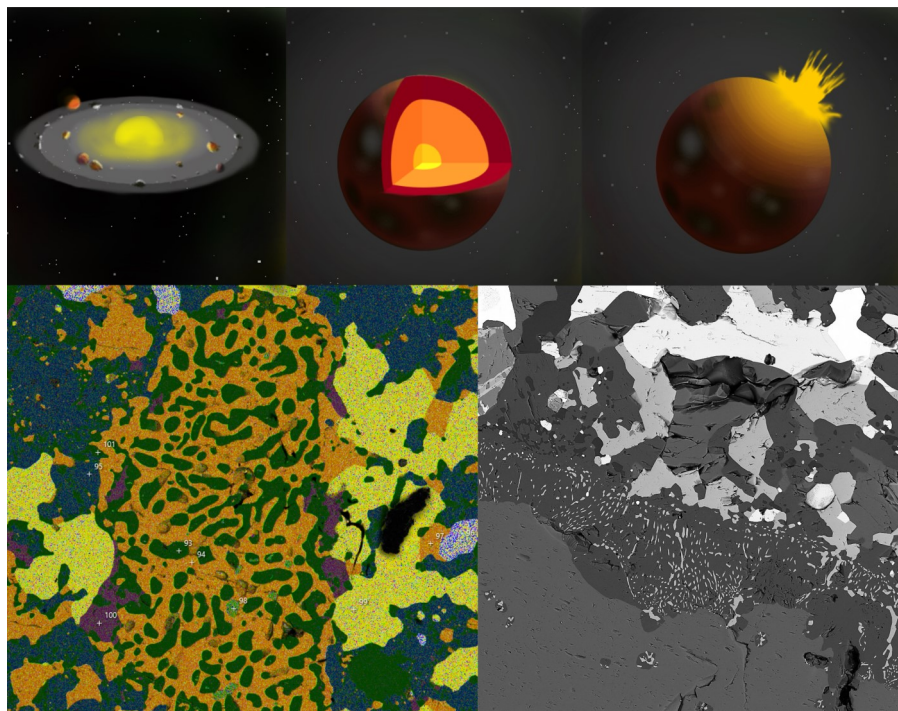


Mesosideriter — redogörelse av bildningsprocesser samt SEM-analys av Vaca Muerta meteoriten

Gabriel Zachén

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 535
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2018

Mesosideriter — redogörelse av bildningsprocesser samt SEM-analys av Vaca Muertameteoriten

Kandidatarbete
Gabriel Zachén

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2018

Innehåll

1	Introduktion	8
2	Bakgrund	8
2.1	Solsystemet	8
2.2	Sammansättning och klassificering	8
2.3	Problematik	8
2.4	Bildningsprocesser	9
2.4.1	Ackretion	9
2.4.2	Differentiering	9
2.4.3	Återsmältning av skorpa och metall-silikatblandning	9
2.4.3.1	Externt ursprung	9
2.4.3.2	Internt ursprung	10
2.4.4	Bombardemang	10
2.4.5	Katastrofal störning och begravning	11
2.4.6	Uppgrävning och utslungning	11
2.5	Ursprung	11
2.6	Bildserie	12
3	Meteoritbeskrivning	13
4	Metod	13
4.1	Litteraturstudie	13
4.2	Praktisk analys	13
4.2.1	Preparation av prov	13
4.2.2	SEM-analys	13
4.2.3	Teknisk information	14
4.2.3.1	SEM	14
4.2.3.2	SE	14
4.2.3.3	BSE	14
4.2.3.4	EDS	14
5	Resultat	14
5.1	SEM-analys	14
5.1.1	Matrix	15
5.1.2	Gabbroisk klast	16
5.1.3	Pyroxenklaster	17
5.1.3.1	Pyroxenklast 1	17
5.1.3.2	Pyroxenklast 2	18
5.1.3.3	Pyroxenklast 3	19
5.1.4	Olivinklaster	20
5.1.4.1	Olivinklast 1	20
5.1.4.2	Olivinklast 2	21
5.1.4.3	Symplektisk kontakt mellan inklusion 2 och matrix	22
5.1.5	Skadat område	23
5.1.6	Blandning av troilit och fältspat	25

Omslagsbild: Överst, av mig målade bilder. Nere till vänster, EDS-bild av smälttextur. Nere till höger, BSE-bild av reaktionskorona.

Innehåll

6 Diskussion	26
6.1 Litteraturstudie	26
6.1.1 Extern eller intern teori	26
6.1.2 Kondritisk projektil	26
6.1.3 Magmaoceaner	26
6.2 SEM-studie	26
6.2.1 Metallstråk	26
6.2.2 Matrix	26
6.2.3 Gabbroisk klast	26
6.2.4 Symplektisk kontakt mellan olivin och matrix	27
6.2.5 Söndrigt område	27
6.2.6 Symplektiska inklusioner i olivin	27
6.2.7 Pyroxenklaster	27
6.2.8 Blandning av troilit och fältspat	27
7 Slutsats	28
7.1 Litteraturstudie	28
7.2 SEM-analys	28
8 Tack	28
9 Referenser	28

Mesosideriter — redogörelse av bildningsprocesser samt SEM-analys av Vaca Muertameteoriten

GABRIEL ZACHÉN

Zachén, G., 2018: Mesosideriter — redogörelse av bildningsprocesser samt SEM-analys av Vaca Muertameteoriten. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 535, 31 sid. 15 hp.

Sammanfattning: I över hundra år har mesosideriterna förbryllat forskare, och många teorier har kommit och gått. Huvudfrågorna har varit: Hur blandades kärn- och skorpmaterial utan att inkorporera stora mängder mantelmateri- al? Vilket scenario förklarar en snabb avkylning, följt av en extremt långsam avkylning? I detta examensarbete samlar jag forskningen kring mesosideriterna och diskuterar de olika teorierna. En stuff från Vaca Muerta analyse- rades också med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM). Teknikerna backscattered electron imaging (BSE) och energy dispersive spectrography (EDS) användes för att identifiera mineral och kemisk sammansättning, samt tex- turer. Ett flertal områden valdes ut och studerades i närmare detalj. Bland annat en gabbrolit klast, reaktionskoro- nor runt olivin, och vad som tolkades vara smälttexturer. Dessa diskuterades utifrån existerande publikationer om samma fenomen i mesosideriter. Ett antal texturer visade sig vara dåligt dokumenterade, andra saknade tidigare observationer hos mesosideriter.

Nyckelord: meteoriter, mesosideriter, järn-stenmeteoriter, Vaca Muerta, litteraturstudie, analys. SEM, BSE, EDS.

Handledare: Carl Alwmark och Paula Lindgren

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

*Gabriel Zachén, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige.
E-post: luddeez@hotmail.com*

Mesosiderites — review of formation processes and SEM-analysis of Vaca Muerta.

GABRIEL ZACHÉN

Zachén, G., 2018: Mesosideriter — redogörelse av bildningsprocesser samt SEM-analys av Vaca Muertameteoriten. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 535, 31 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

Abstract: The mesosiderites have puzzled researchers for over a hundred years, and many theories have come and gone. The main bones of contention have been: How did core and crust material mix without incorporating large amounts of mantle material? What kind of scenario explains a period of fast cooling, followed by extremely slow cooling? This work gathers and discusses the research on mesosiderites. A hand sample from Vaca Muerta was also analysed with a sweeping electron microscope (SEM), where the techniques of backscattered electron imaging (BSE) and energy dispersive spectrography (EDS) was used to identify minerals and chemical compositions, as well as textures. Several areas were chosen for closer study, among them, a gabbroic clast, reaction coronas around olivine, and what was interpreted as a melt texture. These were discussed in the context of previous works of the same phenomenon in mesosiderites. Some of these had previously been poorly documented, or lacked previous observations altogether.

Keywords: meteoriter, mesosideriter, järn-stenmeteoriter, Vaca Muerta, litteraturstudie, analys. SEM, BSE, EDS.

Supervisor(s): Carl Alwmark och Paula Lindgren

Subject: Bedrock Geology

*Gabriel Zachén, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden.
E-mail: luddeez@hotmail.com*

1 Introduktion

Meteoriterna är resterna av de himlakroppar som färdats genom det interplanetariska vakuumet och landat på jorden. Vissa har färdats långt, såsom HED-meteoriterna som misstänks komma från asteroiden 4 Vesta i asteroidbältet mellan Mars och Jupiter (Ruzicka et al. 1997). Andra har inte färdats längre än från Månen. Men vart meteoriterna än kommer ifrån så säger de alla något om solsystemets och jordens historia.

Meteoriterna är tidskapslar från långt svunna tidsåldrar. Deras mineral berättar delar av solsystemets historia. Det var till exempel med hjälp av meteoriter som vi kunde fastslå solsystemets och jordens ålder (Patterson 1956). De har också givit oss en inblick i hur jordens inre kan se ut, samt hur jorden bildades (Iizuka et al. 2015).

Mesosideriterna är ett slag av järn-stenmeteoriter. Som namnet antyder så består de av både metalliskt järn och nickel, samt silikater. Det kan vid första anblick verka som att dessa meteoriter borde ha bildats vid gränsen mellan kärna och mantel. Det var så man länge trodde att mesosideriternas syskon, pallasiterna, hade bildats (Mittlefehldt et al. 1998). Men mesosideriterna innehåller inte mycket, om ens något, mantelmaterial. Silikaterna har istället identifierats som material från en skorpa. En förbryllande blandning, minst sagt.

Detta arbetet söker att samla dagens och gårdagens forskning kring hur mesosideriter har bildats och vart de kommer ifrån. En SEM-studie har också utförts på en stuff från mesosideriten Vaca Muerta. Jag diskuterar om och hur den passar in i dagens forskningsläge. En diskussion förs också kring problem, och hur framtida forskning kan lösa dessa, med den rådande bildningshypotesen.

2 Bakgrund

2.1 Solsystemet

Solsystemet kan, för enkelhets skull, delas upp i tre delar – det inre och det yttre solsystemet, samt trans-neptuniska regionen. Det trans-neptuniska området innehåller alla gravitationellt bundna objekt med ett avstånd från solen längre än Neptunus. Här ingår objekt som t.ex. Pluto och Kuiperbältet. I det yttre solsystemet befinner sig gasjättarna Jupiter, Saturnus, Uranus och Neptunus. Resterande objekt befinner sig i det inre solsystemet. Här finner man Solen i mitten, följt av Merkurius, Venus och Jorden. Bortom Jorden påträffas Mars och allra sist asteroidbältet.

Asteroidbältet som uppehåller sig mellan Mars och Jupiter innehåller dvärgplaneten Ceres och mer än en miljon asteroider med en diameter över en kilometer (Tedesco och Desert 2002). På grund av kollisioner så finns här också en större mängd objekt med en diameter under en kilometer (NASA 2017) – asteroider, meteoroider och rymddamm.

Himlakropparna i asteroidbältet är inte helt lästa i sina banor runt solen. Till och från så störs banorna av interaktioner med Jupiter, eller på grund av kollisioner. När banorna störs så kan det hända sig att en eller flera himlakroppar hamnar i en bana som korsar Jordens

Meteoriter kallas det ljusfenomen som bildas när himlakroppar faller genom atmosfären (Rubin och Grossman 2010). När de kommer i kontakt med atmosfären så brinner de flesta mindre rymdstenar upp, men om de är större så kan de landa på jorden (NE u.å.). Hos större himlakroppar fragmenteras utsidan av meteorerna (Faure och Mensing 2007). Fragmenteringen sker till följd av värmeexpansion. Dessa fragment regnar successivt ned på marken och bildar ett så kallat ströfält, ett ovalformat område bakom nedslagsplatsen. Huvudmeteoriten och dess fragment landar till slut på marken och klassificeras då som meteoriter.

2.2 Sammansättning och klassificering

Meteoriter indelas i två grupper, de differentierade och de icke-differentierade. Därefter klassas de vanligtvis i grupper och subgrupper. Bland de icke-differentierade så finns kondriterna. Hos de differentierade så hittar vi akondriterna, järn-stenmeteoriterna och järnmeteoriterna. Mesosideriter ingår, tillsammans med pallasiter, i gruppen järn-stenmeteoriter. Dessa meteoriter karakteriseras av en blandning av metall och silikat (Bischoff 2001).

Mesosideriter består generellt sett av lika delar metall och silikater. Metallen är en järn- och nickelblandning (Mittlefehldt et al. 1998), liknande metallen i jordens kärna. Silikaterna är en blandning av gabbro, basalt och pyroxenit, där mineralen plagioklas och pyroxen dominerar. Olivin och troilit, järnrik pyrrhotit, samt andra mineral som tridymit, merrillit, ilmenit och kromit förekommer i mindre mängder (Mittlefehldt et al. 1998).

Mesosideriter klassificeras enligt två scheman – ett textuellt schema, 1–4, och ett mineralogiskt schema, A–C. Det textuella schemat specificerar hur metamorfoserat eller magmatiskt påverkat provet ser ut att vara. Medlemmar i grupp 1 uppvisar inga större omvandlingar och har ofta kantiga korn och klaster, kataklastisk textur, matrixets kornstorlek är under 10 µm. Medlemmarna i de 2 och 3 grupperna uppvisar ökande frekvens av exempelvis rundade korn och omvandling, matrixets kornstorlek är också större, över 10 µm i grupp 2 och runt 100 µm i grupp 3. Mesosideriter från grupp 4 är kraftigt metamorfoserade samt återuppsmälta. Klassificeringen är lite mer invecklad då många mesosideriter från grupp 3 uppvisar mindre delar magmatiska texturer och skulle kunna omklassificeras till grupp 4 (Mittlefehldt et al. 1998).

Det mineralogiska schemat specificerar meteoriternas procentuella volyminnehåll av pyroxen och plagioklas bland silikaterna. Grupp A innehåller över 25 % plagioklas och under 65 % pyroxen, grupp B har mellan 10–25 % plagioklas och 65–85 % pyroxen. Slutligen så innehåller grupp C under 10 % plagioklas och över 85% pyroxen (Hutchison 2007).

2.3 Problematik

Mesosideriternas bildning är något av ett mysterium. Till skillnad från pallasiterna kan man inte förklara mesosideriternas sammansättning med att de kommer från gränsen mellan kärna och mantel (Mittlefehldt et al. 1998). Senare forskning visar att inte ens pallasiterna går att förklara på ett så enkelt sätt (Greenwood et al. 2015). Pallasiterna innehåller både metall och olivin – kärn- respektive mantelmaterial. Mesosideriterna

å andra sidan består huvudsakligen av metall, plagioklas och pyroxen – kärn- respektive skorpmaterial. Historiskt sett så har man tänkt sig att metallen i både pallasiter och mesosideriter huvudsakligen kommer från kärnan i differentierade asteroider, himlakroppar som var smälta tillräckligt längre för att ämnen med olika densiteter skulle kunna separeras. Silikaterna i mesosideriterna visar också tecken på de stelnat via differentieringsprocesser (Rubin och Mittlefehldt 1993). Slutsatsen är att mesosideriter måste ha sitt ursprung antingen helt eller delvis i en differentierad himlakropp med kärna, mantel och skorpa. Den första problematiken är då den mest uppenbara: vart är allt mantelmateriale?

Nästa problematik har att göra med mesosideriternas mineralogiska uppbyggnad. Mesosideriterna är polymikta breccior. De innehåller basaltklaster, gabbroklaster, större kristaller (>1 cm) av pyroxen och olivin i en mer finkornig smältmatrix (Mittlefehldt et al. 1998). Hur har en sådan varierad blandning bildats?

Ett annat frågetecken har varit de extrema förhållandena mellan sällsynta jordartsmetaller. Dessa förhållanden är de högsta som påträffats i meteoriter (Mittlefehldt et al. 1992). Vad var orsaken till detta?

Den sista problematiken har att göra med mesosideriternas termiska historia. Genom att studera strukturer i metall och silikat, samt med hjälp av isotopstudier, så har man kunnat konstatera att mesosideriterna har gått igenom två faser av nedkylning. Den första fasen var snabb, från en grad Celsius per årtionde till en grad Celsius per århundrade (ex. Schwandt et al. 1998 och Ganguly et al. 1994). Den första fasen skedde när mesosideriterna låg vid en temperatur på mellan 1150 till 850 °C. Slutligen inleddes en långsam avkylningsfas med under en halv grad Celsius per miljon år. Den sista fasen skedde när mesosideriterna låg under 400 °C (ex. Hopfe och Goldstein 2001 och Haack et al. 1996).

2.4 Bildningsprocesser

För att förklara och reda ut problematiken kring mesosideriterna måste invecklade resonemang och händelseförlopp åberopas. Det är bland annat här som åsikterna har gått isär hos forskarna, i över ett århundrade, och än idag finns inga säkra svar på hur mesosideriterna bildades. Nedan så samlar jag empiriska data och förklaringsmodeller.

2.4.1 Ackretion

Med hjälp av inklusioner i kondritter, himlakroppar som inte påverkats av återsmältning och differentiering, så har man lyckats datera solsystemets födelse till ca. 4,57 Ga (Bouvier och Wadhwa 2010; Jacobsen et al. 2008). Detta antas vara solsystemets ålder.

Vid denna tid började de första himlakropparna i solsystemet växa till sig (fig. 1—4). Material som ansamlades närmre solen ackreterade snabbare och samlade på sig mer radioaktivt material än himlakropparna som bildades längre ut (Rubin och Mittlefehldt 1993). Senare ackretion av material innehöll också mindre radioaktivt material, specifikt ²⁶Al, dessa himlakroppar genererade inte tillräckligt med värme för att smältas upp och differentieras och bildade vad vi idag kallar kondriterna (Pfalzner et al. 2015).

2.4.2 Differentiering

Ungefär samtidigt som ackretionen så gick de smälta kropparna närmast solen igenom differentiering (fig. 5—8) till följd av uppsmältning under långa tidsspann. (Rubin och Mittlefehldt 1993). Uppsmältningen orsakades antingen av sönderfall av radioaktiva isotoper, då främst ²⁶Al, eller på grund av värme bildad i kollisioner (Pfalzner et al. 2015). I differentieringen så separerades ämnen av olika densiteter, och genom kombinationer av partiell och fraktionell smältning så bildades kärnor av järn och nickel, mantlar av olivin och fasta skorpor av plagioklas och pyroxen (Rubin och Mittlefehldt 1993).

Studier som utförts på den kemiska sammansättningen av gabbroklaster i mesosideriter visar på extrema förhållanden mellan olika sällsynta jordartsmetaller. Förklaringen är att gabbro har kristalliserat fraktionellt i magmakammare, där inkompatibla grundämnen som samarium och cerium anrikas i smältan. Europium är mer kompatibelt på grund av en lägre valens och anrikas mindre än samarium och cerium i smältan. Resultatet blir att gabbroklaster har ett högre Eu-/Sm-förhållande. Orsaken till dessa extrema förhållanden måste förklaras med en flerstegsprocess där gabbro åter smälts upp och genomgår flera fraktionella kristallisationsepisoder (Mittlefehldt 1979). Rubin och Mittlefehldt (1993) föreslog att ett nedslag av en fortfarande smält metallkärna i skorpan kunde ha orsakat ytterligare uppsmältning och vidare anrikning av europium. Taylor (via Scott et al. 2001) föreslog istället att förhållandena kunde ha orsakats av återsmältning och fraktionell kristallisering av lavaflöden. Den senare hypotesen förstärks av att Greenwood et al. (2015) sluter sig till att magmaoceaner orsakade bildandet av Mg-rikt olivin.

2.4.3 Återsmältning av skorpa och metall-silikatblandning

Någon gång efter att skorpan stelnat så smältes den åter upp. Olika tidsfönster har tagits fram för denna händelse genom isotopstudier. Sm-Nd datering av Stewart et al. (1994) visade på en ålder mellan 4,52 och 4,42 Ga. Haba et al. (2017) daterade två zirkoner från Estherville-meteoriten med U-Pb isotopdatering som gav en medelålder på 4521 ± 26 Ma. Stewart et al. (1994) och Haba et al. (2017) tolkade denna ålder som tiden då metall blandades med silikater. Koike et al. (2017) kombinerade U-Pb och Hf-W datering som gav åldrar på 4502 ± 75 Ma respektive 4532,8 + 5,7/- 10,4 Ma. I motsats till Haba et al. (2017) så tolkade de detta som en återuppvärmning och att metall-silikatblandningen skedde mycket tidigare – mindre än 10 Ma efter ackretion av moderasteroiden enligt Zhou et al. (2013).

Olika teorier har tagits fram för att förklara återsmältning, förhållanden mellan sällsynta jordartsmetaller metall-silikatblandning. Teorierna kan delas upp i två kategorier: externt ursprung, metallen kommer från en annan himlakropp; internt ursprung, metallen kommer från moderasteroiden.

2.4.3.1 Externt ursprung

Mittlefehldt et al. (1992) föreslog att nedslagssmältning kunde ha varit orsaken till återsmältningen av

skorpan. Hassanzadeh et al. (1990) samt Rubin och Mittlefehldt (1993) föreslog vidare att nedslagssmältningen orsakades av en större kropp som fört med sig en smält metallkärna (fig. 9–12). Denna metallkärna var tvungen att slå ner med låg hastighet, 1 km/s, för att inte metallen skulle förgasas vid nedslaget. Teorin förklarar återsmältning genom att värme från smält metall och värme genererad i nedslaget delvis smälte upp silikaterna. Tillförseln av värme orsakade också vidare uppsmältning och fraktionell kristallisation av gabbro vilket i sin tur skulle leda till de extrema förhållandena mellan sällsynta jordartsmetaller. Metallen föreslås komma från en sönderslagen differentierad himlakropp vars skorpa, och en större mängd av manteln, blivit förstörda av en serie nedslag. Den mindre mängden olivin som finns i mesosideriter antas, av Mittlefehldt et al. (1998), komma från resterande mantel i projektilen. Greenwood et al. (2015) föreslår senare att manteln antagligen var helt avlägsnad från projektilen och att olivinet istället kommer från magmakammare i moderasteroidens skorpa.

Koike et al. (2017) resonerade att metall-silikatblandningen borde ha skett inom tio miljoner år efter differentiering för att det skulle vara möjligt med en smält kärna. De föreslog en annan källa för metallen – metallen kunde ha separerats från metallkondruler i en kondrit. Anledningen till att detta föreslogs var att metallen i mesosideriter har kondritiska proportioner av siderofila, metallkompatibla, ämnen (Shen et al. 1998). Enligt denna teori så skulle återuppvärmningen runt 4,52 Ga behöva en ny värmekälla, möjligtvis impactsmältning eller elektromagnetisk induktion via interaktioner med solen (Koike et al. 2017).

Bunch et al. (2014) föreslog en annan mekanism för metall-silikatblandningen. De framkastade att en järnrik asteroid kolliderade med en diogenitisk asteroid i hastigheter under 6 km/s. Skjuvkrafterna under kollisionen värmdes upp och smälte metall som sedan blandades med breccierade silikater. Denna mekanism löste problemet med ett smält kärnfragment (Bunch et al. 2014)

2.4.3.2 *Internt ursprung*

Haack et al. (1996) och Scott et al. (2001) lade fram en konkurrerande teori till teorin om det externa ursprunget. De ansåg att det fanns flera problem med det projektilburna ursprunget för metallen:

- Haack et al. (1996) argumenterade för att medelhastigheten för kollisioner i början av solsystemet låg runt 5 km/s, det var därför osannolikt att något skulle kollidera med moderasteroiden i 1 km/s. Scott et al. (2001) noterade också att dagens medelhastigheter för kollisioner i asteroidbältet ligger runt 5 km/s och att kollisioner under 1 km/s är sällsynta (Bottke et al. 1994).
- Modelleringar av Love och Ahrens (1996) visade att kollisioner mellan himlakroppar inte var effektiva nog att avlägsna skorpa och mantel från differentierade asteroider. Scott et al. (2001) ansåg det därför osannolikt att det skulle finnas helt eller delvis nakna kärnfragment som skulle kunna kollidera med moderasteroiden.
- För att förbli smält under en längre tid så hade projektilen behövt vara värmeisolerad med ett

tjockt lager mantel. Eftersom liten eller ingen andel mantel påträffas så argumenterade Scott et al. (2001) för att en kollision med ett fortfarande smält kärnfragment vore osannolikt.

- Keil et al. (1997) visade att nedslagssmältning var ineffektivt för att bilda större mängder smältor. På grund av detta så ansåg Scott et al. (2001) att det smälta kärnfragmentet inte kunde ha bidragit med en tillräcklig mängd värme för att vara ansvarig för de extrema förhållandena mellan sällsynta jordartsmetaller.

Den nya teorin baserades istället på ett internt ursprung för metallen. Ett internt ursprung var inget nytt – ett flertal teorier fanns sedan innan som baserades på ett internt ursprung (Hewins 1983). Det nya med teorin var mekanismen för hur metall och silikater blandades. Scott et al. (2001) föreslog att moderasteroiden kolliderade med en himlakropp i hög hastighet, 5 km/s. Denna kollision orsakade en total störning av moderasteroiden – skorpa, mantel och kärna splittrades. Efter kollisionen så återackreterades delarna kaotiskt där metall blandades med skorpa och mantel. Scott et al. (2001) förklarade avsaknaden av mantel i mesosideriter genom en mekanism varvid den smälta metallen främst kristalliserade runt kalla skorppragment. De framförde också att skorpan borde ha fragmenterats mer än manteln, vilket skulle ha lett till en förmånligare kristallisation i kontakt med finkrossad skorpa.

Efter att metall-silikatblandningarna begravts på olika djup så kylde de snabbt ner av sina omgivningar till en så kallad jämviktstemperatur. När jämviktstemperaturen närmade sig så inleddes en långsam avkylning på grund av värmeförlust till rymden (Scott et al. 2001).

Återsmältningen och förhållanden mellan sällsynta jordartsmetaller för den interna teorin förklarade Taylor (via Scott et al. 2001) med att skorpan utsattes för lavafloeden som kontinuerligt begravde ytan och bidrog till fortsatt uppsmältning och fraktionell kristallisation. Greenwood et al. (2015) drog samma slutsats för att förklara Mg-rika olivinkrystaller, som de ansåg inte kommer från manteln, samt de homogena syreisotopvärden som mesosideriter uppvisar. Wasson (2013) kritiserade modellen med magmaoceaner på grund av för långsam uppvärmning från radioaktiva ämnen och dålig bevaring av nedslagssmältor. Han föreslog istället att det var lokala magmakammare som låg till grund för de jämna isotopvärden som uppmätts.

2.4.4 *Bombardemang*

Efter att metall blandats med silikater så bombarderades antagligen moderasteroidens yta (fig. 13) under en längre tid (Rubin och Mittlefehldt 1993). Dessa nedslag gav upphov till de olika graderna av metamorfa och magmatiska texturer, 1–4, som mesosideriterna klassas efter. Empiriska bevis för denna händelsen är exempelvis quench-texturer som daterats till ca. $4,42 \pm 0,02$ Ga (Stewart et al. 1994) och silikater från mesosideriten Estherville med isotopåldrar kring 4,4 Ga (Brouxel och Tatsumoto 1990, 1991) som Rubin och Mittlefehldt (1993) föreslår vara skapade av nedslag. Mittlefehldt et al. (1998) framförde att material från mesosideriten Mt. Padbury fragmenterades och breccierades efter blandning av silikater och metall och att detta talade för nedslag som modifierade mesosideriter

på ytan av moderasteroiden.

Argument emot bombardemang inkluderar avsaknaden av förstörda olivinkoronor och pyroxenkanter (Scott et al. 2001), samt att mesosideriter endast innehåller mindre chockat material (Haack et al. 1996). Angående de breccierade texturerna i Mt. Padbury-materialet så resonerade Scott et al. (2001) att dessa strukturer inte behövde vara orsakade av nedslag – de kunde också ha bildats vid en katastrofal kollision.

2.4.5 Katastrofal störning och begravning

Rubin och Mittlefehldt (1993) förklarade mesosideriternas långsamma nedkylningsfas med ett katastrofalt nedslag på moderasteroiden (fig. 14). Det destruktiva nedslaget fragmenterade moderasteroiden och begravnade metall-silikatblandningarna vid återackretionen (fig. 15–16). Efter begravningen så läts mesosideriterna svalna långsamt på stort djup. Den djupa begravningen lät metallen i mesosideriterna kylas av tillräckligt långsamt för att bilda widmanstättentexturer i större metallnoder (Haack et al. 1996). Denna katastrofala störning förklarade också Ar-Ar isotopåldrar mellan 3,7–4,1 Ga som Bogard och Garrison (1998) tagit fram (Mittlefehldt et al. 1998). De resonerade att kollisionen störde mesosideriterna tillräckligt för att släppa ut allt ackumulerat argon i mineralens kristallgitter.

2.4.6 Uppgrävning och utslungning

Efter begravningen och en lång period av långsam nedkylning så grävdes mesosideriterna åter upp (fig. 17) av nedslag (Rubin och Mittlefehldt 1993). Empiriska data indikerar att mesosideriterna ackumulerade sällsynta gaser via solvinden (Begemann et al. 1976). Deras data pekade också på åldrar för denna händelse mellan 10 och 160 Ma genom datering av isotoper bildade av kosmisk strålning. Bajo och Nagao (2011) daterade material från Vaca Muerta till 140 Ma med hjälp av kosmogena ädelgaser.

Efter att ha grävts upp så slungades mesosideriterna ut – som mindre asteroider eller meteoroider, kroppar mindre än 1 m i diameter – från moderasteroiden av successiva nedslag (Rubin och Mittlefehldt 1993). Mesosideriternas banor runt solen påverkades möjligtvis sedan av interaktioner med Jupiter (Wisdom 1985), vilket tvingade in dem i banor som korsade Jordens (fig. 18). Till slut föll de ned genom Jordens atmosfär och landade som meteoriter.

2.5 Ursprung

Mesosideriternas ursprung har också länge varit ett hett diskuterat ämne (Greenwood et al. 2015; Hutchison 2007; Wasson och Rubin 1985). På grund av mesosideriternas likheter med både pallasiter och HED-meteoriterna så har forskare argumenterat för deras gemensamma ursprung. På ett liknande sätt så har deras olikheter använts för att argumentera motsatsen.

Argumenten för att mesosideriterna och HED-meteoriterna kommer från samma himlakropp baseras primärt på syreisotopsammansättningar och silikat-sammansättningar. Mesosideriternas syreisotopsammansättningar, med avseende på $\Delta^{17}\text{O}$, överlappar HED-meteoriternas. Detta är det huvudsakliga empi-

riska beviset för att de antingen kommer ifrån samma syreisotopsreservoar, vilket skulle betyda ungefär samma bildningsavstånd från solen, eller helt enkelt att de kommer från samma himlakropp. Mesosideriternas silikatsammansättning liknar också den för eukriter. T.ex. så har mesosideriterna inklusioner av klaster med eukritisk sammansättning (Rubin och Jerde 1987), och HED-meteoriterna innehåller material likt mesosideriterna (Rosing och Haack 2004).

Argumenten emot att mesosideriterna och HED-meteoriterna kommer från samma himlakropp är också många. Skillnader i förhållanden mellan sällsynta jordartsmetaller mellan mesosideriterna och HED-meteoriterna talar emot ett gemensamt ursprung (Rubin och Mittlefehldt 1993). Mittlefehldt et al. (1979) samt Rubin och Mittlefehldt (1993) påpekade att det är osannolikt att HED-meteoriterna kunde ha undgått att blandas med metall om de kommit från samma himlakropp som mesosideriterna eftersom regolitbildning sker på hela asteroiden. Hutchison (2007) anmärkte att eftersom HED-meteoriterna visar att deras moderasteroid är relativt intakt så är det osannolikt att mesosideriterna skulle ha grävts upp från samma asteroid. Anledningen är för att begravningsdjupet för mesosideriterna var stort och de nedslag som grävde upp dem borde ha förstört moderasteroiden eller distribuerat metall från mesosideriter till resterande regolit, något som inte har observerats.

2.6 Bildserie

Följande bildserie (fig. 1—18) visar bildningsprocessen för den gällande teorin (ex. Hassanzadeh et al.

1990; Rubin och Mittlefehldt 1993).

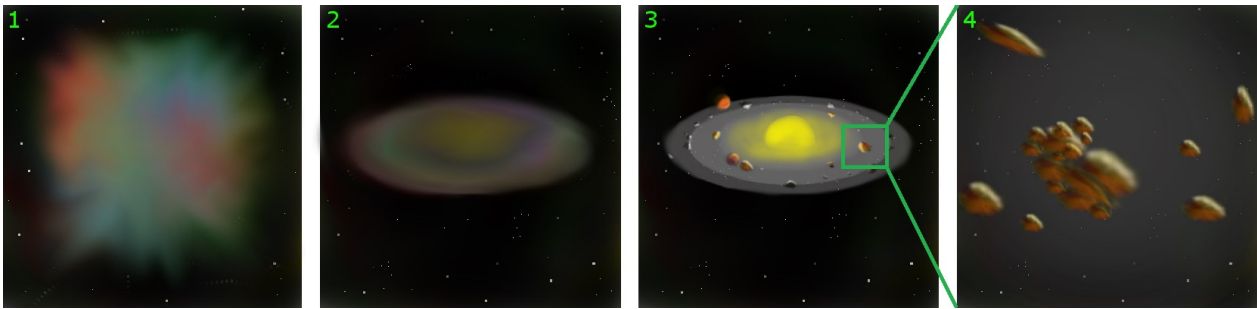


Fig. 1—4. Solsystemet bildas från en nebulosa. Nebulosan störs av yttre krafter, kanske explosioner från supernovor. Material klumpas ihop och börjar rotera. I mitten ansamlas mer och mer material för att till slut bilda en stjärna. Meteoroider, asteroider och planetoider, solsystemets byggstenar, ackreterar i ett våldsamt inferno.

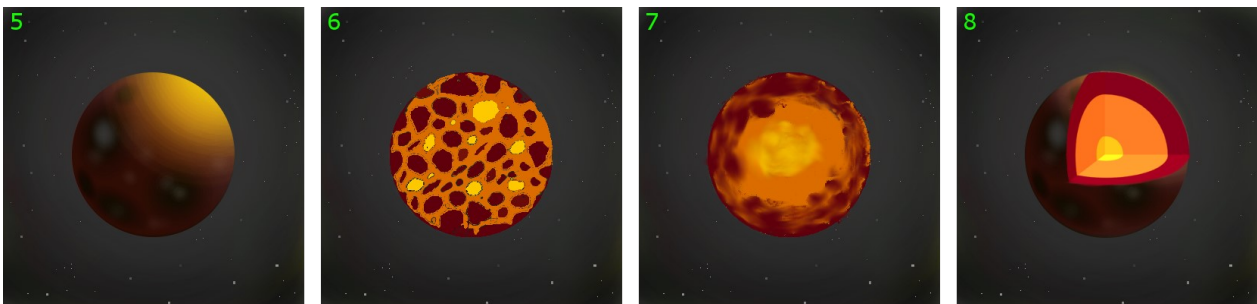


Fig. 5—8. Mesosideriternas moderasteroid har nu ackreterat tillräckligt med material för att smälta upp. Uppsmältningen leder till differentiering: material med högre densitet, t.ex. järn och nickel, sjunker till kärnan. Material med lägre densitet, t.ex. silikater, stiger. Uppsmältningen leder också till att mer felsiska silikater bildas genom cykler av partiell smältning och fraktionell kristallisation. Resultatet är en moderasteroid med järn-nickelkärna, ultramafisk mantel och mafisk skorpa.

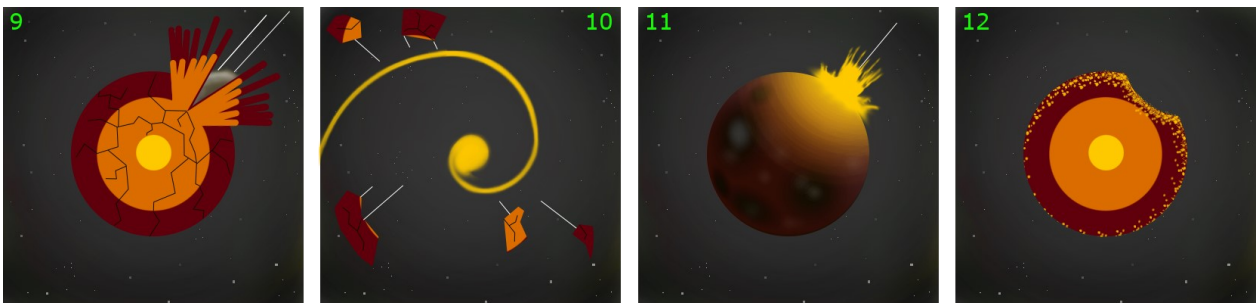


Fig. 9—12. Enligt teorin som Hassanzadeh et al. (1990) och Rubin och Mittlefehldt (1993) föreslog så krävs en smält kärna som projektil. Denna projektil bildas genom att en annan differentierad asteroid slås sönder av nedslag. Kvar blir en smält metallkärna och fragment från mantel och skorpa. Järnprojektilen, fortfarande smält, kolliderar med mesosideriternas moderasteroid och sprider smält metall över stora delar av asteroiden. Dessa metall-silikatblandningarna bildar det som senare blir mesosideriterna.

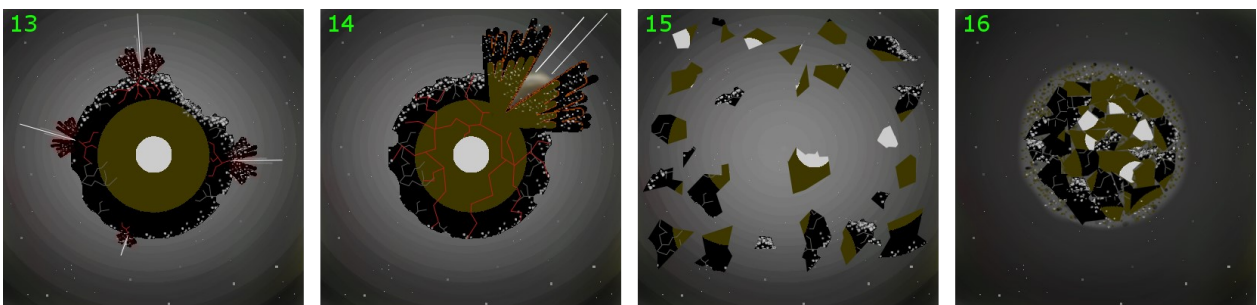


Fig. 13—16. På grund av moderasteroidens relativt ringa storlek så stelnar den fort. Ytan bombarderas av andra himlakroppar under en längre tid vilket smälter upp, metamorfoserar och vidare breccierar metall-silikatblandningarna på ytan. Senare slås moderasteroiden sönder, men delar av den återackreterar och begraver mesosideriterna på stora djup. Här, långt nere under kilometer av asteroidrester, låts mesosideriterna svalna långsamt.

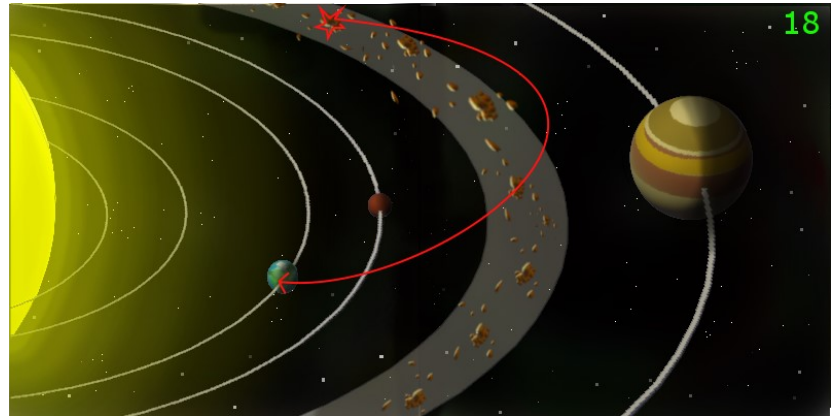
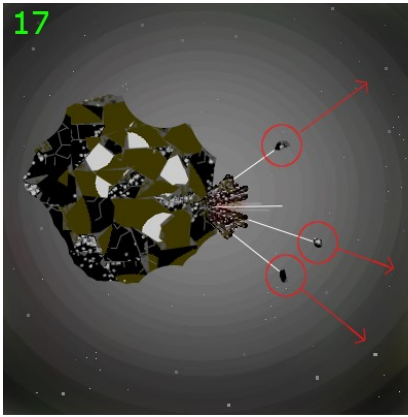


Fig. 17–18. Under en lång tid bombarderas den trasiga moderasteroiden igen av andra asteroider. Till slut grävs mesosideriterna upp och exponeras för kosmisk strålning. Strålningen bildar kosmogena isotoper som kan dateras för att ta reda på när mesosideriterna grävdes upp. Efter att de grävts upp så katapulteras mesosideriterna ut i den interplanetariska rymden. Genom interaktioner med Jupiter ändras deras banor och faller till slut ned på jorden.

3 Meteoritbeskrivning

De första vetenskapliga beskrivningarna av Vaca Muerta utfördes av Domeyko, år 1861 (Pedersen et al. 1992). Delar av meteoriten hittades i Atacamaöknen, i Chile (fig. 19), av flera olika människor, bland annat gruvarbetare som hackade sönder meteoriten för att smältas ned. Sedan dess har upp emot 4 ton hittats (Wasson 1992), och den preatmosfäriska vikten har uppskattats från sex ton (Pedersen et al. 1992) till över tio ton (Wasson 1992).

Vaca Muerta är en mesosiderit av klass 1A, detta innebär en hög andel plagioklas, >25 volymprocent av silikater, liten eller obefintlig metamorf omvandling och en mycket finkornig matrix (Mittlefehldt et al. 1998).

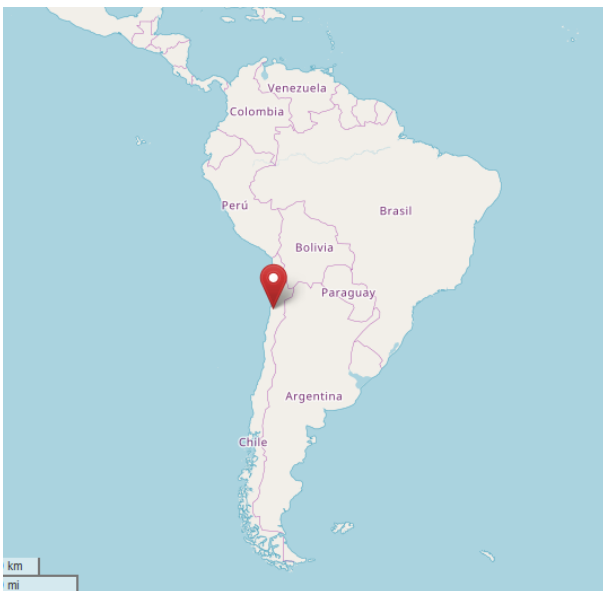


Fig. 19. Kartbild av Sydamerika med ungefärlig position (Pedersen et al. 1992) för Vaca Muertas fyndplats.

© OpenStreetMaps bidragsgivare,
<https://www.openstreetmap.org/copyright>

4 Metod

4.1 Litteraturstudie

Jag utgick från sökordet "mesosiderite" på Web of Science. Från de senaste artiklarna inom ämnet (ex. Koike et al. 2017) letade jag mig baklänges i tid via artiklarnas referenser. Jag använde mig också av källor från boken "Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis" av Hutchison (2007), samt källor från www.meteoritestudies.com.

4.2 Praktisk analys

4.2.1 Preparation av prov

Ett prov av en stuff (fig. 20) från Vaca Muerta donerades till Lunds universitet av en samlare. Provet sågades ut till en ungefärligt cylindrisk form från mitten av stuffen. Provet fick slutliga mått på cirka 2 cm i bredd och 6 cm i diameter. En sida av provet slipades med 300, 500 och 800 grit kiselkarbid. Provet polerades slutligen med 1 mikron och ¼ mikron diamantpasta. Efter polering så skannades provet in med hjälp av en flatbäddsskanner för att få en detaljerad, översiktlig bild att studera och referera till vid den följande SEM-analysen (fig. 19). Undersidan av provet lämnades oslipat.

Med hjälp av optiskt mikroskop så valdes på förhand ett flertal områden ut inför SEM-analysen. Pilformade bitar av silvertejp klipptes till och fästes på provet för att lättare lokalisera dessa områden senare.

4.2.2 SEM-analys

För att inte provet skulle laddas upp med elektroner och omöjliggöra SEM-analys så placerades provet i en så kallad "carbon rod coater" där ett tunt lager kol, cirka 25 nm, applicerades. Vid visuell inspektion så uppvisade provet koncentriska cirklar med varierande färger, möjligtvis till följd av ojämn kolbeläggning eller uppvärmning vid appliceringen.

Provet placerades i ett elektronmikroskop, av typen TESCAN MIRA3, på en höjd av 15 mm. Med hjälp av så kallade "Back-Scattered Electrons", eller BSE, inspekterades provet efter intressanta områden. Dessa



Fig. 20. Översiktlig bild av provet. Till höger syns två större gabbroiska klaster.

områden studerades sedan i närmare detalj och följdes av analys med så kallad "Energy Dispersive Spectroscopy", eller EDS. EDS användes för att studera den kemiska sammansättningen av olika mineral. Instrumentet som användes för EDS var en "Silicon Drift Detector", av typen Oxford Instruments X-Max^N.

4.2.3 Teknisk information

4.2.3.1 SEM

"Scanning Electron Microscope", eller SEM, är en typ av elektronmikroskop. Till skillnad från vanliga optiska mikroskop så används elektroner istället för fotoner. Fördelen med att använda elektroner är att deras våglängd är mycket mindre än våglängderna på fotoner i det visuella spektrumet. De är heller inte lika destruktiva som fotoner av liknande våglängd och energi. Då våglängden på partiklarna som används bestämmer hur små saker man kan se, där en kortare våglängd möjliggör studie av mindre objekt, är den främsta fördelen med elektroner att man kan studera objekt ned till nanometerstorlek. Användandet av elektroner möjliggör också andra metoder som kräver elektroninteraktioner, som t.ex. BSE och EBSD, "Electron Back-Scattered Diffraction" (Reed 2005).

Elektronmikroskopet består vanligtvis av en elektronkanon som accelererar elektroner till en valbar energi, inställningsbara linser och kristaller som fokuserar elektronstrålen och ett lufttomt utrymme för provet så att inte elektronstrålen interagerar med luftmolekyler. SEM använder sig av en svepande elektronstråle. Den svepande strålen rör sig i ett rastermönster och möjliggör snabb avbildning av stora områden (Reed 2005).

4.2.3.2 SE

Vanligtvis så använder sig elektronmikroskop av detektion av sekundära elektroner – elektroner som knuffats undan av elektronstrålen. Vissa av dessa elektroner studsar ut från provet och in i en detektor. Ju fler elektroner som detekteras, desto ljusare blir den delen av bilden. Elektroner som kommer från djupare delar av provet, t.ex. håligheter, har en större chans att bli absorberade av provet än elektroner som kommer från toppar (Reed 2005). Resultatet möjliggör studier av topografi, t.ex. nano-/mikrometerstora strukturer i fossil.

4.2.3.3 BSE

BSE är en teknik där elektronernas, från elektronstrålen, banor böjs av provets atomkärnor och detekteras av en BSE-detektor ovanför provet. Atomer med högre atomnummer, tyngre atomkärnor, returnerar fler elektroner (Reed 2005). Detta gör att områden med tyngre atomer blir ljusare i bilden, och detta gör att man enkelt kan se skillnad på områden med olika sammansättningar, t.ex. mellan pyroxen och plagioklas.

4.2.3.4 EDS

För att studera den kemiska sammansättningen på stora områden kan man använda sig av EDS – "Energy Dispersive Spectroscopy". Som namnet antyder så använder man sig av röntgenstrålning. Tekniken går ut på att fånga upp röntgenstrålning som ibland skickas ut av atomer där elektroner puttats ut. När elektroner puttats ut från atomer så måste andra elektroner ta deras platser. Vid platsbytet så avger atomerna energi i form av fotoner med hög energi. Varje atom har ett unikt energi-"fingeravtryck" och på så sätt kan man skilja på olika ämnen (Reed 2005).

5 Resultat

5.1 SEM-analys

Identifikation av mineral baseras endast på kemisk komposition, via EDS, och skillnader i densitet, via BSE. Det var därför inte möjligt att urskilja exempelvis tetrataenit från taenit eller cristobalit från tridymit. Likaså har ortopyroxener och klinopyroxener identifierats via kemisk komposition. Problemet med detta tillvägagångssätt är störst i gabbroklasten där de icke-lamellära pyroxenerna har sammansättningar mellan $Wo_{1.4}$ och Wo_8 .

Siffror i följande bilder motsvarar siffrorna i tabell 1 (bilaga 1), varje bild har också ett områdesnummer, i figurtexten, som har en motsvarighet i bilagorna.

Bilaga 1 innehåller en tabell med kemisk sammansättning för undersökta områden, markerade med unika siffror i bilderna. Bilaga 2 innehåller närbilder av undersökta områden. Bilaga 3 innehåller motsvarande BSE-bilder för undersökta områden. Varje EDS-bild har ett områdesnummer som har en motsvarighet i bilagorna.

Individuella spektra och grundämneskartor finns tillgängliga i en extern bilaga som laddats upp tillsammans med arbetet.

5.1.1 Matrix

Här försökte jag hitta ett representativt område för matrix (fig. 21). Sammansättningen stämmer överens med den för mesosideriter: cirka 45 % metall, 45 % silikater och 10 % troilit.

Metallen består till största delen, över 90%, av kamacit med mindre mängder taenit. Taeniten ligger ofta inneslutet i kamaciten i runda former. Järn-nickelförhållandet är 95:5 för kamaciten och 60:40 för taeniten. Storleken på metallkristallerna varierar från >500 µm till ett fåtal mikrometer, den största metall-volymen utgörs dock av runt 200 µm stora aggregat. Till skillnad från de mindre kristallerna, som är isole-

rade i den finkorniga matrixen, så bildar de större sammanflätade nätverk. En mindre mängd av kamaciten uppvisar parallella stråk i BSE med en NV-SO riktning.

Troilit sitter i kontakt med metall och silikater. Troilitens former ser ut som ersättningar av metallen. Detta tyder antingen på att metallen är reducerad troilit, eller att troiliten är oxiderad metall. Mindre mängder troilit ligger blandat i det mer finkorniga silikatmatrixen, ej i kontakt med metall. Dessa troilitkristaller är mindre än de som sitter i kontakt med metall.

Också i kontakt med metallen sitter mindre mängder merrillit. Inget samband syns mellan merrillit och ökad frekvens av troilit.

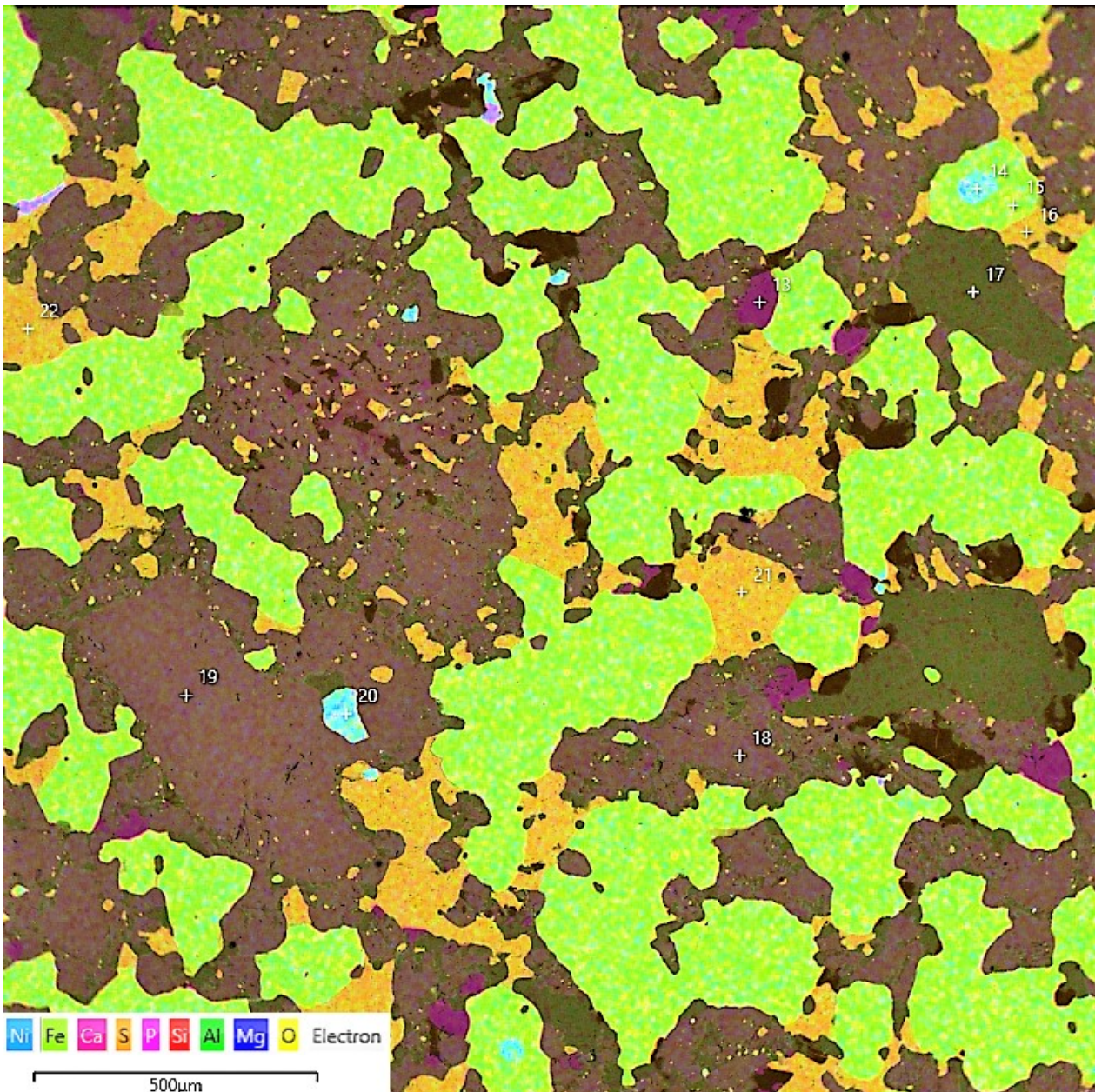


Fig. 21. EDS-bild av område 1: Matrix. De stora kristallerna och metallaggregaten ser ut att vara matrix, liknande områden utgör huvuddelen av provets yta, men ett finkornigare matrix existerar mellan kluster.

Ljusbrunt: Ortopyroxen. Mörkbrunt: SiO₂. Mörkgrönt: Plagioklas. Lila: Merrillit. Orange: Troilit. Ljusgrönt: Kamacit. Turkos: Taenit.

Silikaterna består till största delen av pyroxen, cirka 80 %, och Ca-rik plagioklas. Pyroxenen har en sammansättning på En_{64} . Plagioklasen har en sammansättning på An_{94} . Storleken på kristallerna varierar stort, mellan 500 och tiotals mikrometer. Det ser ut som att matrixen innehåller en ytterligare mer finkornigare matrix, det är därför svårt att skilja på matrix och inklusioner. En mindre mängd kiseldioxid syns också. Cirka fem till tio procent av silikaterna utgörs av kiseldioxid.

5.1.2 Gabbroisk klast

Meteoriten innehåller två större klaster som liknar gabbro eller gabbronorit. Den större (fig. 22) studerades i närmare detalj.

Klasten är obreccierad, ekvigranulär, rund, cirka 1,5 cm i diameter och innehåller subhedrala kristaller med en storlek mellan 1 och 1,5 mm i diameter. Kristallerna består av lika delar plagioklas, med sammansättningen An_{96} , och pyroxen, med sammansättningen $En_{56-58}Wo_{1,4-8}$. Alla pyroxenkristaller uppvisar avblandningslameller. Lamellerna innehåller pyroxen med sammansättningen $En_{30-41}Fs_{18-39}Wo_{41-45}$. Troilit

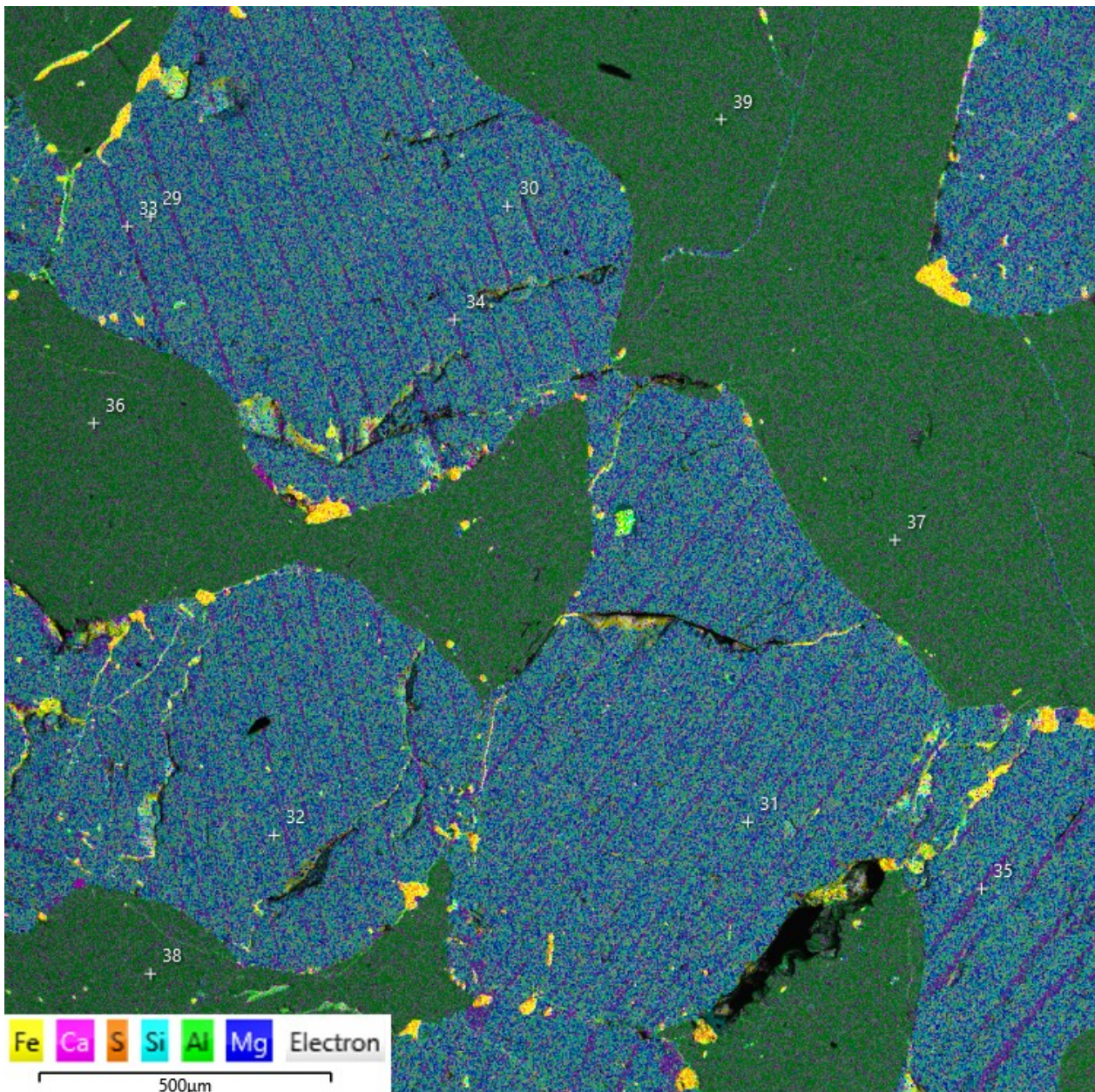


Fig. 22. EDS-bild av område 3: Gabbroisk klast. Avblandningslameller med Ca-rik pyroxen syns tydligt i ortopyroxen. Troilit har lagt sig i kristallkontakter, sprickor och ibland i lameller.

Blått: Ortopyroxen. Mörkgrönt: Plagioklas. Lila: Klinopyroxen. Orange: Troilit. Svart: Sprickor/kolflagor.

ligger utspritt i isolerade korn i kontakter mellan kristaller samt ibland i pyroxeners lameller. Kontakten mellan klasten och matrix studerades inte närmre på grund av tidsbrist. Värt att notera är att i närheten av klastkontakten så finns ett symplektiskt mellanrum mellan pyroxen och fältspat.

5.1.3 Pyroxenklaster

I matrix sitter en stor mängd klaster av pyroxen. Tre klaster studerades i närmare detalj på grund av deras utseende.

5.1.3.1 Pyroxenklast 1

En större, kantig pyroxenkristall (fig. 23), cirka 1 cm lång, sitter i matrix. Pyroxenen har sammansättningen En_{74} cirka 1,4 mm från kanten, och En_{70} 0,5 mm från kanten. Kristallen omgärdas av finkornigt, fåtal mikrometer, matrix i en zon som är cirka 50 μm bred. Zonen innehåller till största delen pyroxen och plagioklas med mindre mängder metall och troilit. Kamaciten uppvisar inga stråk. Angränsande större metallnoder är oxiderade till järnoxid i närheten av zonen, cirka 100–200 μm från pyroxenkristallen. Sprickor och inklusioner i kristallen innehåller kromit och troilit i lika delar. En svagt steglös zonerings syns i kristallen i BSE.

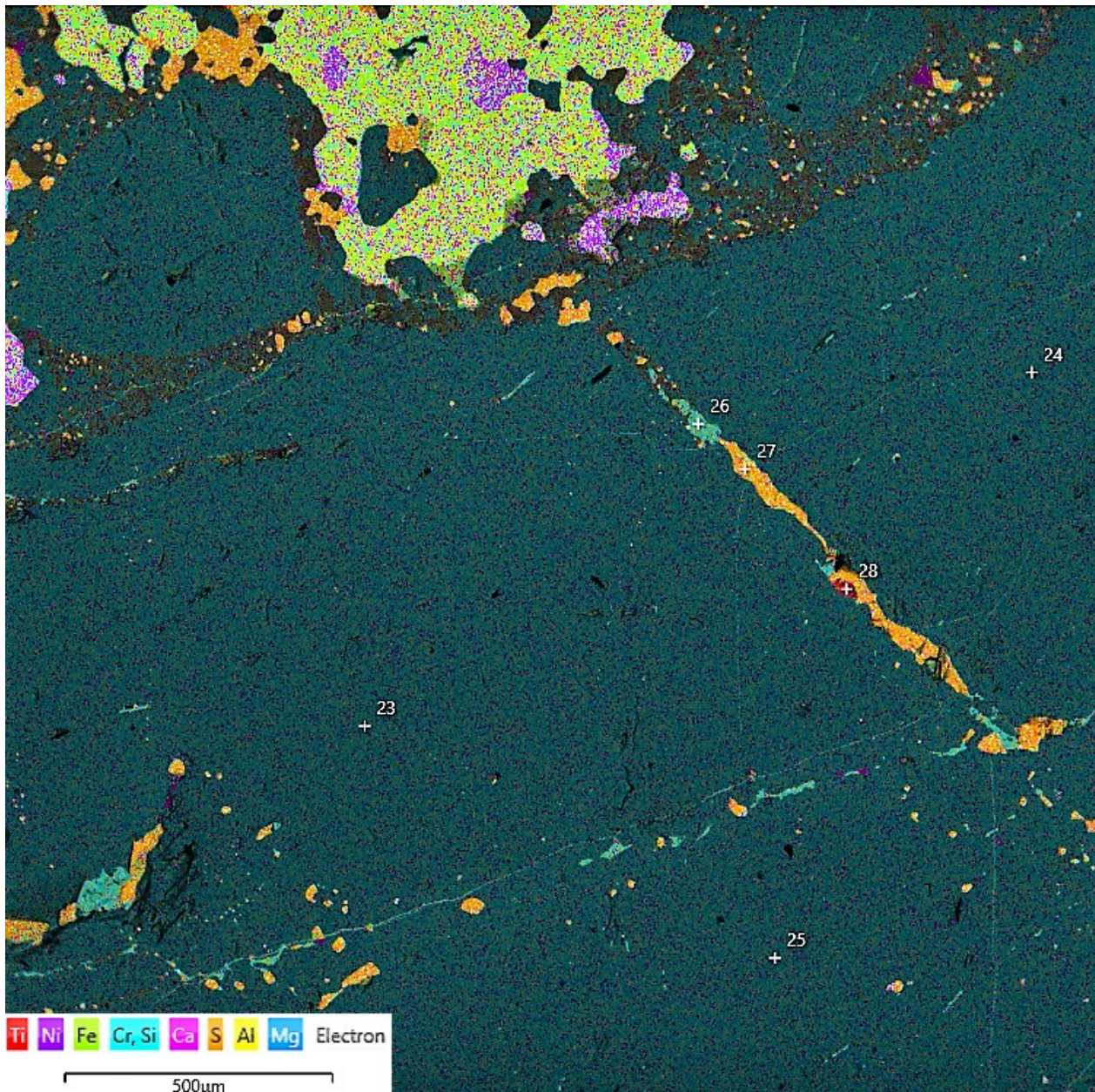


Fig. 23. EDS-bild av område 2: Pyroxenklast 1. Metall är inte i direkt kontakt med klasten. Kamacit är oxiderad till järnoxid i närheten av klasten. Ett finkornigt matrix har tagit sig in i sprickor som till största delen är fyllda med kromit och troilit. Klasten är svagt zonerad med högre järnhalt i närheten av sprickor och matrix.

Mörkt blågrönt: Ortopyroxen. Brunt: Plagioklas. Orange: Troilit. Turkos: Kromit. Rött: Ilmenit. Rosa: Taenit. Ljusgrönt: Kamacit. Grönt: Järnoxid. Svart: Sprickor/kolflagor.

Zoneringen indikerar högre densitet närmast matrix och ifyllda sprickor.

5.1.3.2 Pyroxenklast 2

En anhedral pyroxenkristall (fig. 24) med udda form och färg, cirka 5 mm lång, sitter i matrix. Pyroxenen har sammansättningen En_{82} . Ingen metallfri zon omgärdar kristallen, istället är metall i direkt kontakt med kristallen på flera ställen. Ett undantag till detta är den vänstra delen av kristallen där en cirka 400 μm bred zon med endast en mindre mängd metall omgärdar

kristallen. Zonen innehåller pyroxenkristaller, cirka 200 μm stora, i en finkornig matrix. Utspritt i kristallen finns stråk av isolerade troilitinklusioner, mindre än 20 μm stora. Sprickor är fyllda med troilit. En svag steglös zonering syns i kristallen i BSE. Zoneringen indikerar en högre densitet i de delar av kristallen som är närmast matrix.

Kamaciten utanför inklusionen uppvisar endast svaga stråk med NV-SO riktning vid denna förstoring.

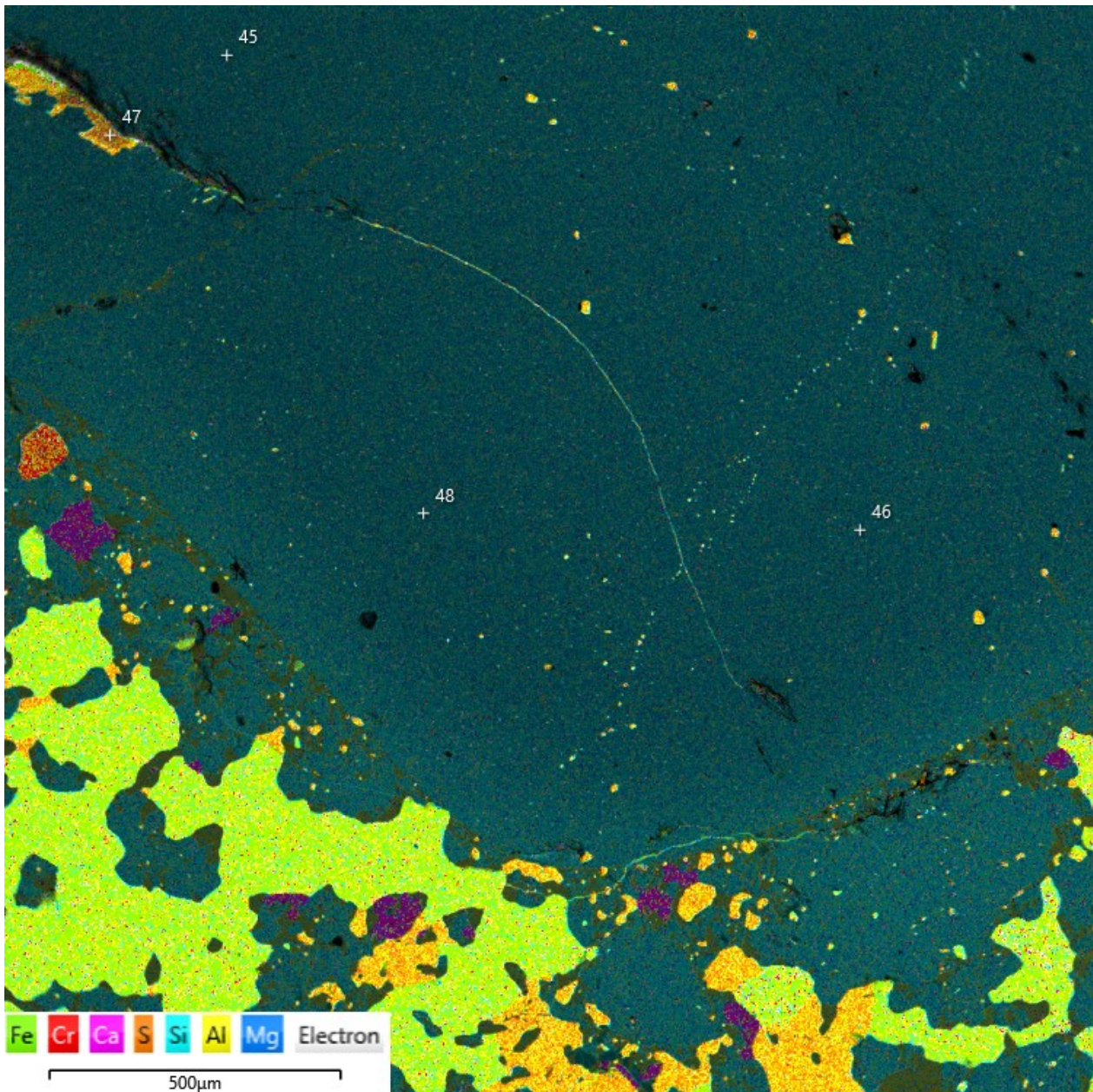


Fig. 24. EDS-bild av område 4: Pyroxenklast 2. Metall är i direkt kontakt med klasten, men är inte oxiderat. Troilit fyller sprickor och som isolerade inklusioner i spår. Ingen kromit syns i klasten. En svag zonering syns i BSE (bilaga 3).

Mörkt blågrönt: Ortopyroxen. Mörkbrunt: Plagioklas. Orange: Troilit. Rött: Kromit. Lila: Merrillit. Grönt: Kamacit. Svart: Sprickor/kolflagor.

5.1.3.3 Pyroxenklast 3

Ytterligare en pyroxenkristall (fig. 25) med anhedral form och vit färg, cirka 1,3 mm lång, sitter i matrix. Pyroxenen har sammansättningen En_{70} nära mitten. Pyroxener utanför inklusionen har sammansättningen En_{65} . Ingen metallfri zon omgärdar kristallen. Också denna kristall uppvisar en svag steglös zonerig nära kanterna i BSE som indikerar högre densitet där.

Kamaciten uppvisar tydliga subparallella stråk med högre densitet med en NV-SO riktning.

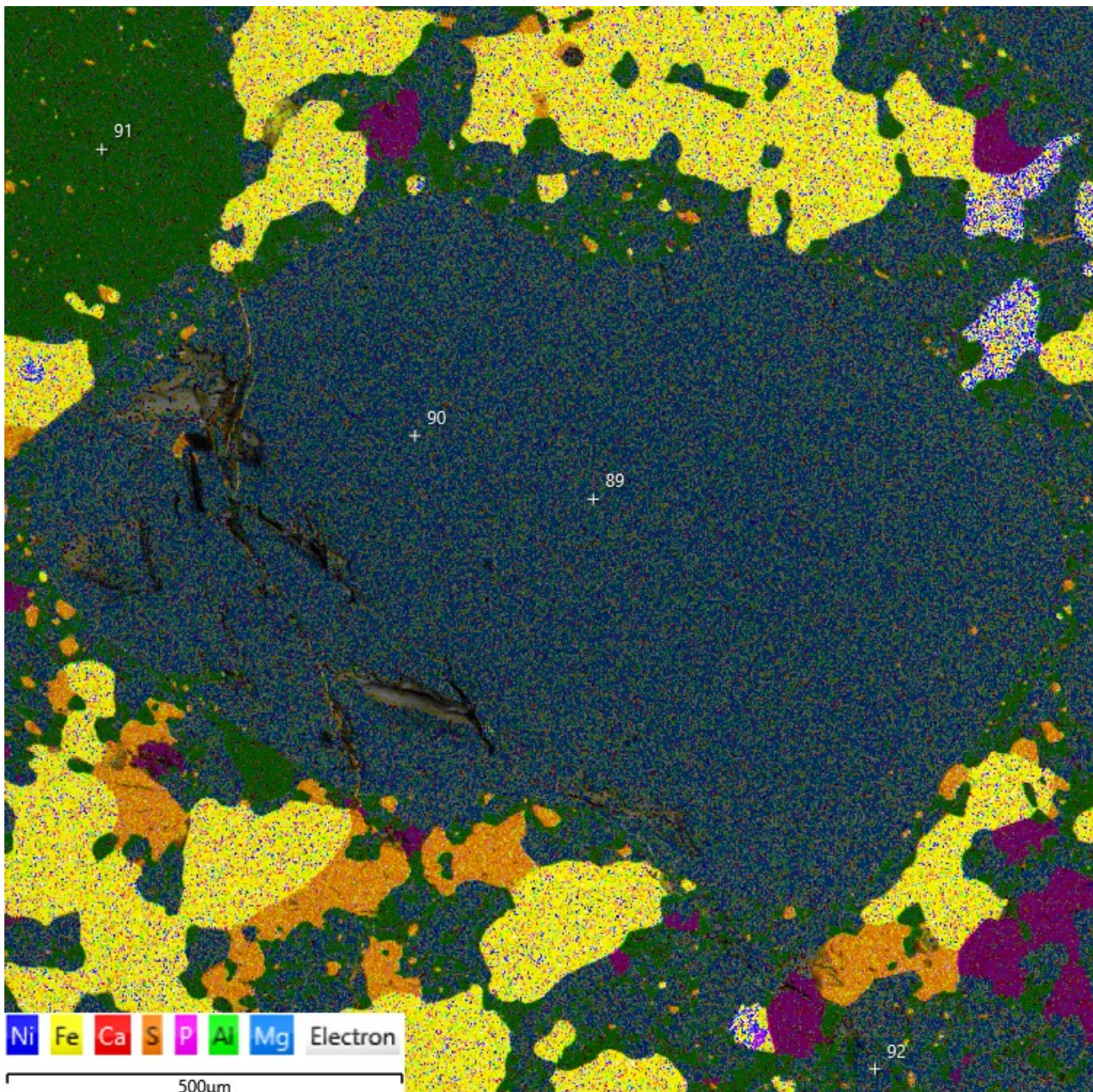


Fig. 25. EDS-bild av område 10: Pyroxenklast 3.

Mörkblått: Ortoproxen. Mörkgrönt: Plagioklas. Orange: Troilit. Lila: Merrillit. Gult: Kamacit. Gulblå: Taenit. Svart: Sprickor/kolflagor.

5.1.4 Olivinklaster

I matrix sitter ett flertal större olivinklaster. Två klaster, samt en kontakt mellan klast och matrix, studerades i närmare detalj.

5.1.4.1 Olivinklast 1

Kristallen, sammansättning Fo_{66} , är cirka 4,6 mm lång, subhedral och kraftigt uppsprucken. Vid närmare inspektion (fig. 26) visar sig två olika spricksystem. Ett spricksystem, cirka 5 μm i bredd, där sprickorna har fyllts i med pyroxen, En_{71} , och kromit samt mindre mängder klinopyroxen och kamacit. Klinopyroxenen

existerar i kontakt med ortopyroxen, men inte som lameller. Ett annat spricksystem med bredare och större sprickor som inte har fyllts igen syns också. Likt alla olivininklusioner i stoffen omgärdas också denna kristall av en zon med pyroxen och kromit.

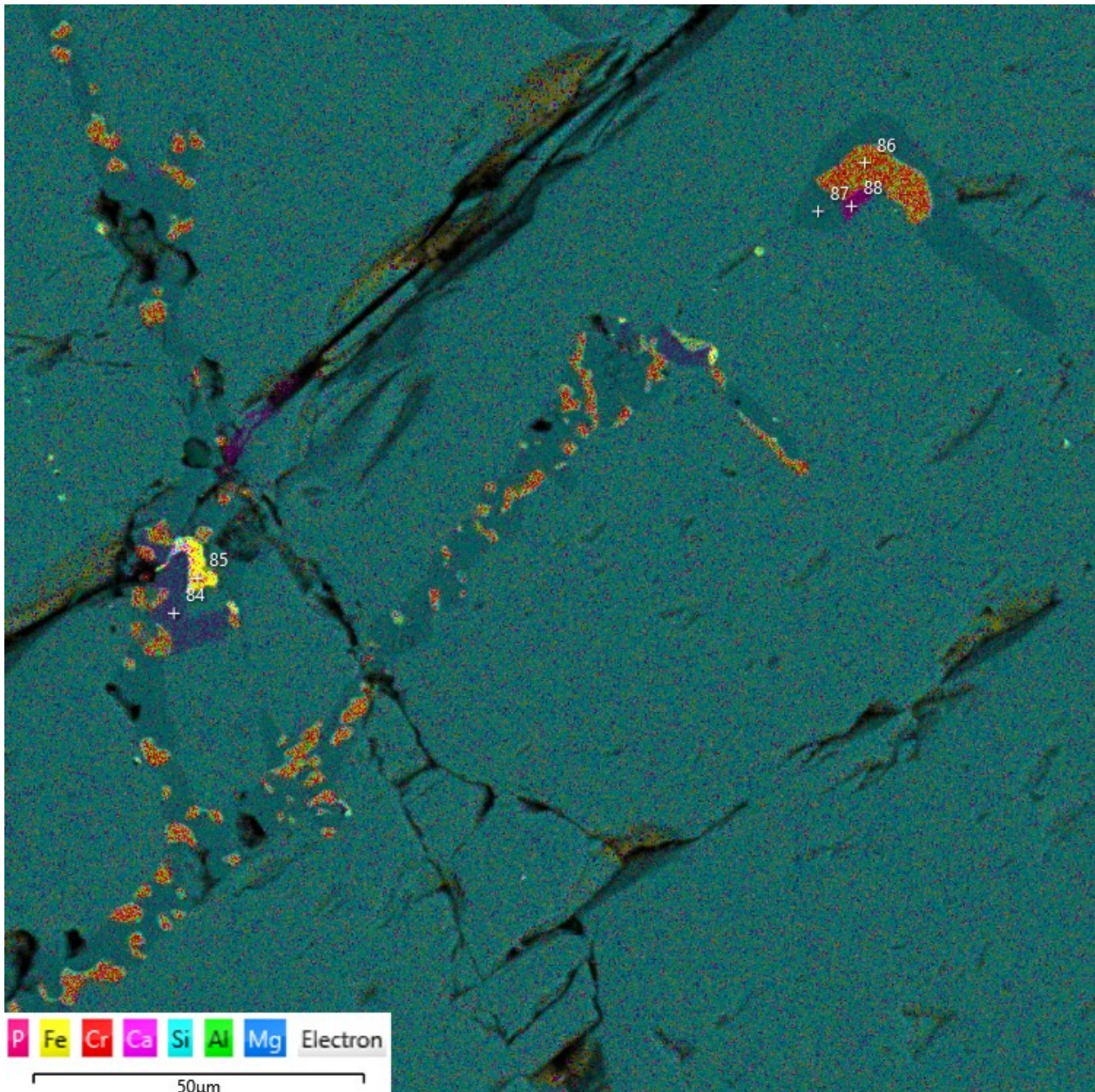


Fig. 26. EDS-bild av område 9: Olivinklast 1. Inzoomning på "pyroxenådra". Ådrorna följer ibland sprickor, ibland inte. Ådrorna är fyllda med huvudsakligen pyroxen och kromit med mindre mängder merrillit, klinopyroxen och metall.

Ljusblått: Olivin. Mörkare blått: Ortopyroxen. Rött: Kromit. Blålila: Klinopyroxen. Lila: Merrillit. Gult: Kamacit. Svart: Sprickor/kolflagor.

5.1.4.2 Olivinklast 2

Denna klast valdes ut på grund av annorlunda texturer. Kristallen (fig. 27), sammansättning FO_{63} , är också uppsprucken. Sprickorna är inte igenfyllda. I kristallen, jämnt utspritt, sitter runda symplektiska former ,

10—20 μm i diameter. Formerna är fyllda med cirka 70 % pyroxen, En_{69} , och 30% kromit.

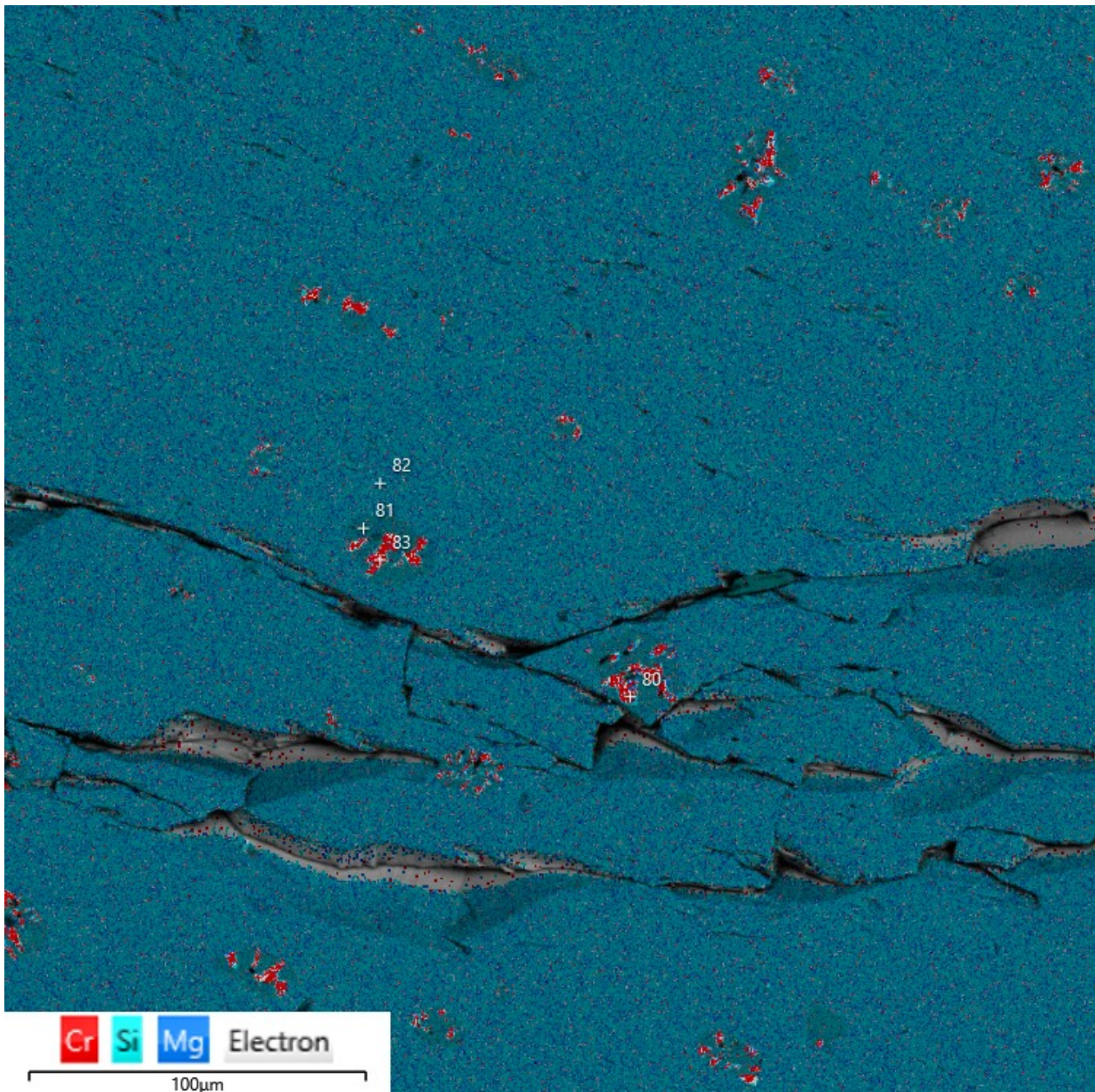


Fig. 27. EDS-bild av område 8: Olivinklast 2. Inzoomning på symplektiska inklusioner. Inklusionerna ser ut att vara jämnt utplacerade i olivinklasten. Huvudsaklig orientering i VNV-OSO. Inklusionerna är fyllda med symplektiska former av kromit i ortopyroxen.

Ljusblått: Olivin. Mörkare blått: Ortopyroxen. Rött: Kromit. Svart och grått: Sprickor/kolflagor.

5.1.4.3 Symplektisk kontakt mellan klast 2 och matrix

En kontakt mellan olivin och matrix studerades vid olivinklast 2 (fig. 28).

I kontakt med olivinkristallen finns en 50–100 µm bred inre zon med anhedrala kristaller av endast pyroxen, med sammansättning En_{70} , kromit och ilmenit. Pyroxen utgör cirka 90 % av volymen i denna zon. Kromit och ilmenit bildar symplektiska texturer, fåtal mikrometer breda och några få till tiotals mikrometer långa, som sträcker sig vinkelrätt från olivinkontakten. Vissa av formerna är sammanlänkade med större kristaller utanför den inre zonen.

Utanför den inre zonen finns en 100–150 µm bred yttre zon. Zonen innehåller anhedrala kristaller av cirka 50 % pyroxen, 20 % kromit, 15 % merrillit, 5 % plagioklas, med sammansättning An_{95} , 5 % troilit och 5 % rutil. Kromitkristallerna är mycket större jämfört med den inre zonen, 10–100 µm, och är slumpmässigt orienterade. Detsamma gäller merrillit. Merrillit existerar endast i kontakt med kromit och ser ut att vara ersättningar, eller ersatta av kromit. Troilit existerar som isolerade korn, 1–50 µm stora, men vanligtvis i kontakt med kromit eller merrillit. Likt merrillit så ser också troilit ut att vara ersättningar, eller ersatta av kromit.

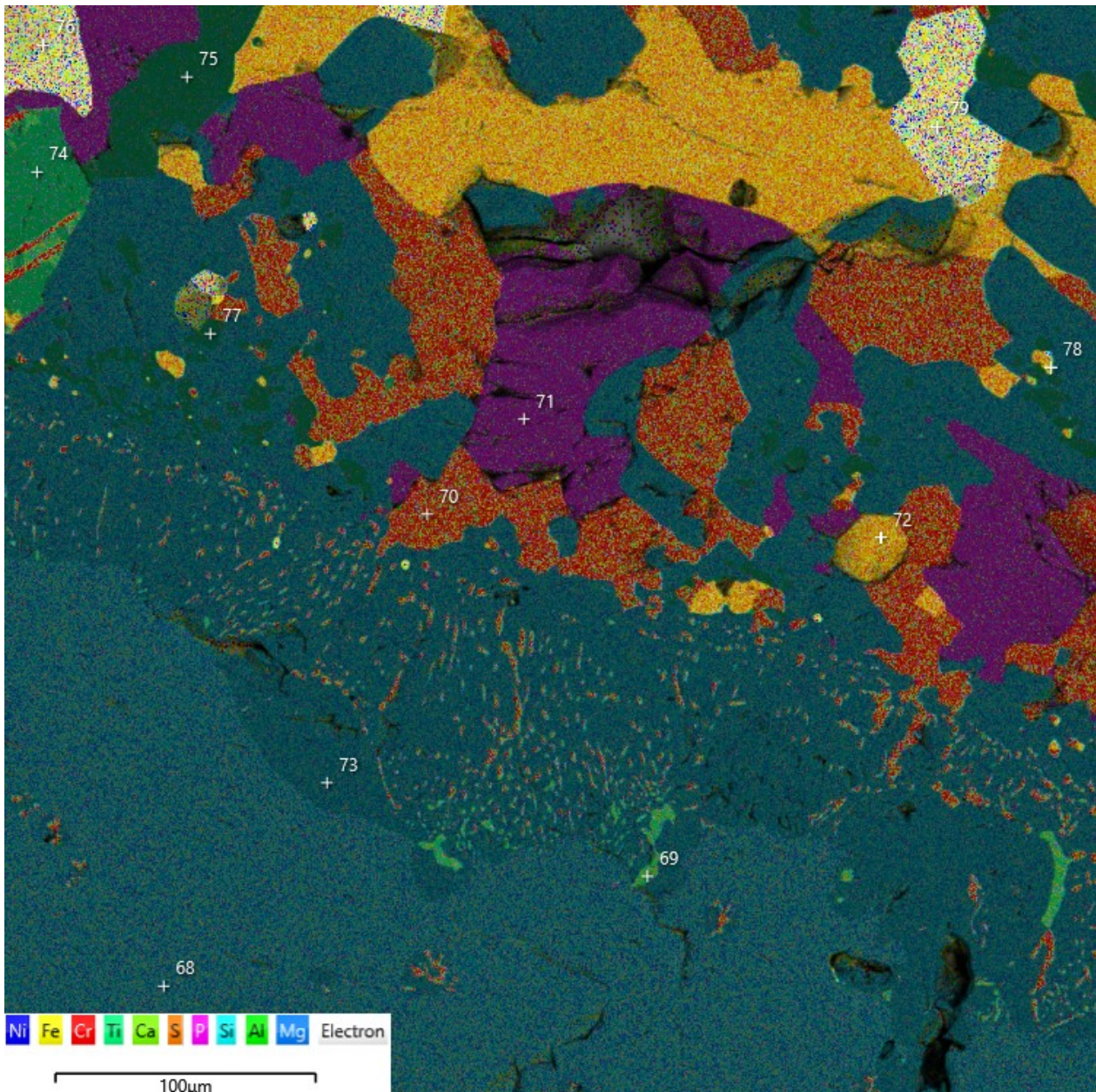


Fig. 28. EDS-bild av område 7: Symplektisk kontakt mellan klast 2 och matrix. Reaktionskorona med en inre zon, med tunt symplektiskt kromit och ilmenit i ortopyroxen, och en yttre zon med större kristaller av kromit, merrillit, troilit, plagioklas, rutil och taenit.

Blått: Olivin. Mörkare blått: Ortopyroxen. Rött: Kromit. Orange: Troilit. Ljusgrönt: Ilmenit. Grönt: Rutil. Mörkgrönt: Plagioklas. Lila: Merrillit. Gulblått: Taenit. Svart och grått: Sprickor/kolflagor.

Densitetsskillnader undersöktes med hjälp av BSE. Densiteten av kromiten är högre i kontakt med merrillit, till skillnad från dess kontakter med pyroxen och troilit. Densiteten av taenit är högst i kontakten till andra mineral.

5.1.5 Skadat område

Bland flera liknande områden valdes detta ut för närmare studier. I reflekterat ljus så är området vitt (bilaga 2). Området uppvisar stora topografiskillnader, kontrollerades med hjälp av sekundära elektroner, som om stora delar material har försvunnit från vissa områden, och en zon liknande den runt olivininklusioner, se 4.1.4.3, utanför. Området är cirka 1 mm i diameter. Insidan av området (fig. 29—30), det som är kvar, utgörs av >95 % pyroxen, med sammansättning En_{67} ,

och isolerade korn av troilit runt 10 μm i diameter. Håligheterna i området är störst i mitten och minskar mot kanterna.

Zonen kring det söndertrasade området utgörs av en inre och en yttre zon. Den inre zonen varierar stort i bredd, från endast några mikrometer till över 200 μm . Zonen utgörs till 90 % av pyroxen, med sammansättning En_{67} , samt kromit och ilmenit. Kromit och ilmenit bildar symplektiska texturer, oftast vinkelräta mot kontakten. Undantaget är det undre högra hörnet av området, här bildar kromit större kristaller med en nästan parallell riktning mot kontakten.

Den yttre zonen varierar stort i sammansättning och kornstorlek. Ovanför området ligger isolerade korn av troilit i en finkornig matrix av plagioklas och pyroxen. Små mängder merrillit finns också här. 200

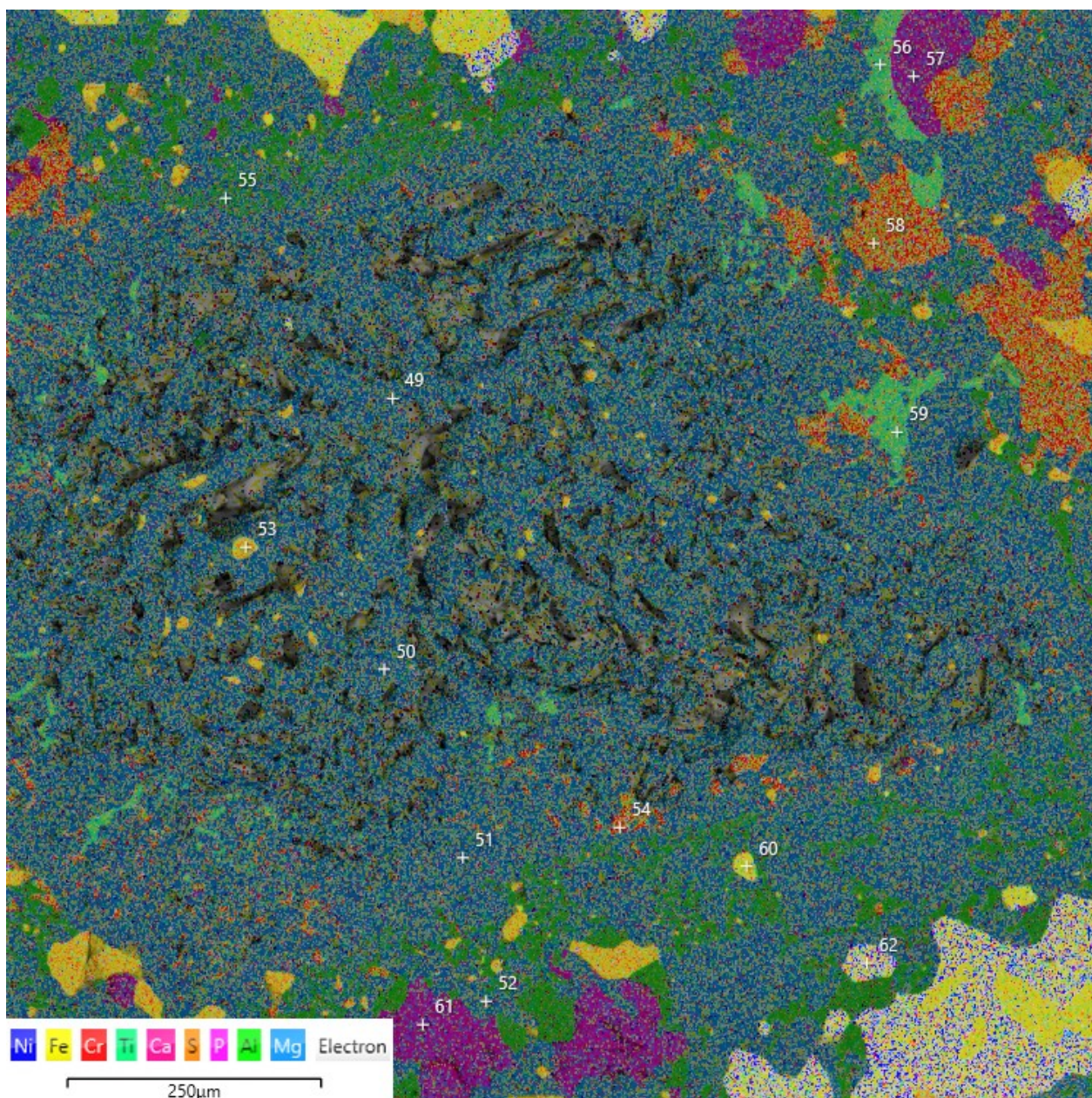


Fig. 29. EDS-bild av område 5: Skadat område. Reaktionskorona kring ett trasigt område med ortopyroxen.

Blått: Ortopyroxen. Rött: Kromit. Orange: Troilit. Ljusgrönt: Ilmenit. Mörkgrönt: Plagioklas. Lila: Merrillit. Gulblått: Taenit. Gult: kamacit. Svart och grått: Sprickor/kolflagor.

µm från kanten sitter kamacit och taenit. Vänster om området finns stora mängder kromit, ilmenit och merillit. Kristallerna ökar i storlek med ökat avstånd från kontakten. Matrixen består här av cirka 90 % pyroxen. Metall påträffas inte förrän efter 300 µm från kontakten i form av taenit. Under och till höger om området, cirka 50 µm från kontakten, påträffas större kantiga pyroxenkristaller i ett finkornigt, plagioklasrikt, matrix. Pyroxen bildar symplektiska texturer med plagioklas närmast området. 250 µm från kontakten befinner sig större, över 200 µm stora, taenitkristaller med inklusioner av kamacit.

Undersidan av stufven studerades i reflekterat ljus.

Också här fanns en större mängd vita, skadade områden.

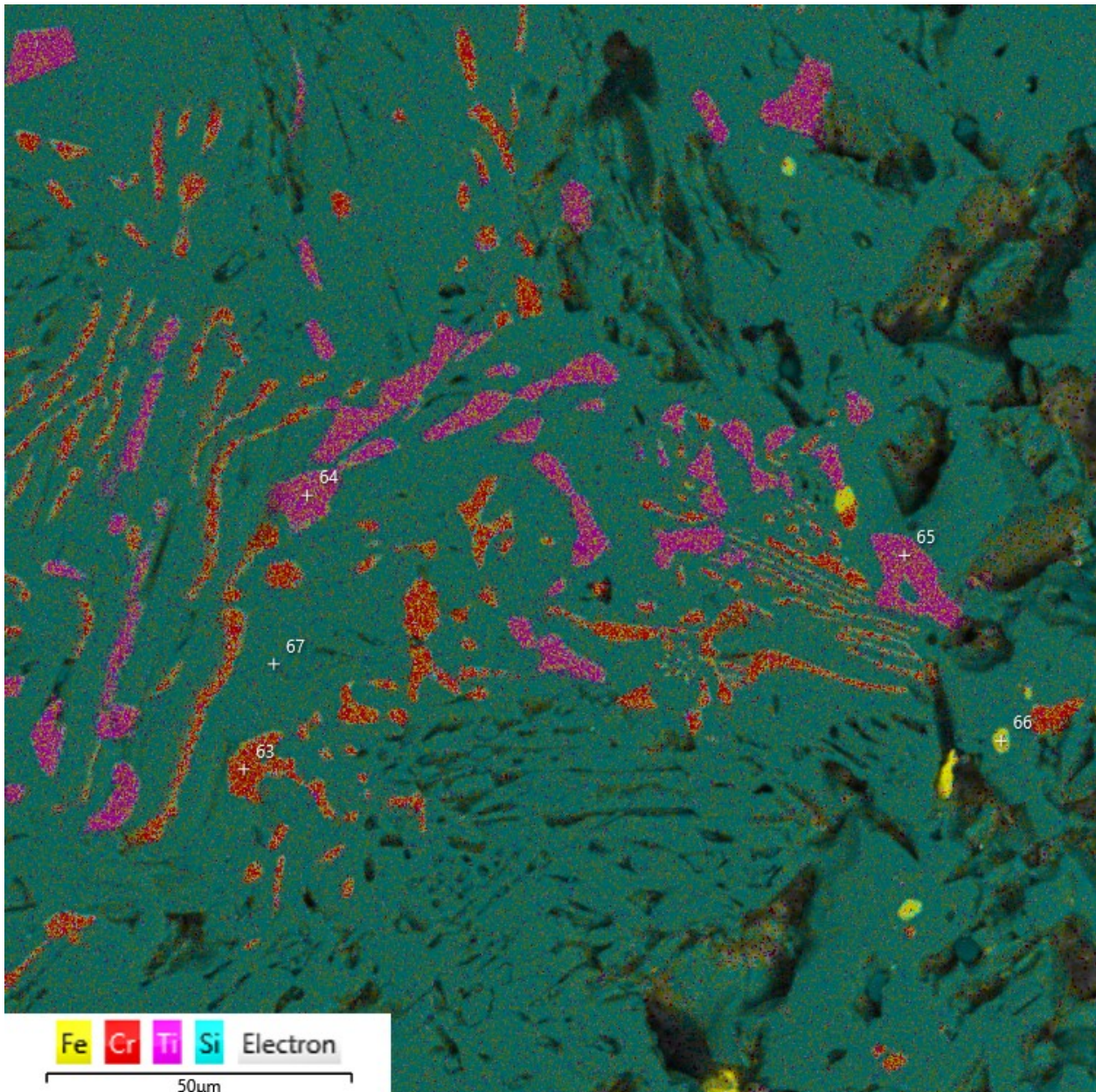


Fig. 30. EDS-bild av område 6: Skadat område, inzoomat. Symplektiska former av både kromit och ilmenit. Skadade områden som följer kromit och ilmenit har antagligen innehållit dessa mineral.

Blått: Ortopyroxen. Rött: Kromit. Gult: Troilit. Rosa: Ilmenit. Svart och grått: Sprickor/kolflagor.

5.1.6 Blandning av troilit och fältspat

Området valdes ut för vidare studier i reflekterat ljus då det innehåller intressanta strukturer.

Området med blandningen (fig. 31) är cirka 1,3 mm långt och 0,6 mm brett. Området innehåller cirka 60 % troilit, 35% plagioklas, med sammansättningen An_{93} , samt mindre mängder merrillit och kromit. Plagioklas och kromit utgör isolerade, anhedrala, olikformade massor som slingrar sig i troiliten. Formerna är mellan 10–30 μm breda och upp till 250 μm långa.

Merrillit existerar endast i utkanterna av området inneslutet av plagioklas, metall eller troilit.

Kamaciten utanför området uppvisar stråk med NV-SO riktning samt en mängd stråk som är ungefär vinkelräta mot dessa (bilaga 3). Stråken är mellan en och tre mikrometer breda.

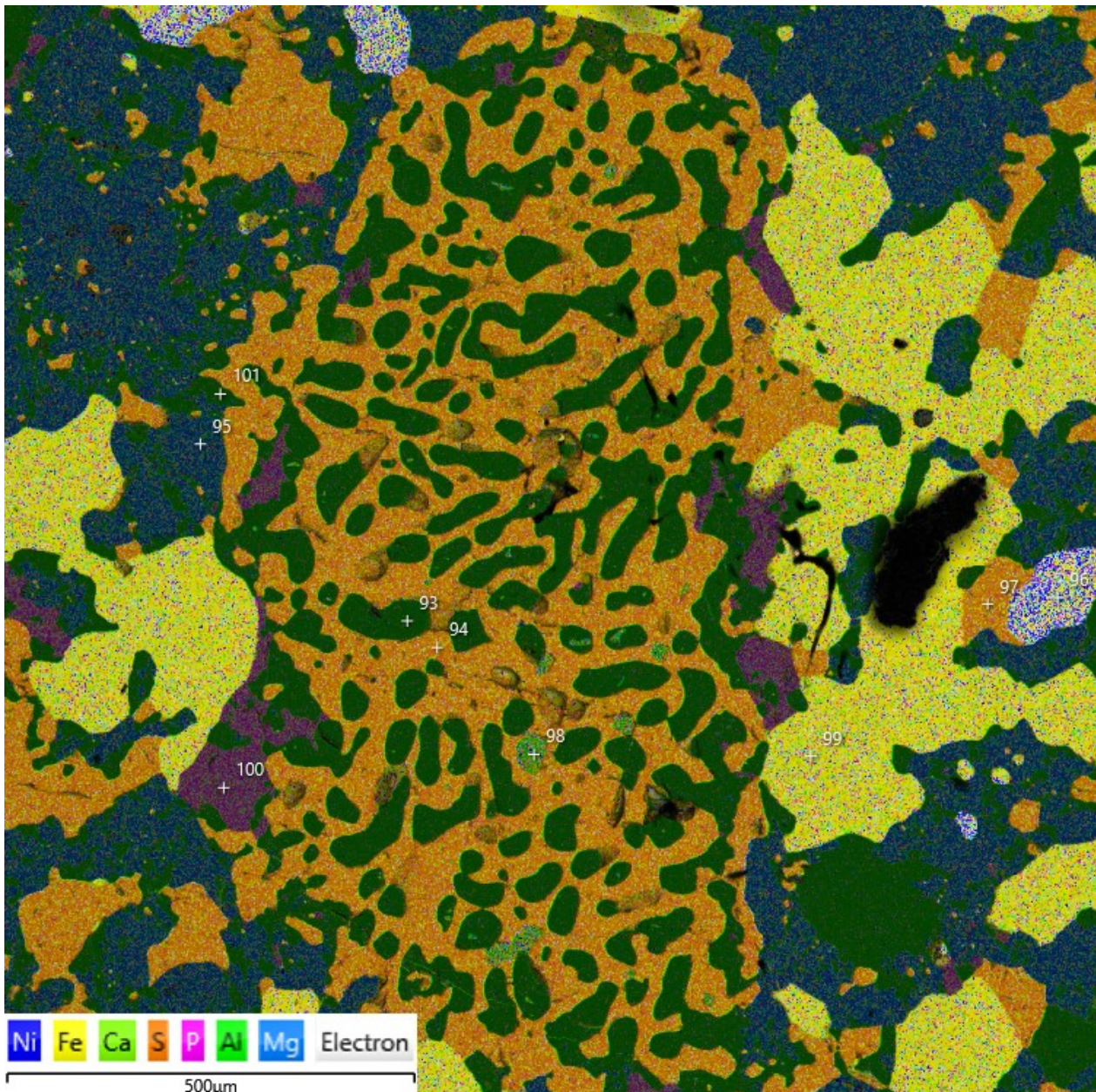


Fig. 31. EDS-bild av område 11: Smälttextur av troilit och plagioklas samt mindre mängder kromit. Smältan ser ut att ha varit icke-blandbar. Lägga märke till att ingen ortopyroxen existerar i texturen och till skillnad från resten av stoffen så är troiliten inte blandad med metall.

Blått: Ortopyroxen. Mörkgrönt: Plagioklas. Ljusgrönt: Kromit. Orange: Troilit. Lila: Merrillit. Gult: Kamacit. Blågult: Taenit. Svart och grått: Sprickor/kolflagor.

6 Diskussion

6.1 Litteraturstudie

6.1.1 Extern eller intern teori

Idag är den externa teorin den mer accepterade (Greenwood et al. 2015). Detta beror troligtvis på att de argument som Haack et al. (1996) och Scott et al. (2001) framförde mot den externa teorin senare har visat sig mindre starka. T.ex. så har senare modelleringar (Asphaug et al. 2006; Asphaug och Reufer 2014) visat att det antagligen var vanligt med kollisioner som barskrapade skorpa och mantel från differentierade himlakroppar. Därav ökar sannolikheten både för möjligheten att en projektil kunde ha varit helt av metall samt möjligheten för att den fortfarande var smält när den kolliderade med moderasteroiden.

Argumentet står dock kvar mot att metallprojektilen skulle ha bidragit med tillräckligt med värme för att orsaka de extrema förhållandena mellan sällsynta jordartsmetaller. Detta är däremot inget argument emot den externa teorin i sig. Enligt Greenwood et al. (2015), där Haack och Scott är delförfattare, inkluderar mesosideriternas bildningsprocesser både magmaoceaner och ett externt ursprung för metallen. De lade också fram argumentet att olivin borde förekomma oftare om moderasteroiden hade förstörts på det sättet som Scott et al. (2001) framförde. Olivinet borde antagligen också haft en annan sammansättning.

6.1.2 Kondritisk projektil

Bunch et al. (2014) kan ha löst problemet med en smält kärna genom att smälta upp en järnrik kondritisk asteroid vid kollision. Förutom detta ger deras föreslagna mekanism också metall-silikatblandningen ett större tidsfönster. Tidsfönstret är ett problem som Koike et al. (2017) poängterade; de argumenterade att blandningen borde ha skett inom tio miljoner år efter ackretion, men de flesta empiriska data pekar på mellan 20–170 miljoner år efter ackretion. Ett problem med kondritiskt ursprung verkar för mig vara sannolikheten för att asteroider från olika delar av solsystemet kolliderar, eftersom kondrit bildas på ett annat avstånd från solen än differentierade asteroider.

6.1.3 Magmaoceaner

Magmaoceanerna, som föreslås av flera olika författare (ex. Richter och Drake 1997), löser problemen med homogena $\Delta^{17}\text{O}$ -värden hos mesosideriterna (Greenwood et al. 2015) och är en mekanism för bildandet av de extrema förhållandena mellan sällsynta jordartsmetaller (Taylor via Scott et al. 2001), men problem kvarstår med denna teori. Vart ifrån kom värmen som bildade magmaoceanerna? Enligt Wasson (2013) så kan värmen inte ha kommit från vare sig radioaktivt sönderfall eller nedslagssmältor. Scott et al. (2001), å andra sidan, föreslog att om mesosideriternas moderasteroid varit större, eller om den hade ackreterat mer ^{26}Al , så hade den kunnat bli tillräckligt varm för att tillåta magmaoceaner.

Ett problem tycks, enligt mig, vara hur magmaoceanernas tidsfönster förhåller sig i jämförelse med tidsfönstret för metall-silikatblandningen. Blandningen

kan inte ha skett samtidigt som det fanns magmaoceaner på moderasteroiden eftersom mesosideriterna, speciellt de från grupp 1, uppvisar genomgående kataklastiska eller breccierade texturer. Om magmaoceanerna existerade tidigt i moderasteroidens historia så är frågan om detta är kompatibelt med den tidiga metall-silikatblandningen, mindre än tio miljoner år efter ackretion, som Koike et al. (2017) framförde. Om mekanismen för metall-silikatblandningen däremot var en järnrik kondritisk asteroid, som Bunch et al. (2014) presenterade, är tidsfönstret inget problem.

Slutligen så kanske inte magmaoceaner behövs för att förklara de homogena $\Delta^{17}\text{O}$ -värden. Enligt Wasson (2013) så kan de som sagt vara till följd av lokala magmakammare. Om man i detta argument inkluderar att meteoriter inte nödvändigtvis är representativt för medelsammansättningen för asteroidbältet eller ens för de asteroider de kommer från, kanske kommer alla mesosideriter från en och samma nedslagskrater, så kan det vara lokala förhållanden som skapat de homogena värden som syns.

6.2 SEM-analys

6.2.1 Metallstråk

Stråken i metallen som påträffas med liknande riktningar på flera ställen i stuffen är antingen slipspår efter polering med diamantpasta, eller neumannlinjer. Det är osannolikt att widmanstättenstrukturer skulle ha bildats med samma riktningar i isolerade metallnoder. Ytterligare argument emot att det är widmanstätten är att nodulerna är väldigt små, och borde därför ha stelnat för fort för att kunna utveckla några sådana strukturer. För att utesluta slipspår som orsaken så kan man polera provet igen och studera samma områden. Om stråken har bytt riktning så är det slipspår.

6.2.2 Matrix

Som tidigare forskare har påpekat (ex. Mittlefehldt et al. 1998) så är det svårt att utröna vad som egentligen är matrix. I vänstra sidan av figur 15 så syns en kantig pyroxenkristall, ungefär 500 μm i längd. Storleken liknar den för metallaggregaten och skulle kunna utgöra matrix. Mellan mineralkorn så existerar dock en finare matrix med kornstorlek runt 10 μm . Texturer och förhållanden mellan silikater och metall varierar stort över hela provet. Detta stämmer överens med litteraturen vilken beskriver mesosideriterna som heterogena blandningar av metall och silikater (ex. Powell 1971).

Kiseldioxiden i matrixet är antagligen tridymit. Enligt Powell (1971) ska kiseldioxid existera i denna formen i Vaca Muerta i 5,5 %.

6.2.3 Gabbroisk klast

Storleken på kristallerna, närvaron av lameller i pyroxen och nära 120-gradiga skärningar mellan kristaller indikerar bildning i magmakammare. Kristallerna är dock subhedrala till anhedrala, detta indikerar att klasten har värmts upp igen efter kristallisation. Troilit och metall har antagligen migrerat in i klasten mellan kornkontakterna, antingen vid introduktionen av smält metall, eller vid en senare uppvärmning.

6.2.4 Symplektisk kontakt mellan olivin och matrix

Avsaknaden av metall och tridymit, samt anrikningen av pyroxen, kromit och ilmenit i närheten av olivin stämmer överens med andra observationer av koronastrukturer (ex. Nehru et al. 1980). Den generella uppfattningen är att pyroxenmassan som omger olivinkornen bildades via interaktioner mellan olivin, tridymit och metall. Delaney et al. (1982) presenterade ett flertal reaktionsvägar där forsterit reagerar med tridymit, anortit och metall för att bilda spinell, pyroxen och merrillit. Krom och titan i kromit respektive ilmenit har antagligen migrerat från metall och olivin och bildat egna mer stabila faser. Detta förklarar också ämnenas avsaknad i metallen i matrix.

Som tidigare forskare har noterat (ex. Ruzicka et al. 1994) syns också flera tydliga zoner med olika mineraluppsättningar, storlekar och texturer. Dessa bildades vid högtemperaturmetamorfism, mellan 850 och 1100 grader Celsius, och efter brecciering (Ruzicka et al. 1994). Detta skedde troligtvis samtidigt som smält metall introducerades.

Till skillnad från grupp 3A mesosideriterna, Morristown och Emery, som Ruzicka et al. (1994) beskriver så är Vaca Muerta från grupp 1A. Ändå visar olivinklaster liknande grad av symplektisk metamorfism hos olivin som hos Morristown. Kanske kan detta bero på att Vaca Muerta innehåller mer tridymit än Morristown, 5,5 respektive 3,8 viktprocent (Powell 1971). Vanligt förekommande ilmenit är också något som skiljer sig mellan de koronor jag observerade och de Ruzicka et al. (1994) dokumenterade. De symplektiska strukturerna utgörs av ungefär hälften kromit och hälften ilmenit inbäddat i ortopyroxen. Troilit och plagioklas förekommer i större respektive mindre mängd.

6.2.5 Söndrigt område

Området omgärdas av en reaktionskorona med symplektiska former av kromit och ilmenit i ortopyroxen, precis som för olivinklaster. Inget olivin existerar dock inom området. Slutsatsen är att det en gång fanns olivin i området. Ruzicka et al. (1994) lade också märke till detta och presenterade två möjliga förklaringar: antingen så reagerade olivinet fullt ut via reaktioner, eller så är provet sågat så att endast kanten av koronan syns. Båda dessa hypoteser verkar rimliga då dessa områden oftast är små. De olivinfria områdena skulle också kunna vara områden där finkornig, granulär olivin en gång suttit. Powell (1971) beskrev klaster av sådan karaktär i Morristown. Om dessa intergranulära klaster har en dålig mekanisk hållfasthet så skulle det kunna förklara varför dessa områden nöts så enkelt av både stensåg och slippapper. Ruzicka et al. (1994) hittade pyroxen och kromit i dessa områden, men i mitt prov så observerade jag ingen kromit innanför koronan. Däremot observerade jag flera kristaller av troilit och små mängder metall innanför dessa koronastrukturer.

Powell (1971) angav ett antal kriterier för mesosideriterna för vilken grupp de skulle tillhöra. Bland kriterierna så skulle mesosideriterna i grupp 1, Vaca Muerta inkluderas, mest ha partiellt reagerade olivinklaster. Om det är så att skadade områden, som syns lite överallt i provet, är fullt reagerade och ersatta

olivinklaster så finns det många fler fullt reagerade olivinklaster än vad som tillåts i grupp 1.

6.2.6 Symplektiska inklusioner i olivin

Bland mesosideriterna så saknas studier av dessa inklusioner i olivin. Fokus ligger istället på koronastrukturer. Inklusionerna har däremot studerats i andra sorters meteoriter, exempelvis shergottiter (Ikeda 2005) – en sorts meteorit med marsianskt ursprung.

Till skillnad från de symplektiska strukturerna utanför olivinklaster så innehåller dessa runda former ingen observerbar ilmenit. Enligt Ikeda (2005), som studerade liknande inklusioner i olivin i shergottit, så indikerar texturerna att det kan vara avblandningsformer då olivin oxiderats till pyroxen och kromit.

Kromiten i inklusionerna i både klast ett och två har en lägre andel krom och mer aluminium, titan och järn än kromiter utanför olivinklaster (se bilaga 1).

6.2.7 Pyroxenklaster

Powell (1971) skrev att större pyroxenklaster visade något högre birefringens vid kanterna jämfört med kärnorna och att detta antagligen tydde på järnanrikning vid kanterna. Detta är något som jag kan bestryka med mina observationer. Bilaga 1, tillsammans med område 2 i bilaga 3, visar att EDS registrerade betydande skillnader i sammansättning hos en pyroxenkristall. Områden 4 och 10, i bilaga 3, visar skillnader i densitet, som syntes i BSE-bilder efter kontrastkorrigering, som vidare understryker en järnanrikning vid kanterna.

6.2.8 Blandning av troilit och fältspat

Strukturen påminner om två en icke-blandbara smältor som har stelnat tillsammans snabbt. Problemet med detta är att inga andra smälttexturer syns i provet, samt att Vaca Muerta är en grupp 1A mesosiderit och ska inte visa någon återsmältning. Om det är smält metall som har smält upp plagioklas och bildat denna textur, varför har då inte metallen smält upp andra plagioklaskristaller? Kanske kan det förklaras med att smält metall bäddade in fragmenterade plagioklaskristaller som smältes upp på grund av att mindre mängder finfördelade kristaller placerades i en stor mängd varm metall. Metall oxiderades efteråt till troilit. Mängden troilit är också ett mysterium. I resten av provet så existerar troilit tillsammans med metall; metallen är sällan helt ersatt av troilit. En alternativ förklaring är att smält järnsulfid blandades med plagioklas, som i sin tur smälte upp och stelnade tillsammans med troilit. Ett tredje alternativ är att plagioklasen kommer från projektilen, kanske som kondruler, och smälte upp tillsammans med metall/troilit vid nedslag

7 Slutsatser

I detta examensarbete så sammanfattades och diskuterades forskningsläget kring mesosideriterna. Som praktisk del så studerades en stuff från Vaca Muerta med hjälp av elektronmikroskop där intressanta områden valdes ut för vidare analys med BSE och EDS. Områdena beskrevs och diskuterades i förhållande till tidigare publikationer.

7.1 Litteraturstudie

Mesosideriternas bildningshistoria och ursprung är fortfarande ett mysterium, om än mindre så än för hundra år sedan när Prior (1918) först klassificerade dem. Idag finns flera möjliga teorier som förklarar deras födelse, men alla teorier lider av problem som måste lösas. Att mesosideriterna är några av de mest sällsynta och komplexa meteoriterna kan ligga till grund för att relativt få studier finns kring dem och att det, utifrån mina observationer, inte är svårt att hitta något som inte dokumenterats förut. I sin tur så kan detta vara anledningen till att vi fortfarande inte vet säkert hur de har bildats. Modern teknik har hjälpt till med modelleringar och nya, förbättrade dateringsmetoder. Många av framstegen har skett inom de senaste 30 åren, och även om nya teorier verkar lovande så syns än ingen ände.

7.2 SEM-analys

Till största delen så stämmer analyserade områden överens med tidigare beskrivningar av mesosideriter. Minst två områden, del 5.1.4.2 och 5.1.6, har texturer som inte verkar ha dokumenterats förut i mesosideriter. Ett vanligt förekommande område, del 5.1.5, är dåligt dokumenterat och förtjänar att studeras vidare på grund av dess koppling till grad av metamorfism och eventuellt större förekomst av olivin. Symplektiska texturer mellan plagioklas och pyroxen är en ytterligare del av mesosideriterna som skulle kunna studeras närmre. Slutligen så skulle det vara intressant om man kunde hitta bevis för eller emot teorin om en kondritisk projektil. Går det att hitta silikater i mesosideriterna med kondritiskt ursprung?

8 Tack

Jag vill tacka mina fantastiska handledare Carl Alwmark och Paula Lindgren. De har varit ett stort stöd och har kommit med många bra kommentarer, förslag och uppmuntrat mig till att fortsätta. Britta Smångs förtjänar också ett stort tack för uppmuntran, stöd och föreläsningar i Endnote och skrivande. Slutligen tackar jag Tomas Naeraa för hjälp med resultat.

9 Referenser

Asphaug, E., Agnor, C. B. & Williams, Q., 2006: Hit-and-run planetary collisions: *Nature* 439, 155.
Asphaug, E. & Reufer, A., 2014: Mercury and other iron-rich planetary bodies as relics of inefficient accretion: *Nature Geoscience* 7, 564.
Bajo, K. & Nagao, K., 2011: 81Kr-Kr age and mul-

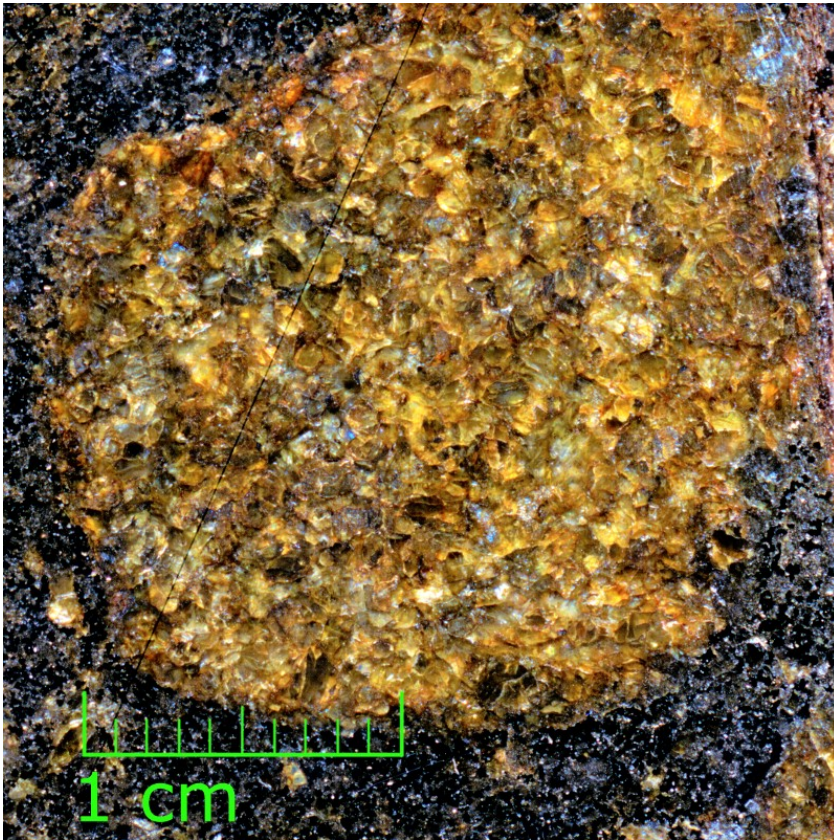
tiple cosmic-ray exposure history of the Vaca Muerta mesosiderite: *Meteoritics & Planetary Science* 46, 556-573. doi: 10.1111/j.1945-5100.2011.01174.x
Begemann, F., Weber, H. W., Vilcsek, E. & Hintenberger, H., 1976: Rare-gases and Cl-36 in stony-iron meteorites - cosmogenic elemental production-rates, exposure ages, diffusion losses and thermal histories: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 40, 353-368. doi: 10.1016/0016-7037(76)90213-1
Bischoff, A., 2001: Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts: *Planetary and Space Science* 49, 769-776. doi: 10.1016/s0032-0633(01)00026-5
Bogard, D. D. & Garrison, D. H., 1998: 39Ar-40Ar ages and thermal history of mesosiderites: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 62, 1459-1468.
Bogard, D. D., Garrison, D. H., Jordan, J. L. & Mittlefehldt, D., 1990: Ar-39-Ar-40 dating of mesosiderites - evidence for major parent body disruption less-than-4 Ga ago: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 54, 2549-2564. doi: 10.1016/0016-7037(90)90241-c
Bottke, W. F., Nesvorný, D., Grimm, R. E., Morbidelli, A. & O'brien, D. P., 2006: Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region: *Nature* 439, 821.
Brouxel, M. & Tatsumoto, M., 1990: U-Th-Pb systematics of the Estherville mesosiderite. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*. 309-319 s.
Brouxel, M. & Tatsumoto, M., 1991: The Estherville mesosiderite: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic study of a polymict breccia: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 55, 1121-1133.
Bunch, T. E., Irving, A. J., Schultz, P. H., Wittke, J. H., Kuehner, S. M., Goldstein, J. I. & Sipiery, P. P., 2014: Assessment of the mesosiderite-diogenite connection and an impact model for the genesis of mesosiderites. *45th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston.
Delaney, J. S., Nehru, C., Prinz, M. & Harlow, G., 1982: Metamorphism in mesosiderites. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*. 1315-1342 s.
Faure, G. & Mensing, T. M., 2007: *Introduction to Planetary Science: The Geological Perspective*. Springer Netherlands.
Ganguly, J., Yang, H. X. & Ghose, S., 1994: Thermal history of mesosiderites - quantitative constraints from compositional zoning and Fe-Mg ordering in orthopyroxenes: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 58, 2711-2723. doi: 10.1016/0016-7037(94)90139-2
Gladman, B. J., Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappala, V., Michel, P., Cellino, A., Froeschle, C., Levison, H. F., Bailey, M. & Duncan, M., 1997: Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances: *Science* 277, 197-201. doi: 10.1126/science.277.5323.197
Greenwood, R. C., Barrat, J. A., Scott, E. R. D., Haack, H., Buchanan, P. C., Franchi, I. A., Yamaguchi, A., Johnson, D., Bevan, A. W. R. & Burbine, T. H., 2015: Geochemistry and oxygen iso-

- tope composition of main-group pallasites and olivine-rich clasts in mesosiderites: Implications for the "Great Dunitite Shortage" and HED-mesosiderite connection: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 169, 115-136. doi: 10.1016/j.gca.2015.07.023
- Haack, H., Scott, E. R. D. & Rasmussen, K. L., 1996: Thermal and shock history of mesosiderites and their large parent asteroid: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 60, 2609-2619. doi: 10.1016/0016-7037(96)00110-x
- Haba, M. K., Yamaguchi, A., Kagi, H., Nagao, K. & Hidaka, H., 2017: Trace element composition and U-Pb age of zircons from Estherville: Constraints on the timing of the metal-silicate mixing event on the mesosiderite parent body: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 215, 76-91. doi: 10.1016/j.gca.2017.07.028
- Hassanzadeh, J., Rubin, A. E. & Wasson, J. T., 1990: Compositions of large metal nodules in mesosiderites - links to iron meteorite group-IIIAB and the origin of mesosiderite subgroups: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 54, 3197-3208. doi: 10.1016/0016-7037(90)90134-7
- Hewins, R. H., 1983: Impact versus internal origins for mesosiderites: *Journal of Geophysical Research* 88, B257-B266. doi: 10.1029/JB088iS01p0B257
- Hopfe, W. D. & Goldstein, J. I., 2001: The metallographic cooling rate method revised: Application to iron meteorites and mesosiderites: *Meteoritics & Planetary Science* 36, 135-154. doi: 10.1111/j.1945-5100.2001.tb01815.x
- Hutchison, R., 2007: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge University Press.
- Iizuka, T., Yamaguchi, T., Hibiya, Y. & Amelin, Y., 2015: Meteorite zircon constraints on the bulk Lu-Hf isotope composition and early differentiation of the Earth: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112, 5331-5336. doi: 10.1073/pnas.1501658112
- Ikeda, Y., 2005: Unusual inclusions within olivine megacrysts in the Dar al Gani 735 shergottite: *Antarctic meteorite research* 18, 202.
- Koike, M., Sugiura, N., Takahata, N., Ishida, A. & Sano, Y., 2017: U-Pb and Hf-W dating of young zircon in mesosiderite Asuka 882023: *Geophysical Research Letters* 44, 1251-1259. doi: 10.1002/2016gl071609
- Love, S. G. & Ahrens, T. J., 1996: Catastrophic impacts on gravity dominated asteroids: *Icarus* 124, 141-155.
- Mittlefehldt, D. W., Chou, C.-L. & Wasson, J. T., 1979: Mesosiderites and howardites: igneous formation and possible genetic relationships: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 43, 673-688.
- Mittlefehldt, D. W., McCoy, T. J., Goodrich, C. A. & Kracher, A. 1998: Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. I J. J. Papike (red.): *Planetary Materials*, D1-D195,
- Mittlefehldt, D. W., Rubin, A. E. & Davis, A. M., 1992: Mesosiderite clasts with the most extreme positive europium anomalies among solar-system rocks: *Science* 257, 1096-1099. doi: 10.1126/science.257.5073.1096
- NASA, 2017: Asteroids - In depth. Hämtad, från <https://solarsystem.nasa.gov/small-bodies/asteroids/in-depth/>
- NE, Nationalencyklopedin, u.å.: Meteor. Hämtad 2018-05-21, från <http://www.ne.se/ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/meteor>
- Nehru, C. E., Zucker, S. M., Harlow, G. E. & Prinz, M., 1980: Olivines and olivine coronas in mesosiderites: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 44, 1103-&. doi: 10.1016/0016-7037(80)90065-4
- Patterson, C., 1956: Age of meteorites and the earth: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 10, 230-237. doi: 10.1016/0016-7037(56)90036-9
- Pedersen, H., Debon, C. C. & Lindgren, H., 1992: Vaca Muerta mesosiderite strewnfield: *Meteoritics* 27, 126-135. doi: 10.1111/j.1945-5100.1992.tb00739.x
- Pfalzner, S., Davies, M.B., Gounelle, M., Johansen, A., Munker, C., Lacerda, P., Zwart, S.P., Testi, L., Trierloff, M. & Veras, D., 2015: The formation of the solar system: *Physica Scripta* 90. doi: 10.1088/0031-8949/90/6/068001
- Powell, B. N., 1971: Petrology and chemistry of mesosiderites .2. Silicate textures and compositions and metal-silicate relationships: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 35, 5-34.
- Prior, G. T., 1918: On the Mesosiderite-Grahamite Group of Meteorites: With Analyses of Vaca Muerta, Hainholz, Simondium, and Powder Mill Creek: *Mineralogical Magazine* 18, 151-172.
- Reed, S. J. B., 2005: *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press.
- Righter, K. & Drake, M. J., 1997: A magma ocean on Vesta: Core formation and petrogenesis of eucrites and diogenites: *Meteoritics & Planetary Science* 32, 929-944. doi: 10.1111/j.1945-5100.1997.tb01582.x
- Rosing, M. T. & Haack, H., 2004: The first mesosiderite-like clast in a howardite. *35th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston.
- Rubin, A. E. & Grossman, J. N., 2010: Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions: *Meteoritics & Planetary Science* 45, 114-122. doi: 10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x
- Rubin, A. E. & Jerde, E. A., 1987: Diverse eucritic pebbles in the vaca Muerta mesosiderite: *Earth and Planetary Science Letters* 84, 1-14. doi: 10.1016/0012-821x(87)90170-1
- Rubin, A. E. & Mittlefehldt, D. W., 1993: Evolutionary history of the mesosiderite asteroid - a chronological and petrologic synthesis: *Icarus* 101, 201-212. doi: 10.1006/icar.1993.1018
- Ruzicka, A., Boynton, W. V. & Ganguly, J., 1994: Olivine coronas, metamorphism, and the thermal history of the Morristown and Emery mesosiderites: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 58, 2725-2741. doi: 10.1016/0016-7037(94)90140-6
- Ruzicka, A., Snyder, G. A. & Taylor, L. A., 1997: Vesta as the howardite, eucrite and diogenite parent body: Implications for the size of a core and for large-scale differentiation: *Meteoritics & Planetary Science* 32, 825-840. doi: 10.1111/j.1945-5100.1997.tb01573.x
- Schwandt, C. S., Cygan, R. T. & Westrich, H. R., 1998: Magnesium self-diffusion in orthoenstatite:

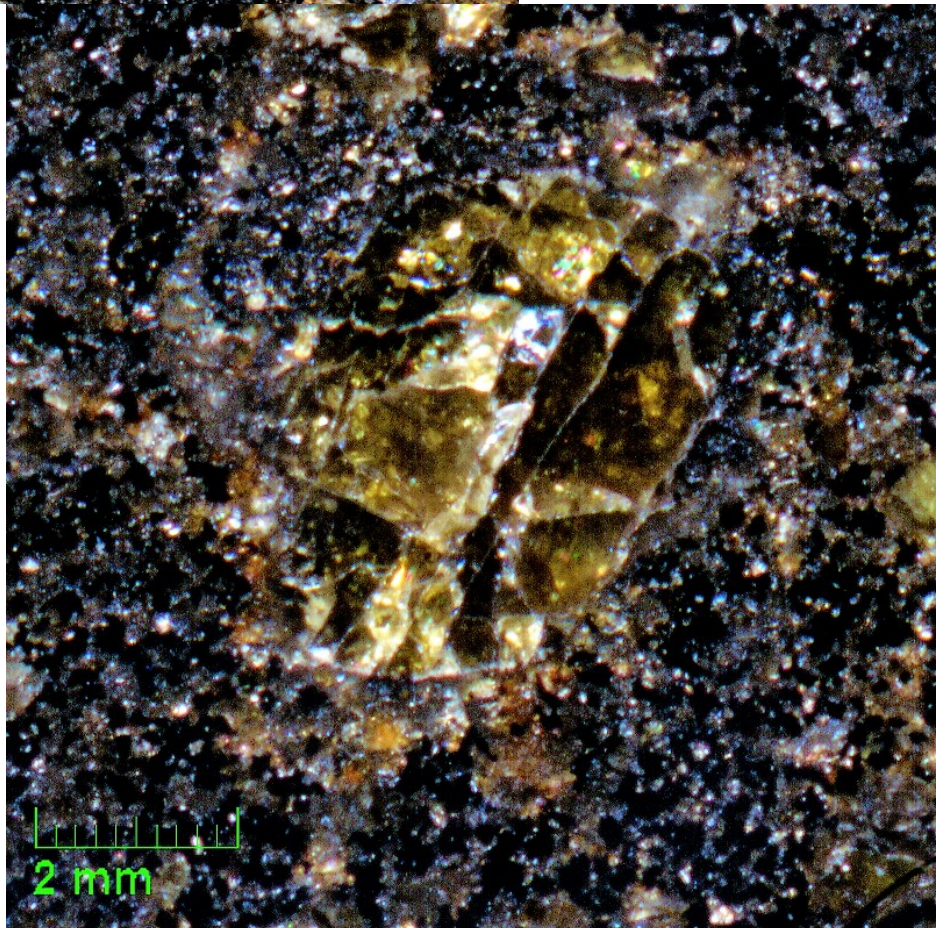
- Contributions to Mineralogy and Petrology* 130, 390-396. doi: 10.1007/s004100050373
- Scott, E. R. D., Haack, H. & Love, S. G., 2001: Formation of mesosiderites by fragmentation and re-accretion of a large differentiated asteroid: *Meteoritics & Planetary Science* 36, 869-881. doi: 10.1111/j.1945-5100.2001.tb01927.x
- Shen, J. J., Papanastassiou, D. A. & Wasserburg, G. J., 1998: Re-Os systematics in pallasite and mesosiderite metal: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 62, 2715-2723. doi: 10.1016/s0016-7037(98)00187-2
- Stewart, B. W., Papanastassiou, D. & Wasserburg, G., 1994: Sm-Nd chronology and petrogenesis of mesosiderites: *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 58, 3487-3509.
- Tedesco, E. F. & Desert, F. X., 2002: The Infrared Space Observatory deep asteroid search: *Astronomical Journal* 123, 2070-2082. doi: 10.1086/339482
- Wasson, J. T., 1992: The rediscovery of the Vaca Muerta strewnfield: *Meteoritics & Planetary Science* 27, 125-125.
- Wasson, J. T., 2013: No magma ocean on Vesta (or elsewhere in the asteroid belt): Volatile loss from HEDs. *44th Lunar and Planetary Science Conference*. Abstract.
- Wasson, J. T. & Rubin, A. E., 1985: Formation of mesosiderites by low-velocity impacts as a natural consequence of planet formation: *Nature* 318, 168.
- Wisdom, J., 1985: Meteorites may follow a chaotic route to Earth: *Nature* 315, 731.

Område	Spektrum	Mineral	Vikt%																		Total	Mg#	Fe/Mn	
			O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni								
6	63	Kromit	30,83		1,06	4,96														103,42				
	64	Ilmenit	35,07		1,2		0,08														106,98			
	65	Ilmenit	35,16		1,3		0,08														107,04			
	66	Troilit					0,31				37,23										101,31			
	67	Pyroxen	45,84		15,53	0,36	26,65					0,65	0,24			0,47	0,7	16,75			107,19	68	24	
	68	Olivin	38,25		19,68		18,21											0,76	27,76			104,67	62	36
	69	Ilmenit	32,48		1,38													1,59	35,5			104,77		
7	70	Kromit	30,58		1,25	5,02															105,48			
	71	Merrillit	43,51		0,67					22,09												106,15		
	72	Troilit	1,29																			107,19		
	73	Pyroxen	44,5		16,17	0,31	27,1															105,71	70	23
	74	Rutil	43,79																			110,18		
	75	Fältspat	47,96		0,57																	107,02		
	76	Taenit	3,99																			110,11		
	77	Fältspat	49,15		0,46																	109,16		
	78	Kamacit																				103,94		
	79	Taenit																				106,83		
8	80	Kromit	28,36		1,13	5,48	0,69														100,77			
	81	Pyroxen	43,3		16		26,96															104,46	69	21
	82	Olivin	38,57		19,75		18,22															104,64	62	37
	83	Kromit	32,14		1,13	6,07	0,12															105,94		
	84	Pyroxen	44,82		10,66		26,97															106,83	80	
	85	Kamacit																				104,6		
	86	Kromit	30,59		1,11	7,55																103,87		
	87	Pyroxen	43,78		16,6		27,33															105,17	71	26
	88	Merrillit	41,03		0,49																	103,68		
	10	89	Pyroxen	39,49		15,7	0,78	24,62															100,72	71
90		Pyroxen	41,54		16,55	0,61	26,74															101,77	73	30
91		Fältspat	47,25		0,83																	106,86		
92		Pyroxen	35,26		12,64	0,37	22,7															87,42	67	25
93		Fältspat	46,45		0,64																	104,41		
11	94	Troilit																				104,82		
	95	Pyroxen	44,1		15,38		27,12															105,98	67	23
	96	Taenit																				97,63		
	97	Troilit																				98,86		
	98	Kromit	28,33		0,66	5,28																101,2		
	99	Kamacit																				100,15		
	100	Merrillit	40,66		0,7																	101,5		
	101	Fältspat	47,38		1,08																	106,08		

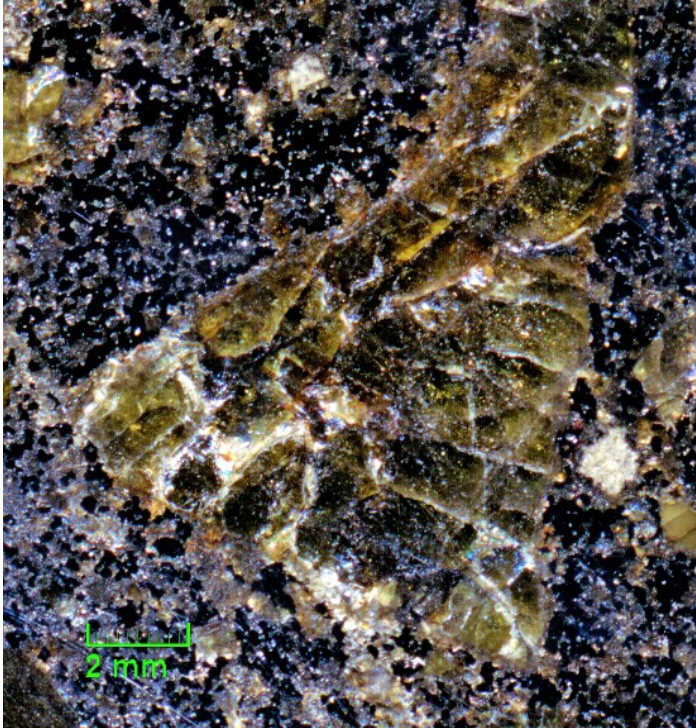
Bilaga 2. Områden i reflekterat ljus.



Område 3. Översiktlig bild av gabbroisk klast i reflekterat ljus.
Det svarta diagonala strecket är en digital artefakt från scannern.

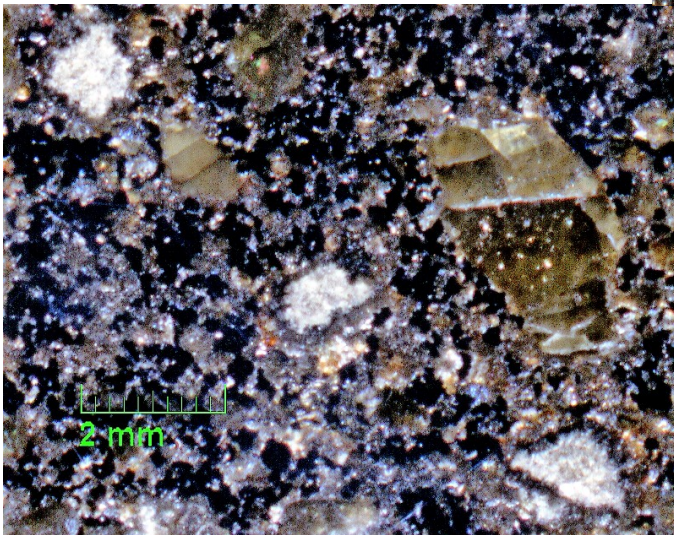


Område 9. Översiktlig bild av olivinklast 1 i reflekterat ljus.



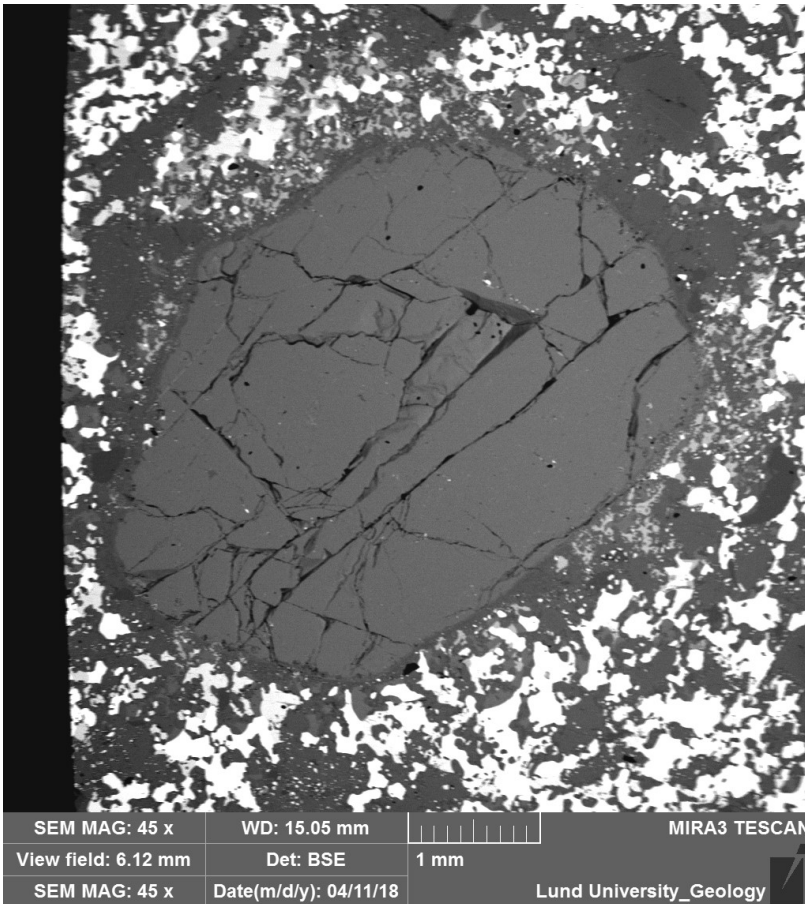
Område 2. Översiktlig bild av pyroxenklast 1 i reflekterat ljus.

Område 4 & 10. Översiktlig bild av pyroxenklast 2 och 3 i reflekterat ljus.
Det svarta diagonala strecket är en digital artefakt från scannern.

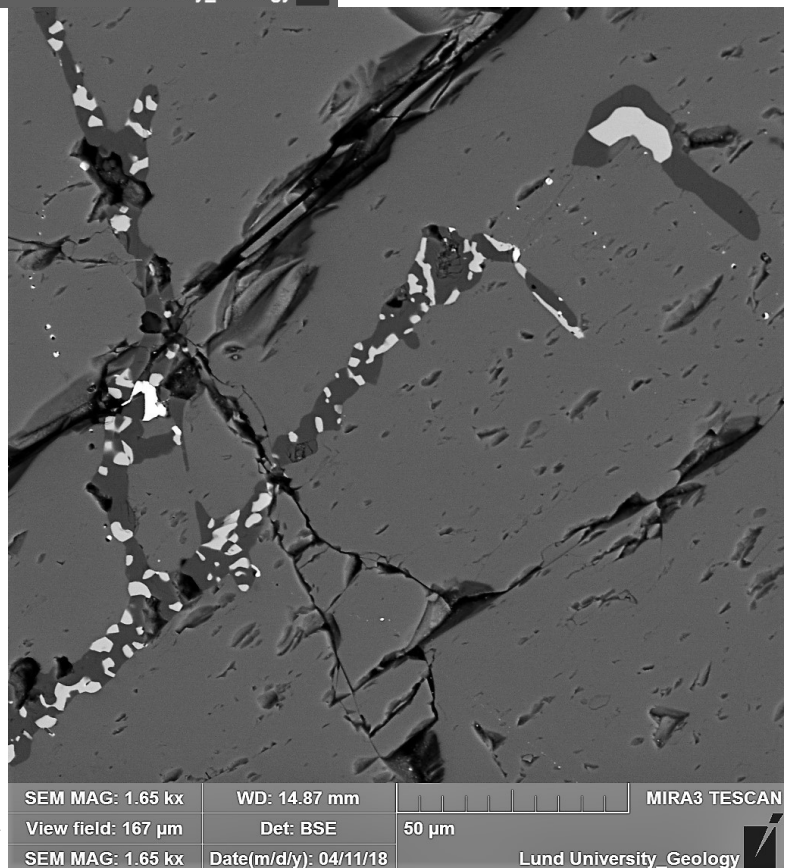


Område 5 & 6. Översiktlig bild av söndriga områden i reflekterat ljus.

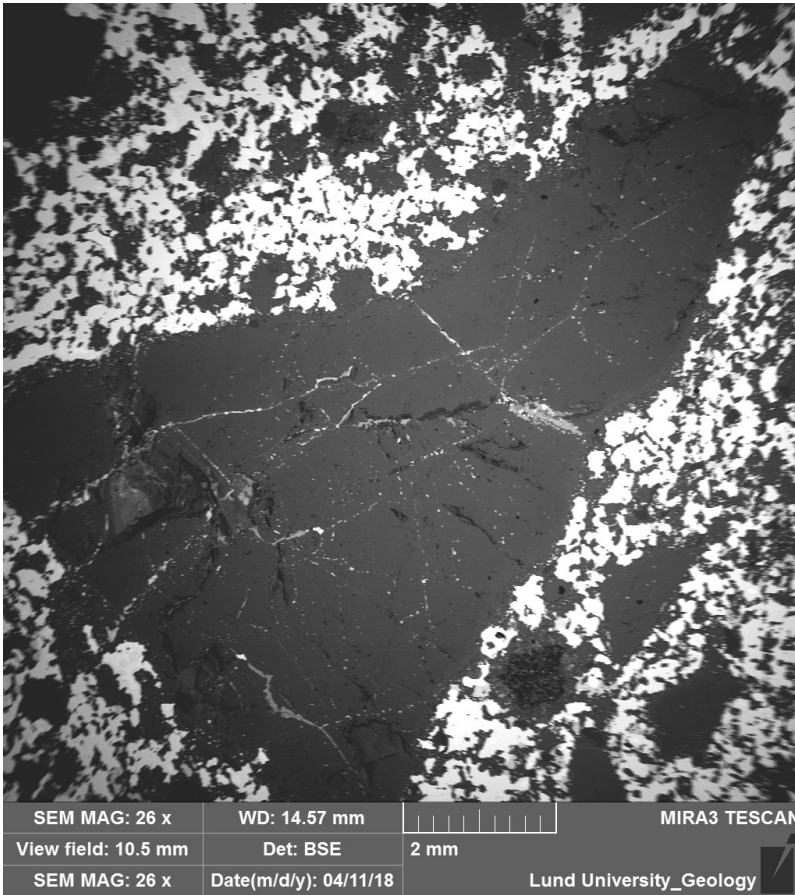
Bilaga 3. BSE-bilder av områden.



Område 9. Översiktlig BSE-bild av olivinklast 1.

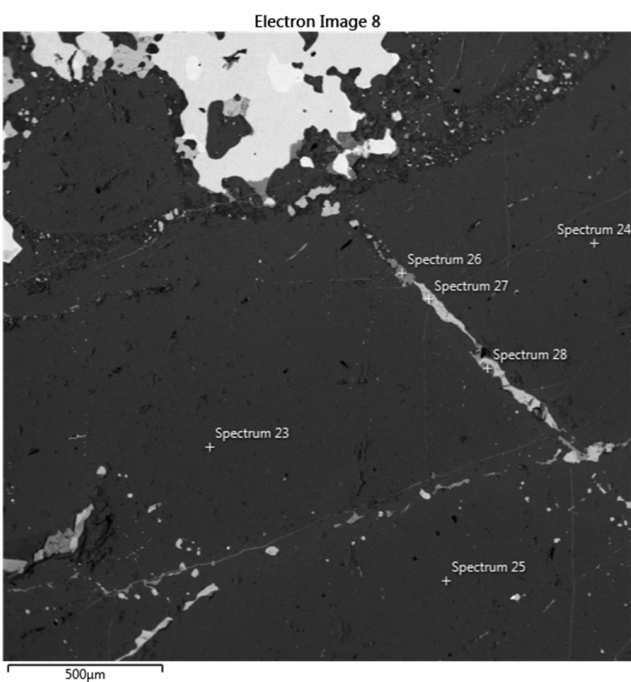


Område 9. BSE-bild av ådror med symplektiska former i olivinklast 1.

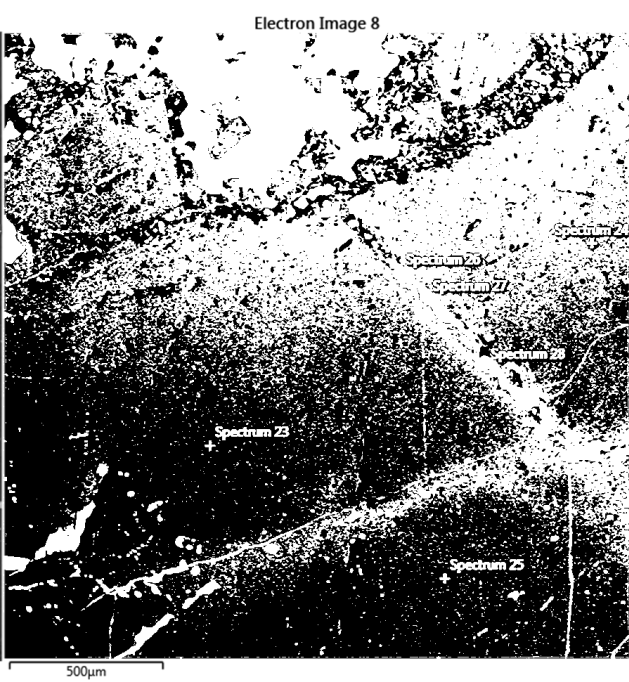


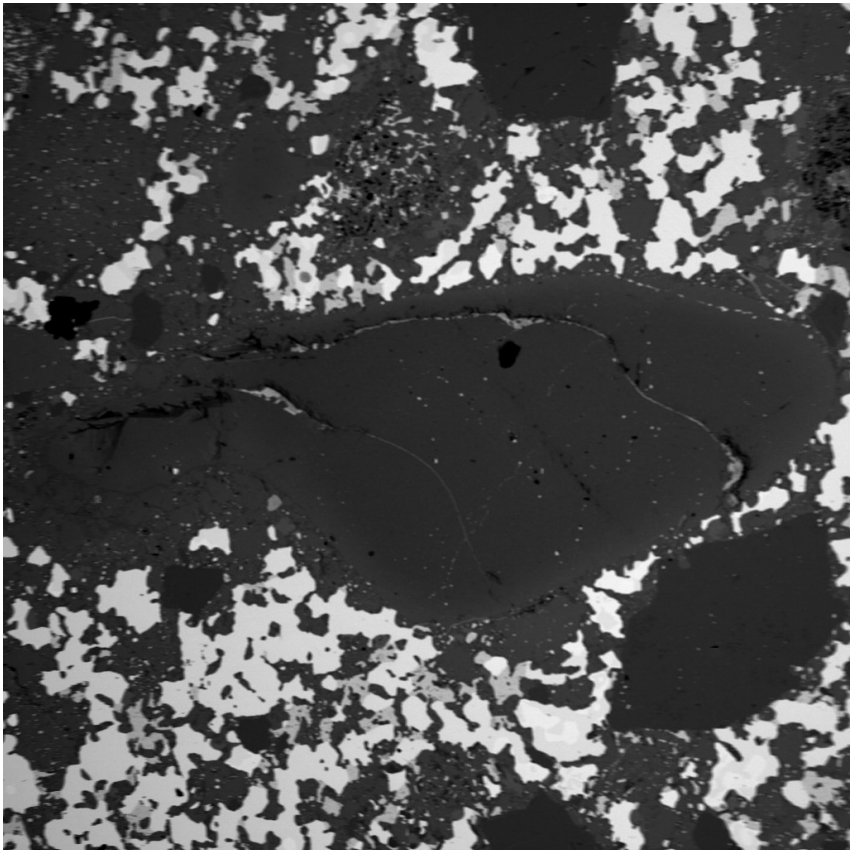
Område 2. Översiktlig BSE-bild av pyroxenklast 1.

Område 2. BSE-bild av pyroxenklast 1.



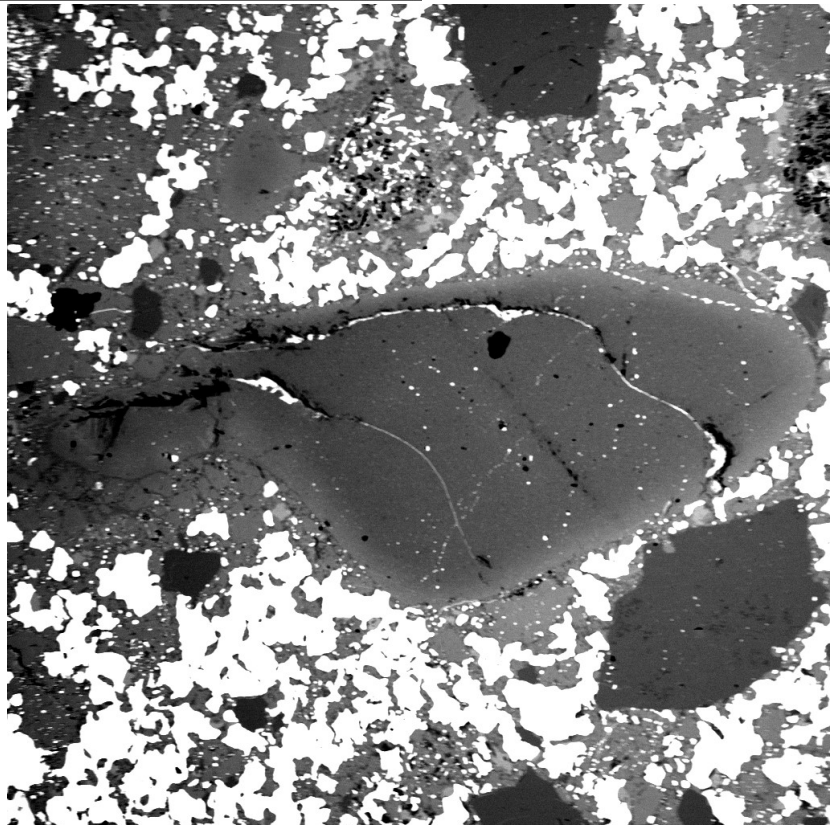
Område 2. BSE-bild av pyroxenklast 1. Kontrastkorrigerad för att se zoner





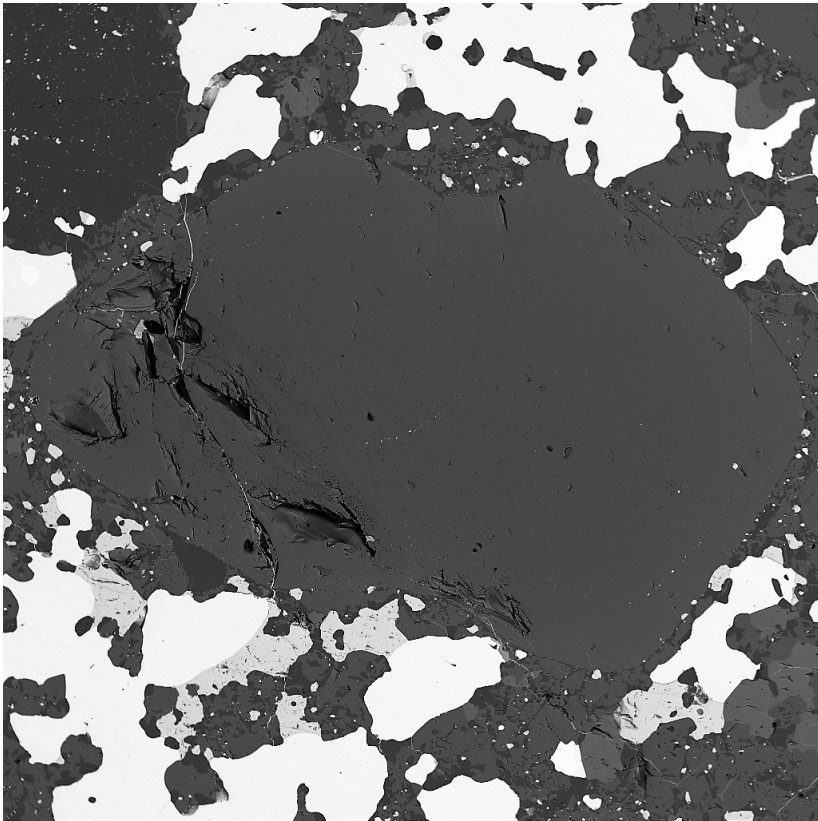
Område 4. Översiktlig BSE-bild av pyroxenklast 2.

SEM MAG: 55 x	WD: 15.00 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 5.07 mm	Det: BSE	1 mm	
SEM MAG: 55 x	Date(m/d/y): 04/11/18	Lund University_Geology	



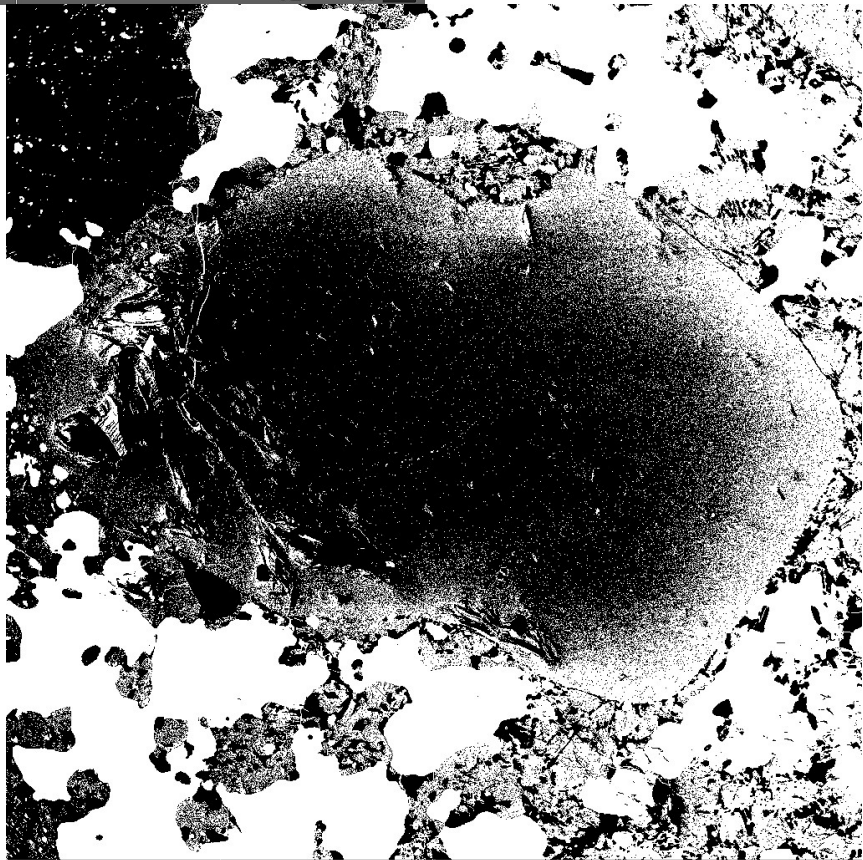
Område 4. Översiktlig BSE-bild av pyroxenklast 2. Kontrastkorrigerad för att se zonering.

SEM MAG: 55 x	WD: 15.00 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 5.07 mm	Det: BSE	1 mm	
SEM MAG: 55 x	Date(m/d/y): 04/11/18	Lund University_Geology	



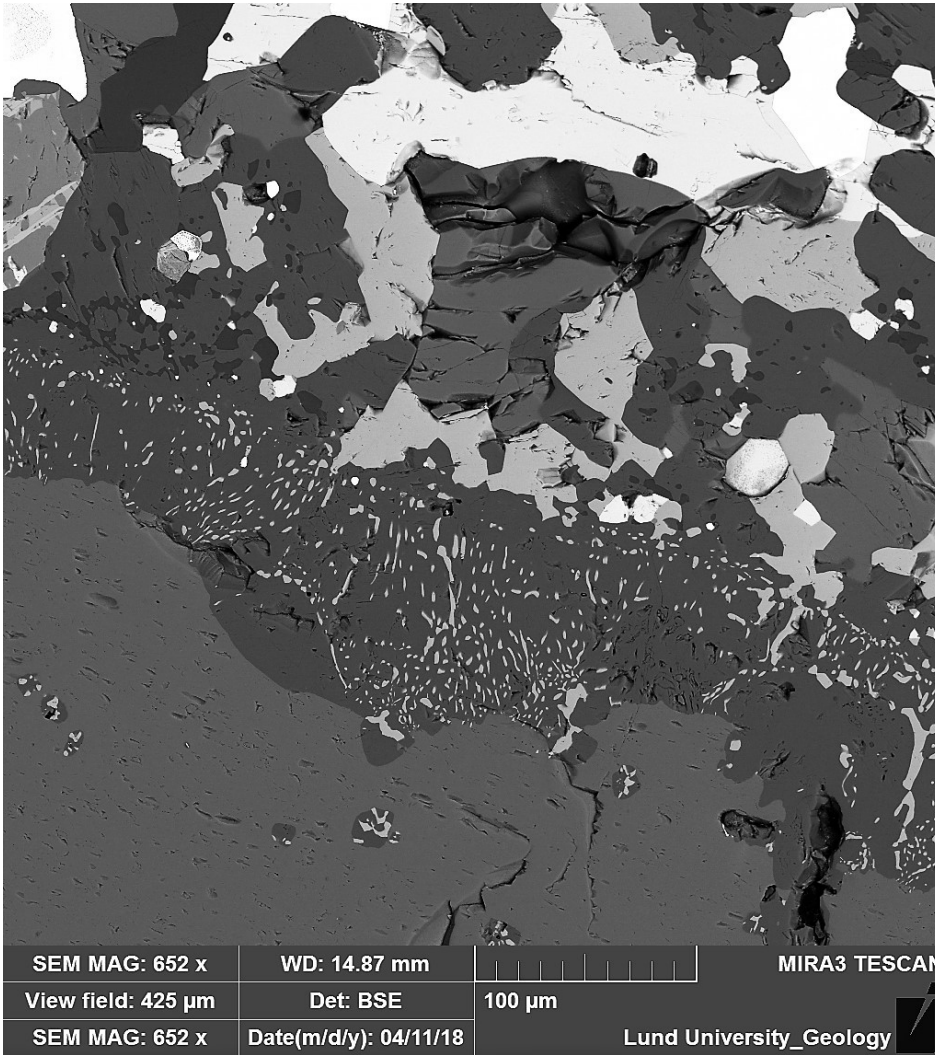
Område 10. BSE-bild av pyroxenklast 3.

SEM MAG: 198 x	WD: 14.15 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 1.40 mm	Det: BSE	200 µm	
SEM MAG: 198 x	Date(m/d/y): 04/11/18	Lund University_Geology	

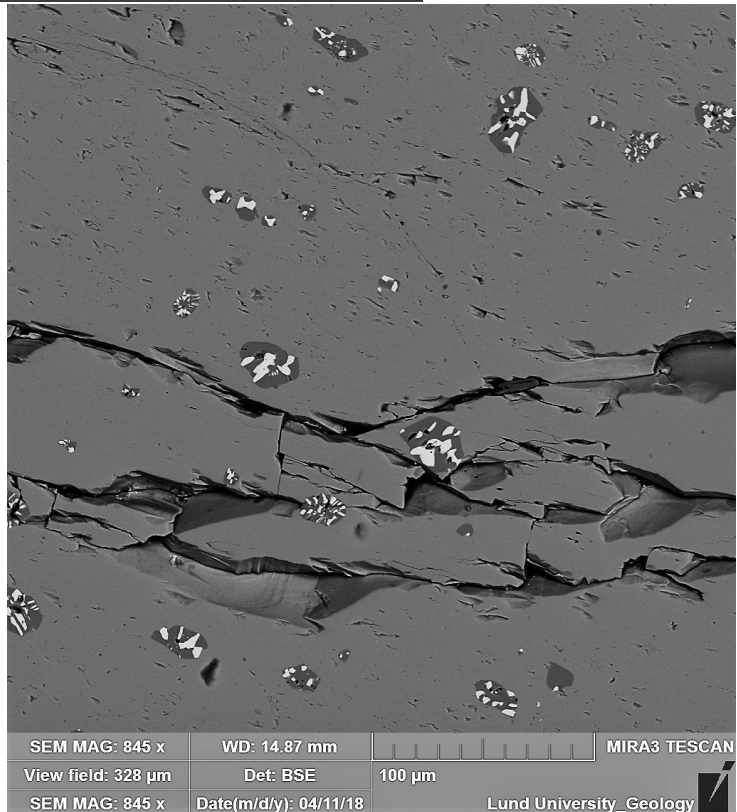


Område 10. BSE-bild av pyroxenklast 3. Kontrastkorrigerad för att se zonering.

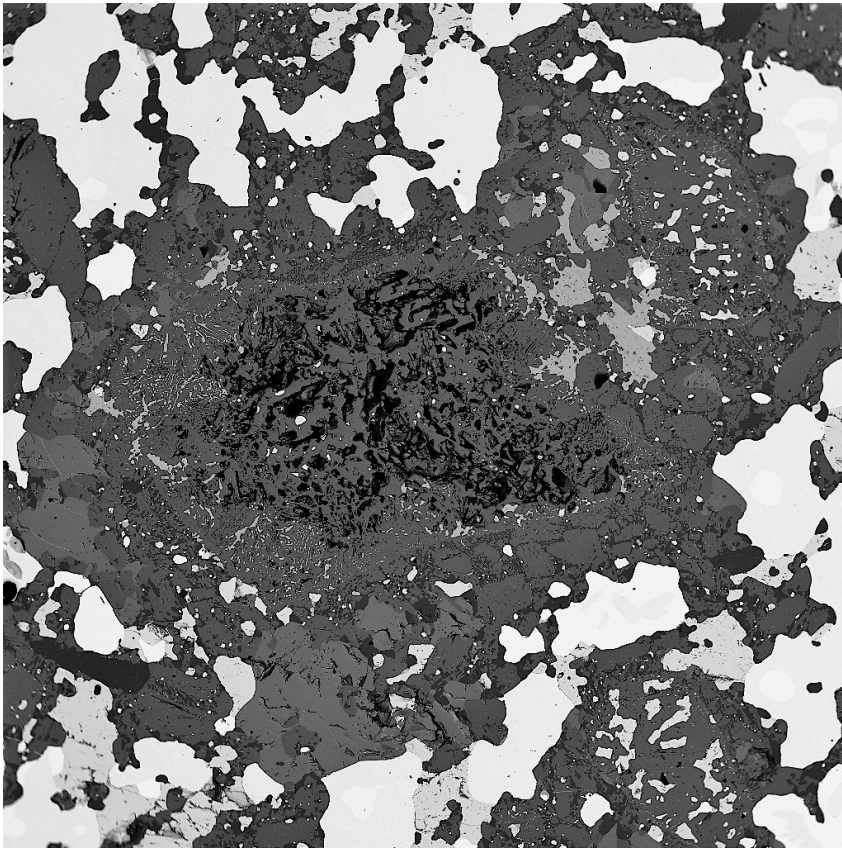
SEM MAG: 198 x	WD: 14.15 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 1.40 mm	Det: BSE	200 µm	
SEM MAG: 198 x	Date(m/d/y): 04/11/18	Lund University_Geology	



Område 7. BSE-bild av reaktionskorona.

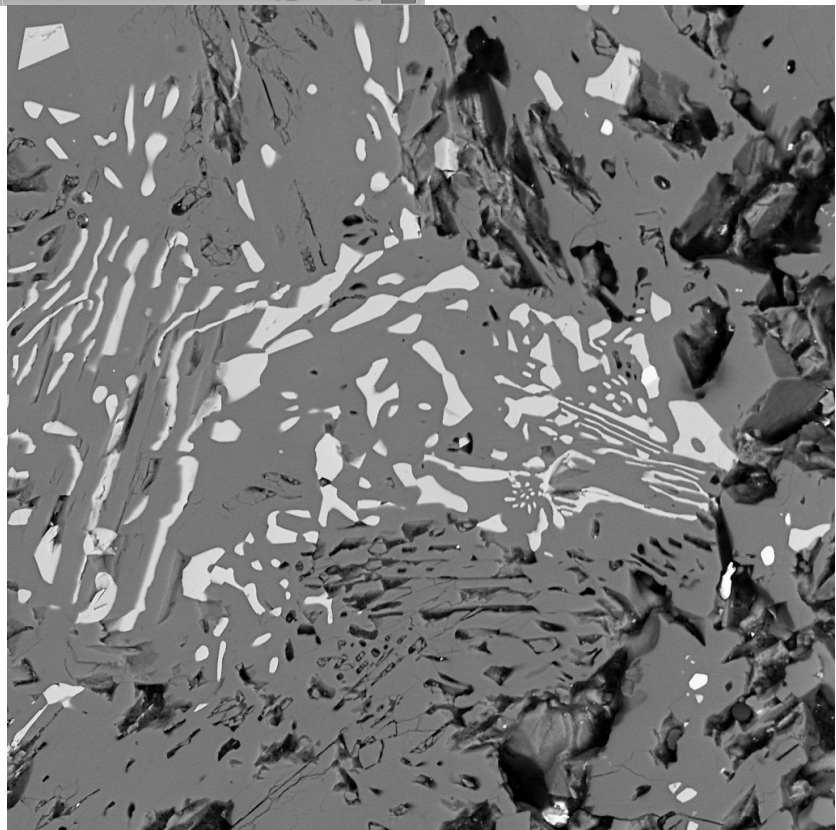


Område 8. BSE-bild av symplektiska inklusioner i olivinklast 2.



Område 5. BSE-bild av söndrigt område.

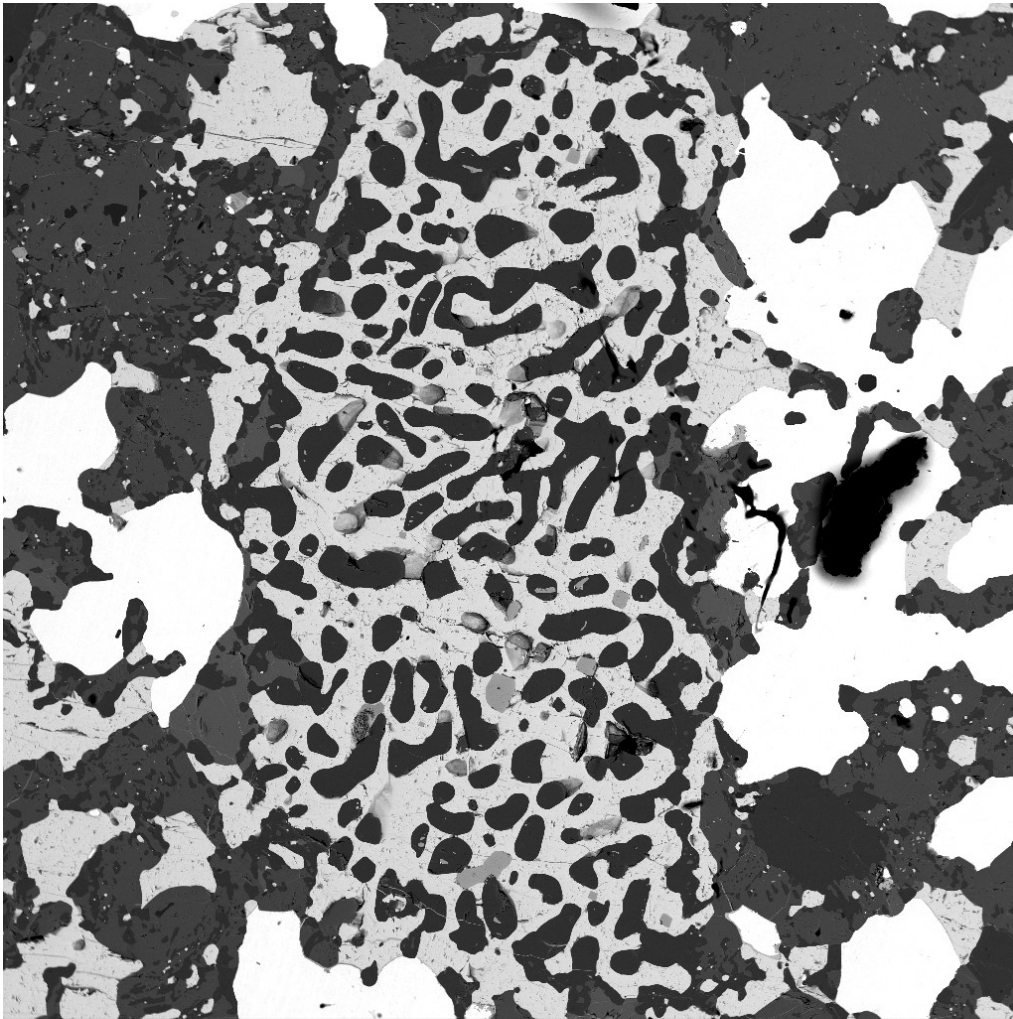
SEM MAG: 136 x	WD: 15.65 mm	MIRA3 TESCAN
View field: 2.03 mm	Det: BSE	500 µm
SEM MAG: 136 x	Date(m/d/y): 04/11/18	Lund University_Geology



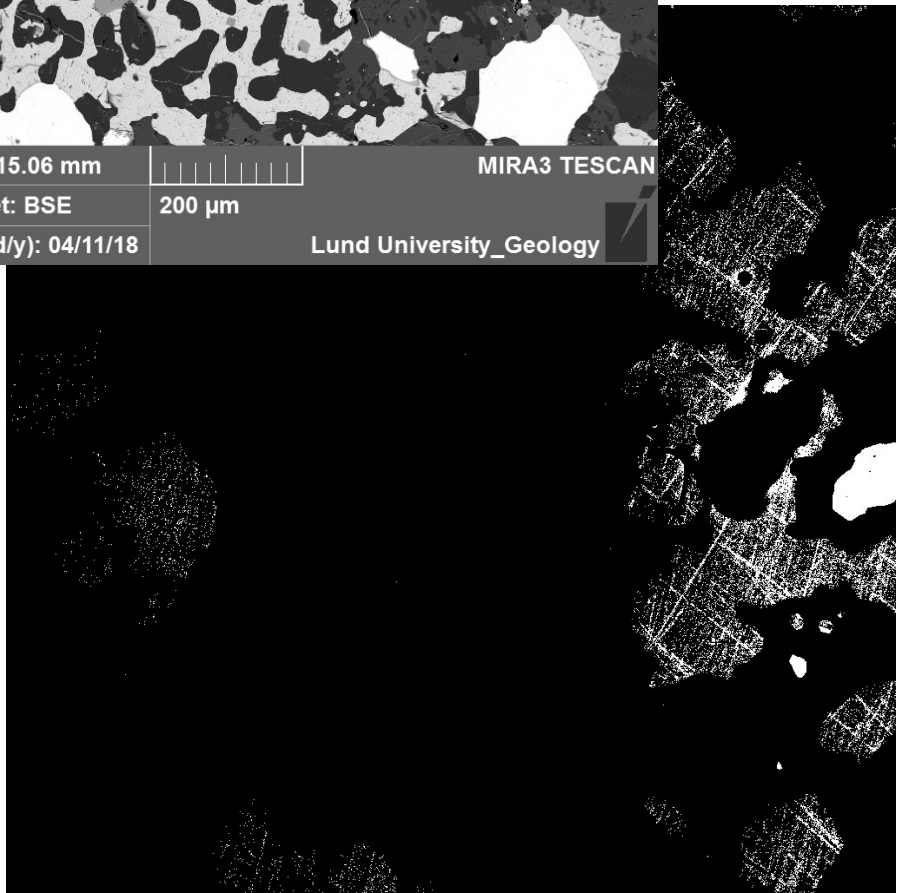
Område 6. BSE-bild av närmare inspektion av område 5.

SEM MAG: 1.53 kx	WD: 15.59 mm	MIRA3 TESCAN
View field: 181 µm	Det: BSE	50 µm
SEM MAG: 1.53 kx	Date(m/d/y): 04/11/18	Lund University_Geology

Område 11. BSE-bild av smälttextur.

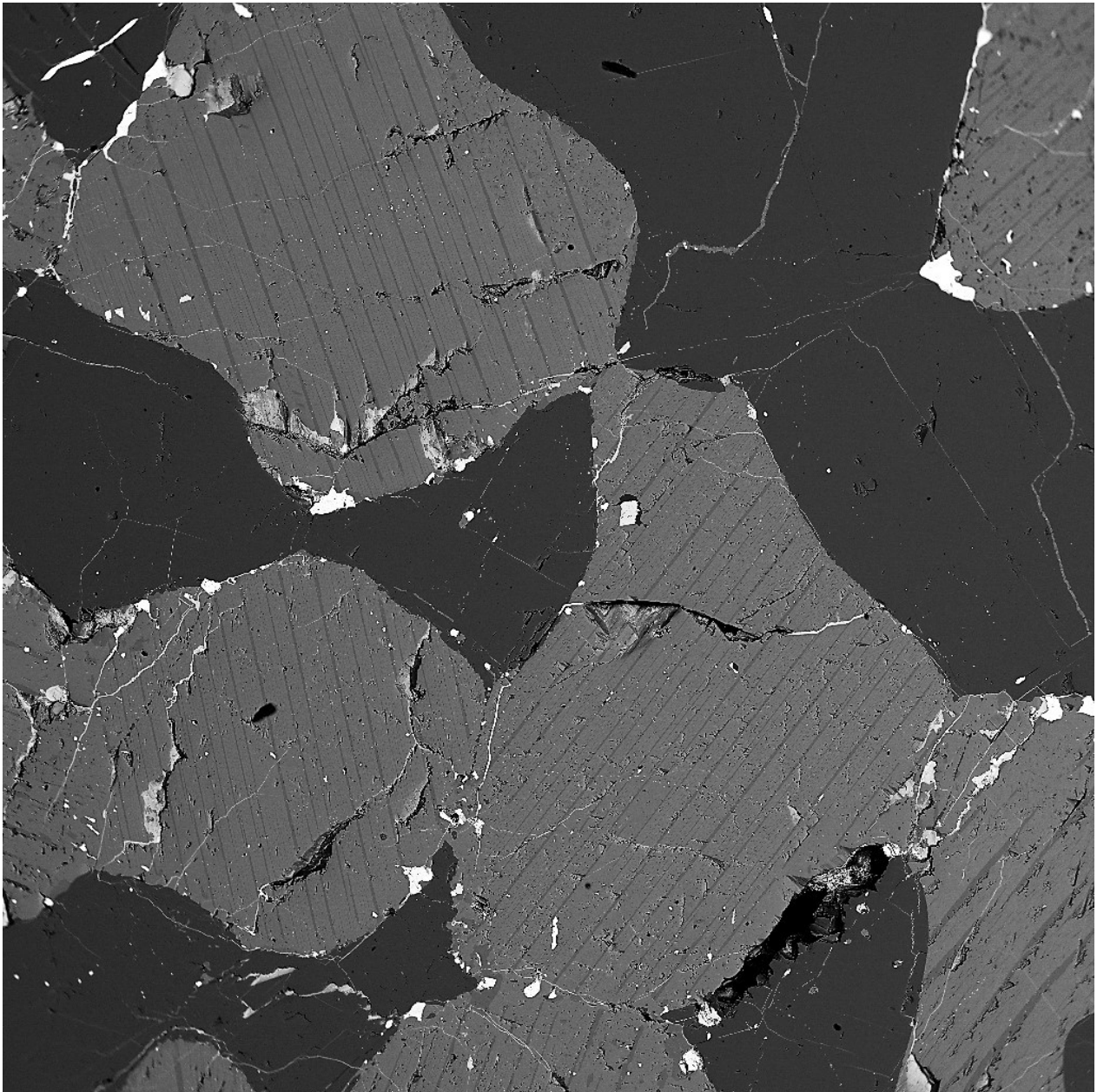


SEM MAG: 206 x	WD: 15.06 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 1.34 mm	Det: BSE	200 µm	
SEM MAG: 206 x	Date(m/d/y): 04/11/18		Lund University_Geology



Område 11. BSE-bild av smälttextur. Kontrastkorrigerad för att se lineationer i kamacit.

SEM MAG: 206 x	WD: 15.06 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 1.34 mm	Det: BSE	200 µm	
SEM MAG: 206 x	Date(m/d/y): 04/11/18		Lund University_Geology



SEM MAG: 145 x	WD: 14.04 mm		MIRA3 TESCAN
View field: 1.90 mm	Det: BSE	500 µm	
SEM MAG: 145 x	Date(m/d/y): 04/11/18		Lund University_Geology

Område 3. BSE-bild av gabbroisk klast.

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

477. Rydberg, Elaine, 2016: Gummigranulat - En litteraturstudie över miljö- och hälsopåverkan vid användandet av gummigranulat. (15 hp)
478. Björnfors, Mark, 2016: Kusterosion och äldre kustdyners morfologi i Skälderviken. (15 hp)
479. Ringholm, Martin, 2016: Klimatutlöst matbrist i tidiga medeltida Europa, en jämförande studie mellan historiska dokument och paleoklimatarkiv. (15 hp)
480. Teilmann, Kim, 2016: Paleomagnetic dating of a mysterious lake record from the Kerguelen archipelago by matching to paleomagnetic field models. (15 hp)
481. Schönström, Jonas, 2016: Resistivitets- och markradarmätning i Ängelholmsområdet - undersökning av korrosiva markstrukturer kring vattenledningar. (15 hp)
482. Martell, Josefin, 2016: A study of shock-metamorphic features in zircon from the Siljan impact structure, Sweden. (15 hp)
483. Rosvall, Markus, 2016: Spår av himlakroppskollisioner - bergarter i nedlagsskratrar med fokus på Mien, Småland. (15 hp)
484. Olausson, My, 2016: Resistivitets- och IP-mätningar på den nedlagda deponin Gustavsfält i Halmstad. (30 hp)
485. Plan, Anders, 2016: Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsförhöjande markegenskaper kring fjärrvärmeledningar i Ängelholm. (15 hp)
486. Jennerheim, Jessica, 2016: Evaluation of methods to characterise the geochemistry of limestone and its fracturing in connection to heating. (45 hp)
487. Olsson, Pontus, 2016: Ekologiskt vatten från Lilla Klåveröd: en riskinventering för skydd av grundvatten. (15 hp)
488. Henriksson, Oskar, 2016: The Dynamics of Beryllium 10 transport and deposition in lake sediments. (15 hp)
489. Brådenmark, Niklas, 2016: Lower to Middle Ordovician carbonate sedimentology and stratigraphy of the Pakri peninsula, north-western Estonia. (45 hp)
490. Karlsson, Michelle, 2016: Utvärdering av metoderna DCIP och CSIA för identifiering av nedbrytningszoner för klorerade lösningsmedel: En studie av Färgaren 3 i Kristianstad. (45 hp)
491. Elali, Mohammed, 2016: Flygsanddyners inre uppbyggnad – georadarundersökning. (15 hp)
492. Preis-Bergdahl, Daniel, 2016: Evaluation of DC Resistivity and Time-Domain IP Tomography for Bedrock Characterisation at Önnelöv, Southern Sweden. (45 hp)
493. Kristensson, Johan, 2016: Formation evaluation of the Jurassic Stø and Nordmela formations in exploration well 7220/8-1, Barents Sea, Norway. (45 hp)
494. Larsson, Måns, 2016: TEM investigation on Challapampa aquifer, Oruro Bolivia. (45 hp)
495. Nylén, Fredrik, 2017: Utvärdering av borrhålskartering avseende kalksten för industriella ändamål, File Hajdarbrottet, Slite, Gotland. (45 hp)
496. Mårdh, Joakim, 2017: A geophysical survey (TEM; ERT) of the Punata alluvial fan, Bolivia. (45 hp)
497. Skoglund, Wiktor, 2017: Provenansstudie av detritala zirkoner från ett guldförande alluvium vid Ravlunda skjutfält, Skåne. (15 hp)
498. Bergcrantz, Jacob, 2017: Ett fönster till Kattegatts förflutna genom analys av bottenlevande foraminiferer. (15 hp)
499. O'Hare, Paschal, 2017: Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2610 BP. (45 hp)
500. Goodship, Alastair, 2017: Dynamics of a retreating ice sheet: A LiDAR study in Värmland, SW Sweden. (45 hp)
501. Lindvall, Alma, 2017: Hur snabbt påverkas och nollställs luminescenssignaler under naturliga ljusförhållanden? (15 hp)
502. Sköld, Carl, 2017: Analys av stabila isotoper med beräkning av blandningsförhållande i ett grundvattenmagasin i Älvkarleby-Skutskär. (15 hp)
503. Sällström, Oskar, 2017: Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland. (15 hp)
504. Ahrenstedt, Viktor, 2017: Depositional history of the Neoproterozoic Visingsö Group, south-central Sweden. (15 hp)
505. Schou, Dagmar Juul, 2017: Geometry and faulting history of the Long Spur fault zone, Castle Hill Basin, New Zealand. (15 hp)
506. Andersson, Setina, 2017: Skalbärande marina organismer och petrografi av tidig-campanska sediment i Kristianstadsbassängen – implikationer på paleomiljö. (15 hp)
507. Kempengren, Henrik, 2017: Förorenings-spridning från kustnära deponi: Applicering av Landsim 2.5 för modellering av lakvattentransport till Östersjön. (15 hp)
508. Ekborg, Charlotte, 2017: En studie på samband mellan jordmekaniska egenskaper och hydrodynamiska processer när

- erosion påverkar släntstabiliteten vid ökad nederbörd. (15 hp)
509. Silvé, Björn, 2017: LiDARstudie av glaciala landformer sydväst om Söderåsen, Skåne, Sverige. (15 hp)
510. Rönning, Lydia, 2017: Ceratopsida dinosauriers migrationsmönster under krittiden baserat på paleobiogeografi och fylogeni. (15 hp)
511. Engleson, Kristina, 2017: Miljökonsekvensbeskrivning Revinge brunnsfält. (15 hp)
512. Ingered, Mimmi, 2017: U-Pb datering av zirkon från migmatitisk gnejs i Delsjöområdet, Idefjordenterrängen. (15 hp)
513. Kervall, Hanna, 2017: EGS - framtidens geotermiska system. (15 hp)
514. Walheim, Karin, 2017: Kvartermineralogins betydelse för en lyckad luminescensdatering. (15 hp)
515. Aldenius, Erik, 2017: Lunds Geotermisystem, en utvärdering av 30 års drift. (15 hp)
516. Aulin, Linda, 2017: Constraining the duration of eruptions of the Rangitoto volcano, New Zealand, using paleomagnetism. (15 hp)
517. Hydén, Christina Engberg, 2017: Drumlinerna i Löberöd - Spår efter flera isrörelseriktningar i mellersta Skåne. (15 hp)
518. Svantesson, Fredrik, 2017: Metodik för kartläggning och klassificering av erosion och släntstabilitet i vattendrag. (45 hp)
519. Stjern, Rebecka, 2017: Hur påverkas luminescenssignaler från kvarts under laboratorieförhållanden? (15 hp)
520. Karlstedt, Filippa, 2017: P-T estimation of the metamorphism of gabbro to garnet amphibolite at Herrestad, Eastern Segment of the Sveconorwegian orogen. (45 hp)
521. Önnervik, Oscar, 2017: Ooider som naturliga arkiv för förändringar i havens geokemi och jordens klimat. (15 hp)
522. Nilsson, Hanna, 2017: Kartläggning av sand och naturgrus med hjälp av resistivitetmätning på Själland, Danmark. (15 hp)
523. Christensson, Lisa, 2017: Geofysisk undersökning av grundvattenskydd för planerad reservvattentäkt i Mjölkalånga, Hässleholms kommun. (15 hp)
524. Stamsnijder, Joaen, 2017: New geochronological constraints on the Klipriviersberg Group: defining a new Neoproterozoic large igneous province on the Kaapvaal Craton, South Africa. (45 hp)
525. Becker Jensen, Amanda, 2017: Den eocena Furformationen i Danmark: exceptionella bevaringstillstånd har bidragit till att djurs mjukdelar fossiliserats. (15 hp)
526. Radomski, Jan, 2018: Carbonate sedimentology and carbon isotope stratigraphy of the Tallbacken-1 core, early Wenlock Slite Group, Gotland, Sweden. (45 hp)
527. Pettersson, Johan, 2018: Ultrastructure and biomolecular composition of sea turtle epidermal remains from the Campanian (Upper Cretaceous) North Sulphur River of Texas. (45 hp)
528. Jansson, Robin, 2018: Multidisciplinary perspective on a natural attenuation zone in a PCE contaminated aquifer. (45 hp)
529. Larsson, Alfred, 2018: Rb-Sr sphalerite data and implications for the source and timing of Pb-Zn deposits at the Caledonian margin in Sweden. (45 hp)
530. Balija, Fisnik, 2018: Stratigraphy and pyrite geochemistry of the Lower–Upper Ordovician in the Lerhamn and Fågelsång-3 drill cores, Scania, Sweden. (45 hp)
531. Höglund, Nikolas, 2018: Groundwater chemistry evaluation and a GIS-based approach for determining groundwater potential in Mörbylånga, Sweden. (45 hp)
532. Haag, Vendela, 2018: Studie av mikrostrukturer i karbonatslagkägglor från nedslagsstrukturen Charlevoix, Kanada. (15 hp)
533. Hebrard, Benoit, 2018: Antropocen – vad, när och hur? (15 hp)
534. Jancsak, Nathalie, 2018: Åtgärder mot kusterosion i Skåne, samt en fallstudie av erosionsskydden i Löderup, Ystad kommun. (15 hp)
535. Zachén, Gabriel, 2018: Mesosideriter – redogörelse av bildningsprocesser samt SEM-analys av Vaca Muerta meteoriten. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund