslipen i polarisationsmikroskop identifierades de flesta mineral i bergartsproven. I charnockiterna kunde i många fall

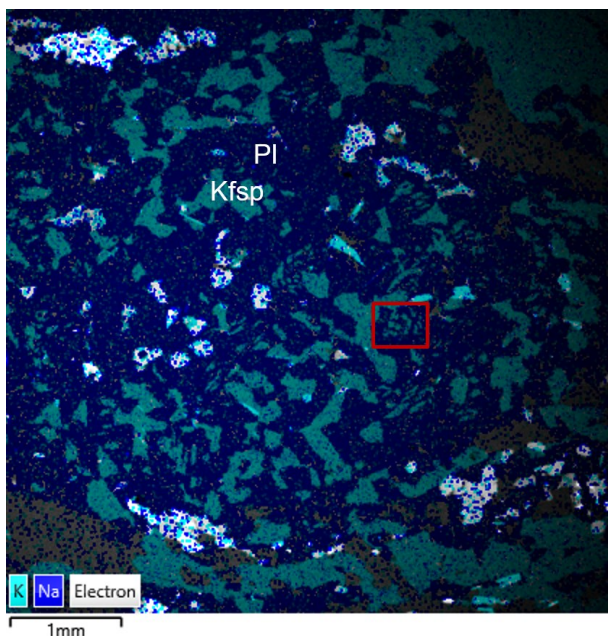


Fig. 6. Elementkarta från EDS-analys av område 2 i tunnslip V4 (Fig. 3), en av charnockiterna. Kartan visar fördelningen av plagioklas (Pl) och kalifältspat (Kfsp), som finns i liknande kvantiteter. De mindre fläckarna K-rika mineral, exempelvis i det området som markerats med en röd fyrkant, tillhör antipertitkorn. Även övriga större K-rika och Na-rika aggregat har bildats genom avblandning, därav inga euhedra korn.

inte plagioklas skiljas från kalifältspat eftersom kalifältspat i bergarten ofta har en mikropertitisk struktur som endast syns under en högre förstöringsgrad än den som uppnåddes i polarisationsmikroskopet. På grund av svårigheten att identifiera olika mineral i stofferna samt att särskilja fältspaterna i polarisationsmikroskopet kunde det gröna mineralet inte identifieras i charnockiterna. Dock har ortoklas i grovkornigare charnockiter från Varberg bekräftats vara mörkgrå vilket gör att plagioklasen kvarstår som det möjliga gröna mineralet. I pegmatiten hade kalifältspaten en tydlig pertitisk struktur och kunde därför enkelt skiljas från plagioklasen. Den i resultatet nämnda färgskillnaden mellan plagioklas och pertit, som observerades i tunnslipet V1, gör det möjligt att fastställa plagioklas som det gröna mineralet i pegmatiten.

SEM-EDS-analys av charnockiten i tunnslip V4 identifierade plagioklasen som oligoklas med cirka 20 % anortit och bekräftade ortoklas som den mest sannolika polymorfen av kalifältspat. De anhedra kornen tyder på att plagioklas och kalifältspat avblandats vid avkylningen av bergarten, som vid kristallisationen bestod av fältspater innehållande en solid lösning av både Na, K och Ca. I charnockiterna observerades inga anrikningar av Fe och Mg i fältspaterna, vilket talar emot att teorierna om Fe-rika respektive kloritiska ådror genom fältspatens mineral korn, som Howie (1967) respektive Oliver och Schultz (1968) etablerade som förklaring på den gröna färgen i charnockit, kan appliceras på Varbergscharnockiten.

Plagioklas i pegmatiten (V1) bestod enligt SEM-EDS-analysen av ren albit med inneslutna glimmermineral och rester av oligoklas. Detta tyder på en albitisering av plagioklasen som sannolikt har skett under fluiddrivna, mycket lågmetamorfa förhållanden. Plagioklaskristallerna visade tecken på fysisk påverkan av mineralkornen i form av hål och även sprickor där Fe och Mg hade anrikats. En sådan anrikning kan ske i samband med att vatten tar sig in i bergarten.

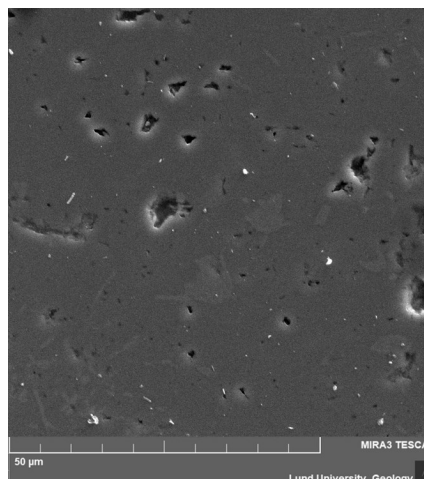


Fig. 7. SEM-bild av den deformerade pegmatiten, område 2 i tunnslip V1 (Fig. 3) med fokus på topografi för att tydliggöra plagioklasens fysiskt påverkade yta med hål och sprickor.

Tabell 2. Värden från EDS-analys av ett område från den deformerade pegmatiten (tunnslip V1). Numret bredvid mineralförkortningen (plag = plagioklas, Ms = muskovit) talar om vilket spektrum värdena kommer ifrån (Bilaga 1). Den övre delen visar de olika oxidernas viktprocent i mineralet, den undre visar katjonsumman. Stökiometrin har beräknats baserat på 8 syre för plagioklasen och 11 syre för muskoviten.

	Plag-4	Plag-5	Plag-6	Plag-7	Plag-8	Ms-9	Ms-10	Ms-11
SiO ₂	67.65	67.67	67.13	62.67	63.81	47.01	48.25	47.69
Al ₂ O ₃	19.63	19.44	19.66	22.41	21.20	33.19	33.26	32.51
MgO						0.52		
FeO						1.51	1.02	1.96
CaO				3.73	2.70			
Na ₂ O	10.90	10.63	10.88	8.76	9.26		0.85	0.35
K ₂ O				0.34	0.28	10.27	10.19	10.34
TOTAL	98.19	97.74	97.67	97.90	97.25	92.49	93.57	92.85
Si	3.00	3.01	2.99	2.82	2.88	3.21	3.25	3.25
Al	1.02	1.02	1.03	1.19	1.13	2.67	2.64	2.61
Mg						0.52		
Fe						0.09	0.06	0.11
Ca				0.18	0.13			
Na	0.94	0.92	0.94	0.76	0.81		0.11	0.05
K				0.06	0.02	0.89	0.87	0.90
TOTAL	4.96	4.94	4.96	4.98	4.97	6.91	6.93	6.92

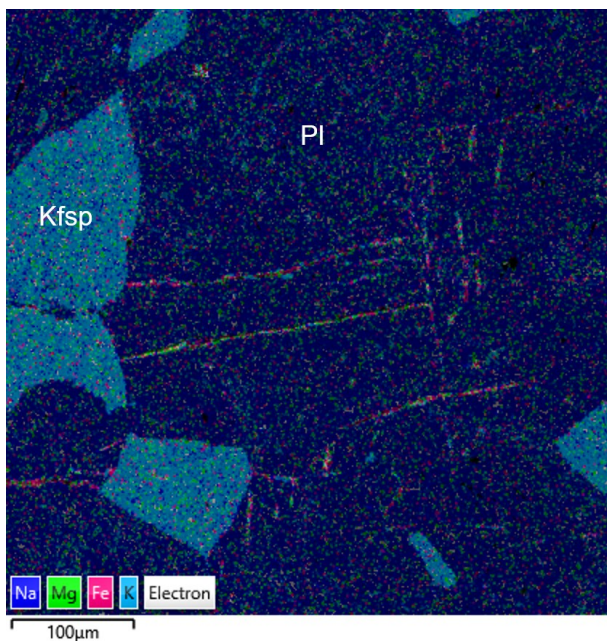


Fig. 8. Elementkarta från EDS-analys över ett plagioklaskorn (Pl) omgivet av kalifältspat (Kfsp) från Fig. 9, område 2 i tunnslip V1 (deformerad pegmatit, Fig. 3). Kartan visar fördelningen av Na, K, Mg och Fe. Mg och Fe har anrikats i sprickorna som löper genom plagioklaskornet. Övrigt Mg och Fe som är fördelat på mineralens yta är brus.

Kalifältspaten är tydligt pertitisk och har Na-rika lameller, vilket tyder på avblandning av Na-rik och K-rik fältspat under avkylning. Detta innebär att även i pegmatiten har, likt charnockiten, fältspaten under kristallisationen bestått av en solid lösning av Na- och

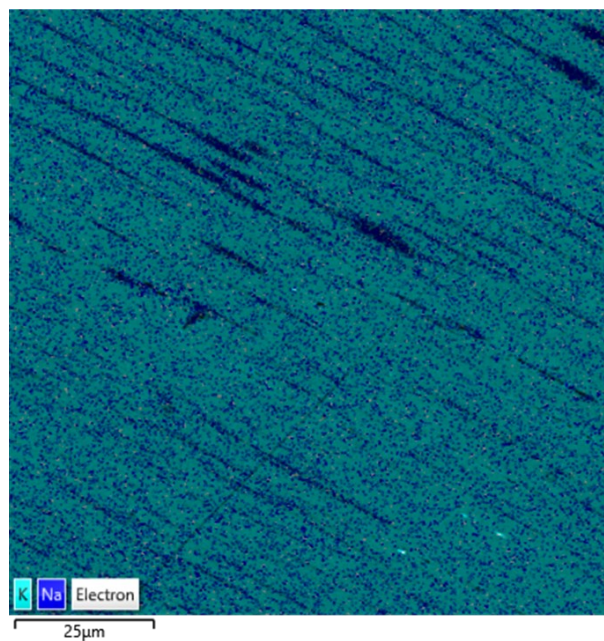


Fig. 9. Elementkarta från EDS-analys över detaljbild av pertit från den deformerade pegmatiten (tunnslip V1). Na-lameller har avblandats från den övriga K-rika fältspaten.

K-bärande aluminiumsilikater.

Absorptionspektra som togs fram hade i nästan varje fall en otillräcklig totalsumma av oxidernas viktprocent (Tabell 1 och 2), som inte bör avvika mer än 2 procentenheter från 100 för fältspat respektive 96 för muskovit. Som minst avvek summan med något mindre än 2 procentenheter, som mest med något mer än 5 procentenheter. Muskoviten avvek med 2,5-3,5

procentenheter. Däremot var den beräknade stökiometrin tillfredställande och avvek som mest från de förväntade värdena med några hundradelar. Avvikelsen från den förväntade totalsumman för oxid-% kan därför förklaras med avvikelser i totalströmmen, exempelvis laddningsstörningar på tunnslipens ytor. Tabellvärdena är således fortfarande användbara i sammanhanget och ger ett pålitligt resultat.

En entydig förklaring till varför fältspaten i Varbergskomplexets bergarter är grön kunde inte fastställas. Förutom pertitiska lameller observerades inga makrostrukturer som skulle kunna vara anledningen. Lamellerna i pertit har respektive fältspats färg och är därför inte färggivande i sig. Detta innebär att ursprunget till kristallernas gröna färg är av mindre skala, troligen på atomnivå, likt majoriteten av övriga färgade fältspater. I jämförelse med andra studier på fältspater med distinkta färger är charge transfer eller elektronövergångar i övergångsmetaller goda kandidater. Eftersom kvarts i båda undersökta bergarter är mörk, det vill säga likt röckkvarts som uppstår genom defekter i kristallstrukturen till följd av bestrålning, skulle även detta kunna vara en möjlig orsak till fältspatsens färg. Färgcentra är dock en mindre vanlig färggivande faktor i just fältspater.

Det bör även nämnas att fältspaterna i charnockiten respektive pegmatiten är mycket olika, både i kemisk sammansättning och grad av lågmetamorf omvandling. Det bergarterna har gemensamt är att de sannolikt ursprungligen bildats samtidigt och har genomgått metamorfos och deformation vid höga temperaturer och tryck, samt att plagioklas har en grön färgton. Dock skiljer sig nyanserna av grön, vilket innebär att det finns flera avgörande faktorerna bakom den gröna färgen i respektive bergart.

För att ta reda på vilka spårämnen och övriga faktorer som ger fältspaten i Varbergskomplexet dess färg krävs ett absorptionsspektrum för element med låga halter i mineralkornen, det vill säga en betydligt mer detaljerad spektralanalys än den som görs i SEM-EDS, för att även få data över spårämnen i kristallstrukturen.

6 Slutsatser

Även om en förklaring till Varbergsharnockitens gröna färg inte kunde tas fram är ändå några slutsatser möjliga att dra. Det gröna mineralet i pegmatiten är albit. I charnockiten är det antipertitisk oligoklas som är grön. Järnrika respektive kloritiska ådror, som omnämns av Howie (1967) respektive Oliver och Schultz (1968), samt andra strukturer som skulle kunna orsaka färg, kunde inte identifieras. Möjligtvis beror färgen istället på kemiska faktorer i kristallstrukturen, likt andra färgade fältspater. Dessa kräver ytterligare undersökning genom spektralanalys för vidare slutsatser. Möjliga anledningar är elektronövergångar i övergångsmetaller, exempelvis Fe, eller färgcentra orsakade av strålning.

7 Tack

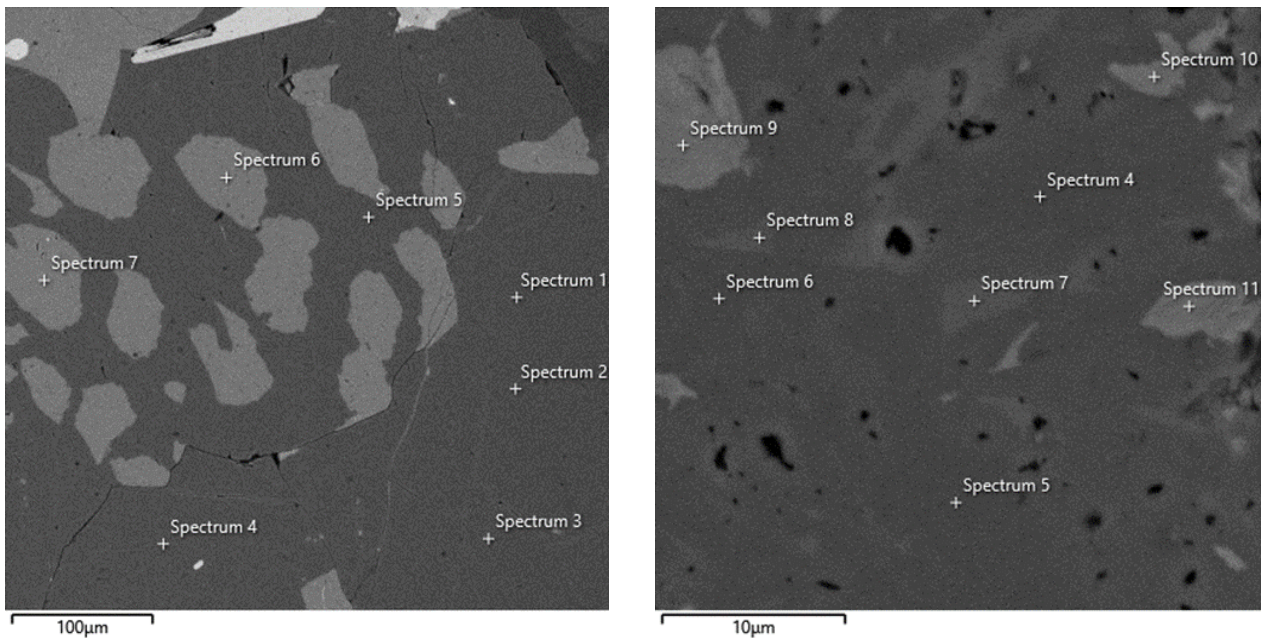
Tack till min handledare, Charlotte Möller, för vägledning och för att jag har lärt mig tonvis med nya saker under arbetsprocessen. Tack till Geoffrey för

korrekturläsning, trots att det inte handlade om faunahistoria. Tack även till Mattias för korrekturläsning och ”kemisk upplysning”, det var ju som tur är rätt ämne. Slutligen tack till Joel för många trevliga pratstunder, även om det inte alltid accelererade skrivprocessen.

8 Referenser

- Bolton, H. C., Bursill, L. A., McLaren, A. C. & Turner, R. G. (1966). On the origin of the color in labradorite. *Physica Status Solidi*, 18(1), 221-230.
- Christoffel, C. A., Connely, J. N. & Åhäll, K. (1999). Timing and characterization of recurrent pre-Sveconorwegian metamorphism and deformation in the Varberg-Halmstad region in SW Sweden. *Precambrian Research*, 98, 173-195.
- Deer, W. A., Howie, R.A. & Zussman, J. (2001) *Rock-Forming Minerals. 4A. Framework Silicates: Feldspars* (second edition). The Geological Society, London.
- Haldar, S. K. (2020). *Introduction to Mineralogy and Petrology* (second edition). Elsevier.
- Hofmeister, A. M. & Rossman, G. R. (1985). A spectroscopic study of irradiation coloring of amazonite: structurally hydrous, Pb-bearing feldspar. *American Mineralogist*, 70(8), 794-804
- Hofmeister, A. M. & Rossman, G. R. (1986). A spectroscopic study of blue radiation coloring in plagioclase. *American Mineralogist*, 71(1), 95-98.
- Howie, R. A. (1967). Charnockites and their Colour. *Journal of the Geological Society of India*, 8, 1-7
- Klein, C. & Philpotts, A. (2017). *Earth materials* (second edition). Cambridge University Press.
- Lewicka, E. (2016). Origin of colour after firing feldspar-quartz raw material from the Sobotka region (Lower Silesia, SW Poland). *EDP Sciences: E3S Web of Conferences*, 8.
- Möller, C. & Andersson, J. (2018). Metamorphic zoning and behaviour of an underthrusting continental plate. *Journal of Metamorphic Geology*, 36, 567-589.
- Nassau, K. (1978). The origins of color in minerals. *American Mineralogist*, 63(3), 219-229.
- Oliver, R. L. & Schultz, P. K. (1968) Colour in charnockites. *Mineralogical Magazine*, 36(284), 1135-1138.
- Smith, J. V. (1974). *Feldspar Minerals* (Vol. 1). Springer Verlag.
- Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). (2016). SGUs Kartvisare. Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). <https://apps.sgu.se/kartvisare/>
- Touret, J. L. R. & Huizenga, J. M. (2012). Charnockite microstructures: From magmatic to metamorphic. *Geoscience Frontiers*, 3(6), 745-753.
- Wenk, H. R. & Bulakh, A. (2004). *Minerals*. Cambridge University Press.
- Yang, C., Santosh, M., Tsunogae, T., Shaji, E., Gao, P. & Kwon, S. (2021). Global type area charnockites in southern India revisited: Implications for Earth's oldest supercontinent. *Gondwana Research*, 94, 106-132

9 Bilaga



Bilaga 1. Områdena i tunnslip V4 (charnockit, till vänster) och V1 (deformerad pegmatit, till höger) där EDS-spektra har gjorts (Tabell 1 och 2). Spektrum 7 och 8 i tunnslip V4 är ortoklas, övriga är oligoklas. I tunnslip V1 är spektrum 4-6 albit, 7 och 8 oligoklas och 9-11 glimmer.

**Tidigare skrifter i serien
”Examensarbeten i Geologi vid Lunds
universitet”:**

581. Pilsner, Hannes, 2020: A geophysical survey in the Chocaya Basin in the central Valley of Cochabamba, Bolivia, using ERT and TEM. (45 hp)
582. Leopardi, Dino, 2020: Temporal and genetic constraints of the Cu-Co Vena-Dampetorp deposit, Bergslagen, Sweden. (45 hp)
583. Lagerstam Lorient, Clarence, 2020: Neck mobility versus mode of locomotion – in what way did neck length affect swimming performance among Mesozoic plesiosaurs (Reptilia, Sauropterygia)? (45 hp)
584. Davies, James, 2020: Geochronology of gneisses adjacent to the Mylonite Zone in southwestern Sweden: evidence of a tectonic window? (45 hp)
585. Foyn, Alex, 2020: Foreland evolution of Blåisen, Norway, over the course of an ablation season. (45 hp)
586. van Wees, Roos, 2020: Combining luminescence dating and sedimentary analysis to derive the landscape dynamics of the Velická Valley in the High Tatra Mountains, Slovakia. (45 hp)
587. Rettig, Lukas, 2020: Implications of a rapidly thinning ice-margin for annual moraine formation at Gornergletscher, Switzerland. (45 hp)
588. Bejarano Arias, Ingrid, 2020: Determination of depositional environment and luminescence dating of Pleistocene deposits in the Biely Váh valley, southern foothills of the Tatra Mountains, Slovakia. (45 hp)
589. Olla, Daniel, 2020: Petrografisk beskrivning av Prekambriska ortognejs i den undre delen av Särsvikskollan, mellersta delen av Skollenheten, Kaledonska orogenerna. (15 hp)
590. Friberg, Nils, 2020: Är den sydatlantiska magnetiska anomalin ett återkommande fenomen? (15 hp)
591. Brakebusch, Linus, 2020: Klimat och väder i Nordatlanten-regionen under det senaste årtusendet. (15 hp)
592. Boestam, Max, 2020: Stränder med erosion och ackumulering längs kuststräckan Trelleborg - Abbeås under perioden 2007-2018. (15 hp)
593. Agudelo Motta, Laura Catalina, 2020: Methods for rockfall risk assessment and estimation of runout zones: A case study in Gothenburg, SW Sweden. (45 hp)
594. Johansson, Jonna, 2020: Potentiella nedslagskratrar i Sverige med fokus på Östersjön och östkusten. (15 hp)
595. Haag, Vendela, 2020: Studying magmatic systems through chemical analyses on clinopyroxene - a look into the history of the Teno ankaramites, Tenerife. (45 hp)
596. Kryffin, Isidora, 2020: Kan benceller bevaras över miljontals år? (15 hp)
597. Halvarsson, Ellinor, 2020: Sökande efter nedslagskratrar i Sverige, med fokus på avtryck i berggrunden. (15 hp)
598. Jirdén, Elin, 2020: Kustprocesser i Arktis – med en fallstudie på Prins Karls Fjäll, Svalbard. (15 hp)
599. Chonowicz, Julia, 2020: The Eemian Baltic Sea hydrography and paleoenvironment based on foraminiferal geochemistry. (45 hp)
600. Paradeisis-Stathis, Savvas, 2020: Holocene lake-level changes in the Siljan Lake District – Towards validation of von Post’s drainage scenario. (45 hp)
601. Johansson, Adam, 2020: Groundwater flow modelling to address hydrogeological response of a contaminated site to remediation measures at Hjortsberga, southern Sweden. (15 hp)
602. Barrett, Aodhan, 2020: Major and trace element geochemical analysis of norites in the Håfjorden Complex to constrain magma source and magma plumbing systems. (45 hp)
603. Lundqvist, Jennie, 2020: ”Man fyller det med information helt enkelt”: en fenomenografisk studie om studenters upplevelse av geologisk tid. (45 hp)
604. Zachén, Gabriel, 2020: Classification of four mesosiderites and implications for their formation. (45 hp)
605. Viðarsdóttir, Halla Margrét, 2020: Assessing the biodiversity crisis within the Triassic-Jurassic boundary interval using redox sensitive trace metals and stable carbon isotope geochemistry. (45 hp)
606. Tan, Brian, 2020: Nordvästra Skånes prekambriiska geologiska utveckling. (15 hp)
607. Taxopoulou, Maria Eleni, 2020: Metamorphic micro-textures and mineral assemblages in orthogneisses in NW Skåne – how do they correlate with technical properties? (45 hp)
608. Damber, Maja, 2020: A palaeoecological study of the establishment of beech forest in Söderåsen National Park, southern Sweden. (45 hp)
609. Karastergios, Stylianos, 2020: Characterization of mineral parageneses and metamorphic textures in eclogite- to high-pressure granulite-facies marble at Allmenningen, Roan, western Norway. (45 hp)
610. Lindberg Skutsjö, Love, 2021: Geologiska och hydrogeologiska tolkningar av SkyTEM-data från Vombsänkan, Sjöbo kommun, Skåne. (15 hp)
611. Hertzman, Hanna, 2021: Odensjön - A new varved lake sediment record from southern Sweden. (45 hp)
612. Molin, Emmy, 2021: Rare terrestrial vertebrate remains from the Pliensbachian (Lower Jurassic)

- Hasle Formation on the Island of Bornholm, Denmark. (45 hp)
613. Højbert, Karl, 2021: Dendrokronologi - en nyckelmetod för att förstå klimat- och miljöförändringar i Jämtland under holo-cen. (15 hp)
614. Lundgren Sassner, Lykke, 2021: A Method for Evaluating and Mapping Terrestrial Deposition and Preservation Potential for Palaeostorm Surge Traces. Remote Mapping of the Coast of Scania, Blekinge and Halland, in Southern Sweden, with a Field Study at Dalköpinge Ångar, Trelleborg. (45 hp)
615. Granbom, Johanna, 2021: En detaljerad undersökning av den mellanordoviciska "furudalkalkstenen" i Dalarna. (15 hp)
616. Greiff, Johannes, 2021: Oolites from the Arabian platform: Archives for the after-math of the end-Triassic mass extinction. (45 hp)
617. Ekström, Christian, 2021: Rödfärgade utfällningar i dammanläggningar orsakade av *G. ferruginea* och *L. ochracea* - Problemstatistik och mikrobiella levnadsförutsättningar. (15 hp)
618. Östsjö, Martina, 2021: Geologins betydelse i samhället och ett första steg mot en geopark på Gotland. (15 hp)
619. Westberg, Märta, 2021: The preservation of cells in biomineralized vertebrate tissues of Mesozoic age – examples from a Cretaceous mosasaur (Reptilia, Mosasauridae). (45 hp)
620. Gleisner, Lovisa, 2021: En detaljerad undersökning av kalkstenslager i den mellanordoviciska gullhögenformationen på Billingen i Västergötland. (15 hp)
621. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2021: Origin and early evolution of isopods - exploring morphology, ecology and systematics. (15 hp)
622. Selezeneva, Natalia, 2021: Indications for solar storms during the Last Glacial Maximum in the NGRIP ice core. (45 hp)
623. Bakker, Aron, 2021: Geological characterisation of geophysical lineaments as part of the expanded site descriptive model around the planned repository site for high-level nuclear waste, Forsmark, Sweden. (45 hp)
624. Sundberg, Oskar, 2021: Jordlagerföljden i Höljedalen utifrån nya borrhningar. (15 hp)
625. Sartell, Anna, 2021: The igneous complex of Ekmanfjorden, Svalbard: an integrated field, petrological and geochemical study. (45 hp)
626. Juliusson, Oscar, 2021: Implications of ice-bedrock dynamics at Ullstorp, Scania, southern Sweden. (45 hp)
627. Eng, Simon, 2021: Rödslam i svenska kraftdammar - Problematik och potentiella lösningar. (15 hp)
628. Kervall, Hanna, 2021: Feasibility of Enhanced Geothermal Systems in the Pre-cambrian crystalline basement in SW Scania, Sweden. (45 hp)
629. Smith, Thomas, 2022: Assessing the relationship between hypoxia and life on Earth, and implications for the search for habitable exoplanets. (45 hp)
630. Neumann, Daniel, 2022: En mosasaurie (Reptilia, Mosasauridae) av paleocensk ålder? (15 hp)
631. Svensson, David, 2022: Geofysisk och geologisk tolkning av kritskollors utbredning i Ystadsområdet. (15 hp)
632. Allison, Edward, 2022: Avsättning av Black Carbon i sediment från Odensjön, södra Sverige. (15 hp)
633. Jirdén, Elin, 2022: OSL dating of the Mesolithic site Nilsvikdalen 7, Bjørøy, Norway. (45 hp)
634. Wong, Danny, 2022: GIS-analys av effekten vid stormflod/havsnivåhöjning, Morupstrakten, Halland. (15 hp)
635. Lycke, Björn, 2022: Mikroplast i vattenavsatta sediment. (15 hp)
636. Schönherr, Lara, 2022: Grön fältspat i Varbergskomplexet. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund

