

Fynd av bergarter bildade vid meteoritnedslaget i Siljansområdet

Jan-Olov Svedlund & Thomas Lundqvist

december 2010

SGU-rapport 2010:21



SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-179000
fax: 018-179210
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

INNEHÅLL

Inledning	2
Berggrunden i Siljanstrakten	2
Jordarterna i Siljanstrakten	5
Block av smältbergart nära Ingärtningsbodarna	5
Tuffartad bergart från bergtäkt i Bergkarlås	12
Sammanfattning	14
Litteratur	14
Appendix	17

Omslagsbilden visar en sten från Ingärtningsbodarna med partier av impaktsmälta eller pseudotakylit (mörkbrun till grå) i röd Siljansgranit.

INLEDNING

Vid Sveriges geologiska undersöknings (SGUs) fältarbeten med dokumentation av jordarterna i norra Dalarna påträffade en av oss (JOS) ett flertal block av en smältbergart (s.k. pseudotakylit) som bildats vid det stora meteoritnedslag som skedde i Siljanstrakten under devonperioden. Blocken finns på ett hygge nära Ingärdningsbodarna ca 17 km öster om Mora. Ett par av dem finns numera uppställda i ett vägsål invid hygget, på en plats med koordinaterna 6764740/1448080 i Rikets Nät (RT 90), samt latitud och longitud 60°59'46" resp. 14°50'55". Intill blocken finns sedan hösten 2009 en informationstavla uppställd.

Ett annat fynd av en bergart som sannolikt också är bildad vid meteoritnedslaget gjordes vid SGUs dokumentationsarbeten i en större bergtäkt vid Bergkarlås. Här rör det sig om en tuffliknande bergart i traktens Järnagranit.

Stort tack till Prof. Kord Ernstson, Fakultät för Geowissenschaften, Universität Würzburg, som i appendix gjort en bedömning av slipprover från Siljansområdet och jämförelser med några kända meteoritkratrar. Han har generöst ställt sitt utlåtande till vårt förfogande.

Boggs grus AB, Mora, har vänligen hjälpt till med maskingrävning i Bergkarlåstakten.

Fotografierna har tagits av författarna. Mikrofotona är tagna av Sven Lundqvist SGU.

Erik Sturkell, Geovetarcentrum, Göteborgs Universitet, har vänligen granskat manuskriptet och gett oss förslag till viktiga förbättringar.

BERGGRUNDEN I SILJANSTRAKTEN

Berggrunden i trakten av Siljan kan sägas bestå av tre huvudenheter:

1. Siljansringen.
2. Siljanskupolen, som är berggrunden innanför ringen.
3. Berggrunden utanför ringen.

Siljansringen framträder på både geologiska och topografiska kartor över Siljansområdet som en tydlig ringstruktur (fig. 3; Hjelmqvist 1966, Kresten & Aaro 1991, Källberg m.fl. 1991). Dess ursprung har varit föremål för livliga diskussioner bland geologerna, men numera är man, bl.a. efter fynd av chocklameller i kvarts och s.k. slagkägglor (eng. *shatter cones*) (Svensson 1971, 1973, Wickman 1988, Grieve 1988 och fig. 2), överens om att den är följden av ett större meteoritnedslag (en impakt) under senare delen av devonperioden. Impakten har daterats till 377 miljoner år (Reimold m.fl. 2005, se även Bottomley m.fl. 1977, 1978). Beräkningar av diametern på nedslagskratern har gett något olika resultat: 52, 65 och 75 km (Grieve 1988, Kenkmann & von Dalwigk 2000, Henkel & Aaro 2005, respektive). Strukturen har ett lågt, centralt beläget höjdparti (Siljanskupolen), som är 33 km brett i ost-västlig riktning och till större delen består av proterozoiska magmatiska bergarter. Den västra delen av höjdpartiet innehåller proterozoiska sedimentära och vulkaniska bergarter, sammanfattade under beteckningen subjotniska. Diametern på meteoriten anses ha varit ca 4 km och hastigheten vid nedslaget många kilometer i sekunden (von Dalwigk 2004; se även Lindström 2001). Nedslaget gav upphov till radikala förändringar av berggrunden innanför en cirkel med diametern ca 65 km och med centrum ca 2 mil öster om Mora. Här är berggrunden kraftigt sönderbruten och lokalt uppsmält. Den krater som bildades vid nedslaget kollapsade senare,

vilket ledde till obalans i jordskorpan. Denna obalans gjorde att det centrala området för nedslaget (Siljanskupolen) småningom kom att höjas i förhållande till den omgivande Siljansringen. Bergarterna i den inre delen av ringen restes då upp till mer eller mindre lodrätt läge, som t.ex. vid Styggforsen i Boda (fig. 1). I delar av ringen, som kring Skattungbyn, ligger dock Orsasandstenen kvar i tämligen ursprungligt, flackt läge, och utnyttjas här sedan gammalt till slipsten. Drygt meterstora slagkäglor förekommer i denna sandsten (fig. 2).



Fig. 1. Brantställd silurisk kalksten växellagrande med siltsten. Styggforsen i Boda.



Fig. 2. Orsasandstenen i det största av slipstensbrotten vid Kallholen innehåller partier med stora slagkäglor. Hammaren är 0,5 m lång.

Själva Siljansringen bildar idag en tydlig geologisk och topografisk ringstruktur med en yttre diameter av ca 65 km (fig. 3). I dess djupområden finns sjöarna Siljan, Orsasjön, Skattung och Oresjön. Bergarterna i ringen är mestadels sedimentära och bildades under ordovicium och tidig silur, ca 490–420 miljoner år tillbaka i tiden. De utgörs av kalksten, alunskiffer, lerskiffer och sandsten, ursprungligen avsatta som sediment i ett dåtida grunt hav. Vid nedslaget blev de starkt krossade och genomdragna av sprickor och förkastningar, ofta också brant uppresta tillsammans med partier av det underliggande urberget, som även ingår i Siljansringen. Sistnämnda består mest av graniter och olika vulkaniska bergarter (Dalaporfyrer och Dalaporfyriter) samt sedimentära bergarter (sandstenar och konglomerat) kallade Digerbergsbildningar efter Digerberget i Orsa.

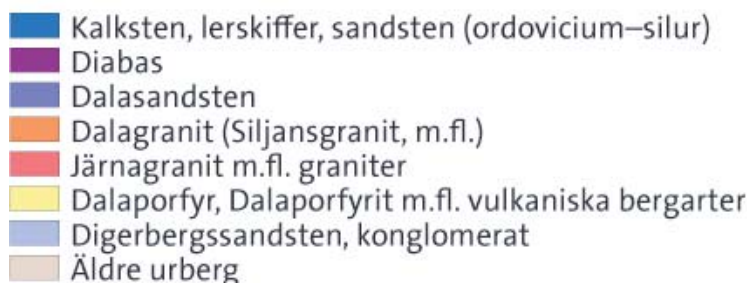
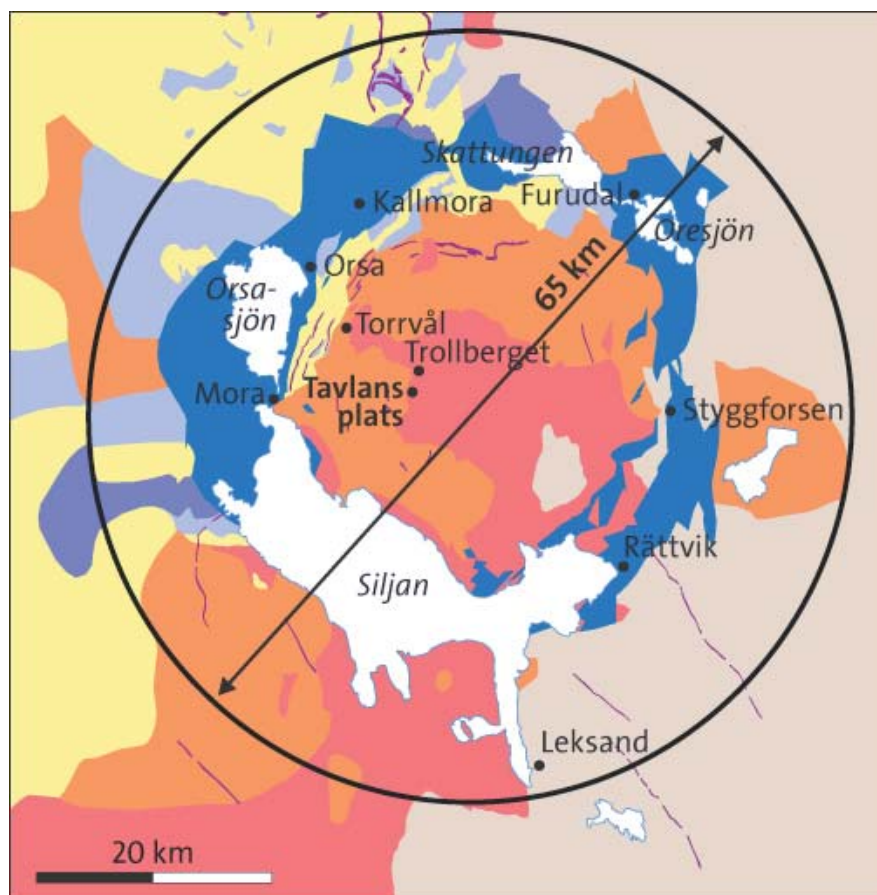


Fig. 3. Kartan visar de viktigaste bergarterna i Siljansområdet. Den svarta ringen markerar nedslagsrätet (meteoritkratern). Kartan, som bygger på Hjelmqvist (1966), Kresten & Aaro (1987) och Kresten m.fl. (1991), är modifierad efter von Dalwigk (2004), Geologiskt forum, och publiceras med tillstånd av Geologiska Föreningen.

Vid markeringen "tavlan's plats" finns en tavla med lokal information om smältbergarterna samt exempel på dessa i form av moränblock.

I den centralt belägna Siljanskupolen, som har en diameter av ca 3 mil, finns mest granit, som i huvudsak är av två typer. Viktigast är Siljansgraniten, som är röd och ganska grovkornig. Den har, liksom Dalaporfyrerna i och utanför ringen, en ålder av ca 1 700 miljoner år (Lee m.fl. 1988, Juhlin m.fl. 1991, Ahl m.fl. 1999). En annan granit är mer porfyrisk och liknar den 1 800 miljoner år gamla Järnagraniten (Åberg & Bollmark 1985, Persson & Ripa 1993), som har stor utbredning sydväst om ringen. Små områden med en gabbro av okänd ålder finns också.

I kupolen hittar man också smala diabasgångar. I de fall man bestämt åldern är dessa diabaser ca 900–1 000 miljoner år gamla (Juhlin m.fl. 1991, Collini & Aldahan 1992), men även andra diabasgenerationer kan tänkas förekomma.

Urberget utanför Siljansringen innehåller samma bergarter som ingår i kupolen och i ringens urbergsdel. Dessutom finns bl.a. i nordväst Garbergsgranit, nära besläktad med

Siljansgraniten. Dalaporfyreerna har sin huvudsakliga utbredning kring Älvdalen och i Orsa finnmark (Hjelmqvist 1966, Lundqvist 1968, Sjöblom & Aaro 1987, Lundqvist m.fl. 2006, Lundqvist & Svedlund 2008), samt vidare norrut i Härjedalen (Lundegårdh 1997). En bergart som inte påvisats i kupolen är Dalasandstenen. Den finns i ett mindre område norr om Skattungbyn, men har sin huvudsakliga utbredning i ett stort område i nordväst.

JORDARTERNA I SILJANSOMRÅDET

Mest förekommande jordart i Siljanskupolen är blockfattig, sandig morän. Den täta uppsprickning av urberget som meteoritnedslaget orsakade, bidrog till den ovanligt höga frekvensen av sten som kännetecknar Siljanområdets morän. Den låga blockhalten har också gynnat uppodling av den morän som finns i närheten av områdets urbanisering. Både stora och mindre områden med isälvsediment förekommer. I lägre områden, neremot sjön Siljan, finns inslag av både sandiga, siltiga och leriga havs- eller sjösediment. Berg i dagen förekommer mycket sparsamt i Siljansområdet.

Det som skedde efter meteoritnedslaget och dess direkta följdverkningar var att vittring och efterföljande erosion kom att gräva sig ned och blottlägga allt djupare snitt av berggrunden. Under kvartärperioden skedde upprepade nedisningar i hela Nordeuropa. Den senaste inlandsisen smälte så småningom bort och lämnade Siljanstrakten för ca 10 000 år sedan. Den lämnade ett landskap där berggrunden i stor utsträckning täcks av morän och sediment, med ett fåtal uppstickande berghällar. Moränen innehåller här en del block och stenar av den underliggande berggrunden, som transporterats av inlandsis från nordnordväst mot sydsydost.

BLOCK AV SMÄLTBERGART NÄRA INGÄRDNINGSBODARNA

De block som påträffats av en smältbergart från meteoritnedslaget (fig. 4–7) är transporterade med inlandsisen, men har troligen inte förflyttats lång sträcka. De är av decimeter- till halvmeterstorlek. Antalet observerade block är ca 15. Smältbergarten, ibland även kallad pseudotakylit, är brunaktig till färgen och uppträder som ett nätverk av millimeter- till decimeterbredda ådror i traktens röda till rödgrå Siljansgranit. (Med pseudotakylit avses en tät eller glasig bergart bildad vid större meteoritnedslag, men termen används också för liknande bergarter uppkomna vid intensiva rörelser i skjuv- och förkastningszoner där mylonitisering, eventuellt också uppsmältning skett.) Den har oftast talrika fragment av millimeter- till decimeterstorlek, som består av graniten eller mineral från denna. Smältbergarten innehåller sparsamt också grönaktiga fragment av en starkt omvandlad basisk bergart, troligen diabas eller gabbro. Smältbergarter av detta slag har ett något oklart ursprung, men kan ha uppkommit genom extrem friktion under eller strax efter nedslaget (Reimold & Gibson 2005).

Grävningar efter fast klyft i det område där blocken hittats gav inget resultat, eftersom jorddjupet översteg 4,5 m.



Fig. 4. Snittet ur blocket på omslaget visar impactsmälta som separerar brottstycken av granit som deformerats plastiskt.

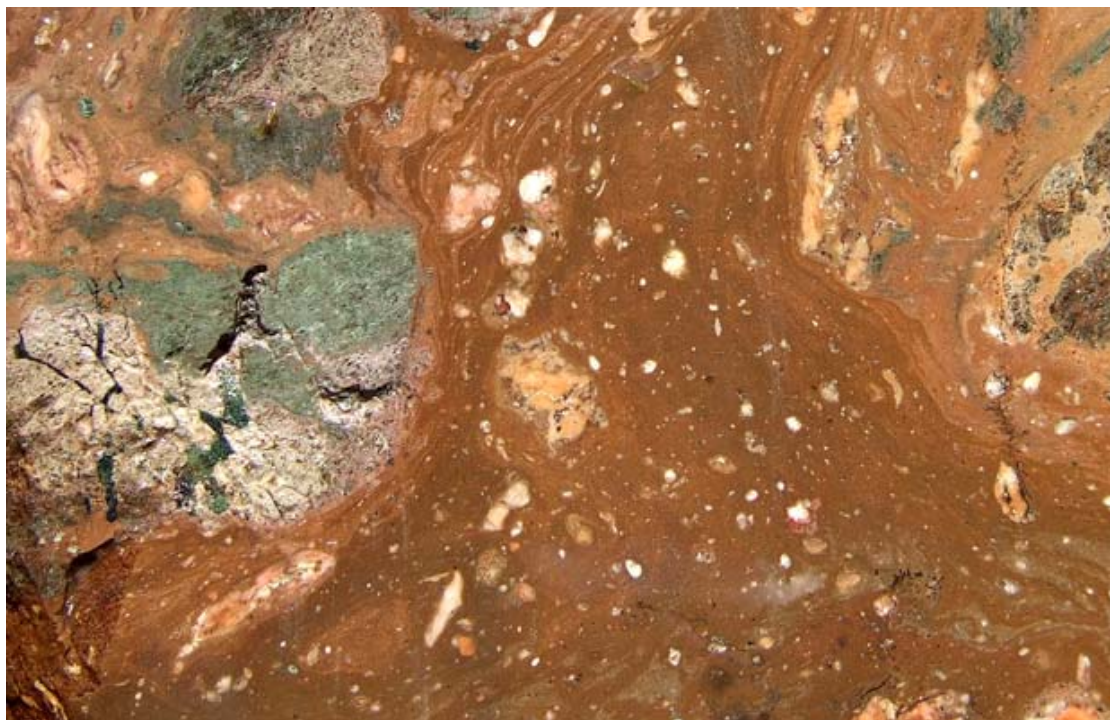


Fig. 5. Ca 5 cm bred detalj ur blocket på omslaget. Förutom granitfragment finns bitar av en främmande basisk bergart.

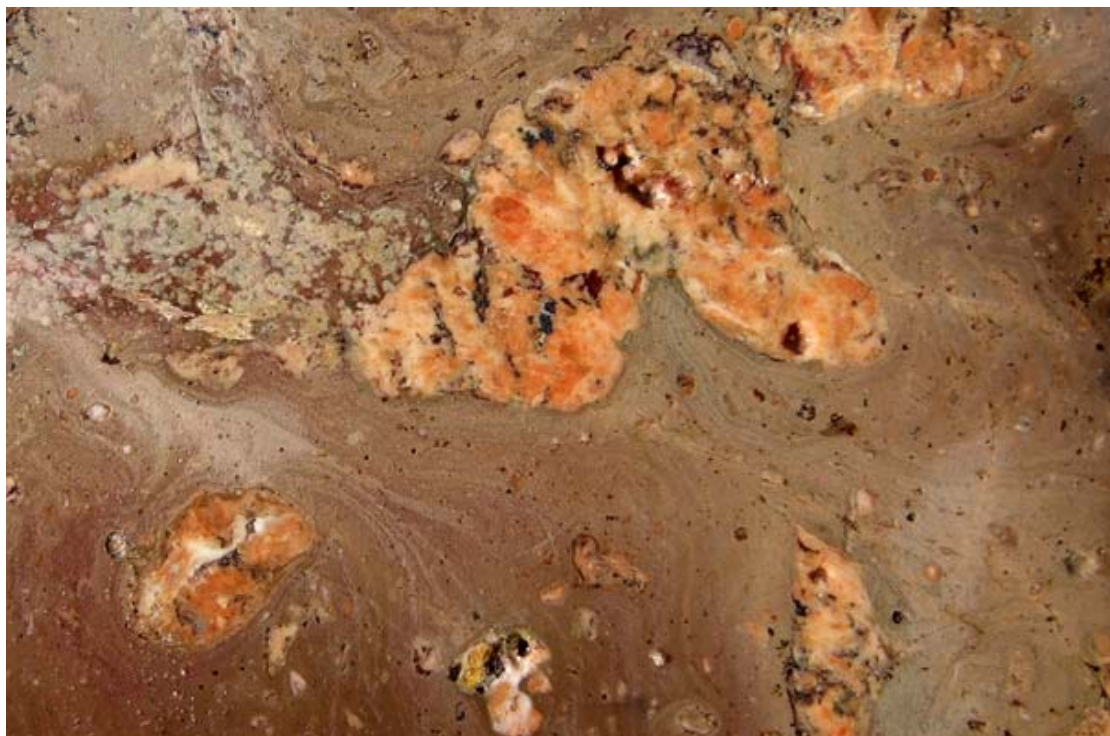


Fig. 6. Slipad yta ca 2 cm bred med rundade granitfragment i impaktsmälta i block nära Ingärtningsbodarna.

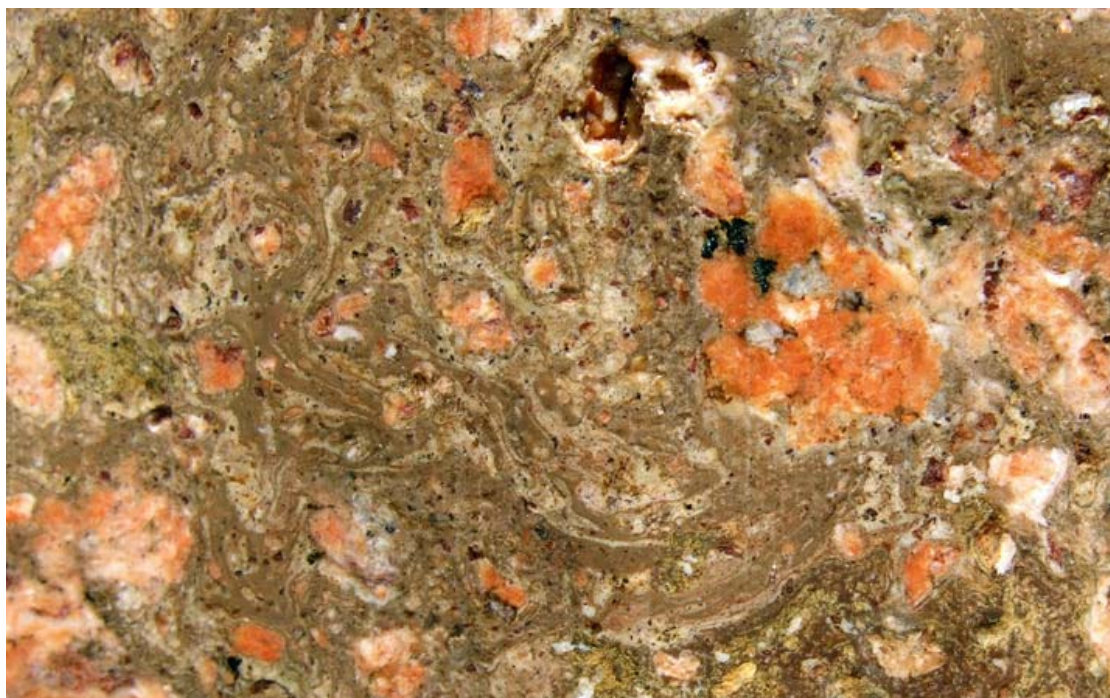


Fig. 7. Slipad yta ca 3 cm bred med granitfragment i olika grader av uppsmältning till impaktsmälta. Block nära Ingärtningsbodarna.

Vid Trollberget ca 3,3 km nordnordost om platsen där blocken påträffats finns en hållblottning av samma smältbergart (fig. 8), som här uppträder vid kontakten mellan Järnagranit och en genomsättande diabasgång. Lokalen har bl.a. beskrivits av Bottomley m.fl. (1978) och av Lundqvist m.fl. (2004), som påpekade att smältbergarten här är lokaliserad till en diabaskontakt på samma sätt som är vanligt för s.k. *backveining* på många ställen i Sveriges urberg (se t.ex. Lundqvist m.fl. 1990, s. 180–181). Fenomenet *backveining* orsakas av att diabasmagman vid sin intrusion haft tillräckligt värmeinnehåll för att smälta upp sidoberget, och den så bildade smältan kan intrudera både sidoberget och redan stelnad diabas. Det förefaller dock, av skäl som presenteras nedan, troligast att smältbergarten både på Trollberget och i blocken vid Ingärdningsbodarna inte uppkommit vid diabasens intrusion utan bildats i direkt samband med meteoritnedslaget.



Fig. 8. Impaktsmälta (pseudotakylit) i hållblottning på Trollberget, med fragment av både diabas (upptill i bilden) och granit (nedtill).

Stufferna Siljan 1–6 har tagits av olika block från hygget vid Ingärdningsbodarna, inom ett avstånd av ett par hundra meter norrut från vägskälet vid punkt 6764740/1448080. Här nedan redovisas slipprovsundersökningar av stufferna Siljan 1, 3, 4, 5 och 6. För jämförelse ges också resultatet av en slipprovsundersökning av smältbergarten från Trollberget (slip TL 07: 12a). Prof. Kord Ernstson, Würzburg, har efter sina studier av samma slipprover vänligen gett ett utlåtande, som bifogas i appendix. Detta utlåtande gäller framför allt sådana texturer, strukturer m.m. som indikerar ett meteoritnedslag.

Siljan 1. Smältbergart med inneslutningar, block nära Ingärdningsbodarna.

Matrix är brunröd, kryptokristallin till glasig, bemängd med mycket finkornigt opakpigment.

Fragmenten är rundade, linsformade eller mer kantiga och vanligen millimeterstora. De är korroderade av matrixen. De består av:

1) Starkt krossad fältspat (albit och kalifältspat, sericitbemängda), innehållande större fjäll av färglös glimmer. Ingen säker kvarts kan ses.

2) Starkt omvandlad (trolig) diabas med svåridentifierade mineral.

Provet kan betecknas som en fragmentfattig impaktsmälta eller en suevit (K. Ernstson, se appendix). Termen impakt används för att beteckna den enormt kraftiga kollision som nedslaget av en större meteoritkropp innebär, och som leder till kraterbildning. Suevit är ett slags breccia (fragmentbergart) som bildas vid större meteoritnedslag. En suevit (icke att förväxla med sövit, som är en karbonatit, dvs. en magmatisk karbonatbergart) innehåller chockpåverkade mineral- och bergartsfragment samt glasinneslutningar med en aerodynamisk form som för tanken till vulkaniska bomber. Bergarten påminner i hög grad om en vulkanisk tuffbreccia eller pimpstenstuff, men den är alltså inte av vulkaniskt ursprung.

Siljan 3. Fragment genomdragna av nätverk av smältbergart (fig. 9–10), block nära Ingärdningsbodarna.



Fig. 9. Mikrofoto av smältliknande bergart i block vid Ingärdningsbodarna (prov Siljan 3). Fragment av starkt krossad fältspat (eller fältspatrik granit) ligger i en mörkbrun, järnoxidpigmenterad matrix med talrika fältspat- och kvartsinneslutningar. 1 nic. Bildyta 10 x 13 mm. Foto Sven Lundqvist, SGU.



Fig. 10. Samma foto som föreg., men taget med 2 nic. Matrix är kryptokristallin, nära glasig. Foto Sven Lundqvist, SGU.

Slipet visar en ”gröt” av rödgrå till mörkt rödbruna fragment (centimeterstora till knappt urskiljbara i mikroskop) av extremt starkt krossad fältspat (mikroklin och albit) med mindre inslag av undulös kvarts samt accessorisk apatit och ortit. Det finns också linsformade anhopningar av epidotmineral innehållande zirkon(?), samt spridda korn av opakmineral.

Fragmenten simmar i ett nätverk av en brungrå, kryptokristallin till glasig smältbergart med tydliga flytstrukturer.

Provet kan betecknas som en "klassisk" suevitbreccia med partiklar av smälta, chockade mineral-korn och breccia-i breccia (K. Ernstson, se appendix).

Siljan 4. Skära fragment genomdragna av grått nätverk av smältbergart (pseudotakylit), block nära Ingärtningsbodarna.

Provet liknar i hög grad Siljan 3, men här finns dessutom ett antal sekundära rosetter av ett färglöst glimmermineral. Vidare finns lite av ett epidot- eller titanitliknande mineral med hög relief och dubbelbrytning. Ett grönt, illa medfaret (krossat) mineral är troligen hornblände. Detta mineral finns också i aggregat tillsammans med omvandlad plagioklas. Troligen är aggregatet en inneslutning av omvandlad amfibolit.

I den grå smältbergarten finns små kloritkristaller samt relativt rikligt med opakmineral.

Provet är svårbedömt. Det innehåller inga partiklar av smälta, men något chockade fragment av plagioklas och kvarts (K. Ernstson, se appendix).

Siljan 5. Smältbergart med inneslutningar (fig. 11), block nära Ingärtningsbodarna.

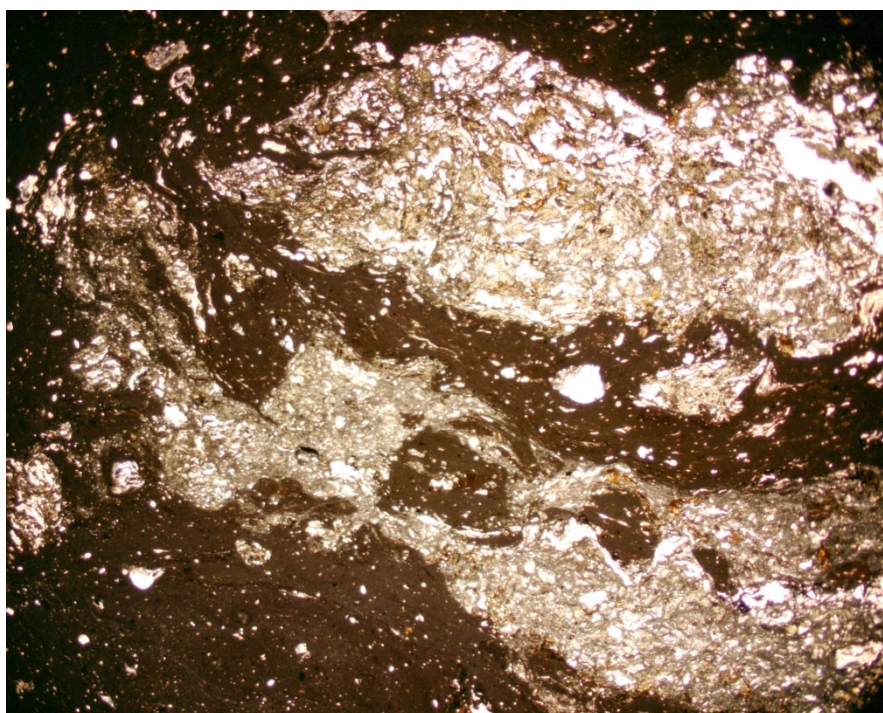


Fig. 11. Mikrofoto av smältliknande bergart i block från Ingärtningsbodarna (prov Siljan 5). Bergarten visar flytstrukturer och innehåller starkt krossade och korroderade mineralfragment (mest alkalifältspat). 1 nic. Bildyta 10 x 13 mm. Foto Sven Lundqvist, SGU.

Som Siljan 1, med dominerande rödbrun, kryptokristallin till glasig, opakmineralrik matrix med spridda både kantiga, linsformat utvalsade och korroderade grå och rödaktiga inneslutningar bestående av starkt krossad fältspat (albit och kalifältspat). En del kristaller kan vara kvarts, men någon entydig kvartskristall kan inte ses. Vidare finns rester av pyroxen och/eller hornblände.

En del inneslutningar verkar bestå av starkt omvandlad diabas (innehållande en relativt hög halt av mörka omvandlingsmineral).

Det verkar finnas två generationer av smältbergart, varav den ena (yngre) innehåller plastiskt utvalsade inneslutningar av den andra. Den yngre smältbergarten verkar normalt vara mer intensivt rödbrun än den äldre, men det motsatta förhållandet kan också ses.

Provet kan betecknas som en smältbergart i vid mening och innehåller mer än en generation av smälta. Inga chockstrukturer kan ses i mineralfragmenten. Det kan röra sig om en pseudotakylit (K. Ernstson, se appendix).

Siljan 6. Smältbergart med mineral- och bergartsfragment, block nära Ingärdningsbodarna.

Pseudotakyliten är rödbrun, opakmineralrik, kryptokristallin (till glasig), opakmineralpigmenterad, och har en tydlig flytstruktur. Olika generationer av pseudotakylit verkar existera och skiljer sig från varandra genom olika järnoxidpigmentering. Man kan t.ex. se mörkare smältbitar omgivna av en ljusare smältbergart. En del bitar skulle möjligen kunna vara suevit.

Inneslutningarna är röda eller gråaktiga och består av både mineral och bergarter. De innehåller sericitbemängd albit och (tydlig) kvarts, däremot finns inga tydliga kalifältspater. Det finns också små kristaller av färglös glimmer.

Provet utgör möjligen ett slags suevitbreccia med smältfragment, men utan synlig chockpåverkan i mineralfragmenten. Bergarten kan ha uppkommit i ett sent stadium av kraterbildningen när en redan stelnad chocksmälta bröts sönder och blandades med en icke-chockad breccia (K. Ernstson, se appendix).

TL 07: 12a. Rödbrun smältbergart med talrika, vanligen millimeterstora xenokristaller, Trollberget, 6768150/1448800 (fig. 12–13).

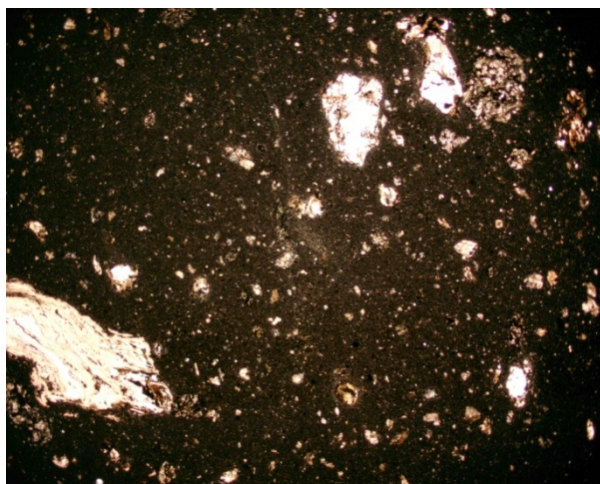


Fig. 12. Foto av smältliknande bergart (pseudotakylit) i håll på Trollberget (prov TL 07: 12a). Bergarten innehåller mineralfragment (mest alkalifältspat) samt fragment av en äldre smältbergart (mylonit?; nere t.v.) i en starkt brunpigmenterad matrix. 1 nic. Bildyta 10 x 13 mm. Foto Sven Lundqvist, SGU.

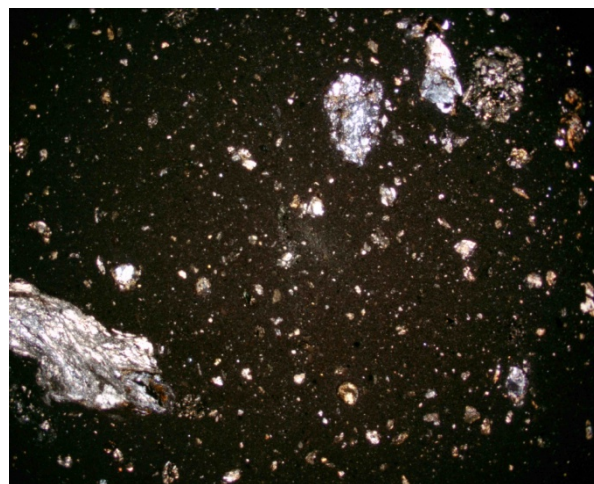


Fig. 13. Samma foto som föreg., men taget med 2 nic. Foto Sven Lundqvist, SGU. Grundmassan är nära isotrop (glasig).

Matrix består av en mörkbrun, kryptokristallin, nära glasig magmatisk bergart. Denna har enligt tidigare röntgenundersökning en kvartsmonzonitisk modalsammansättning (se Lundqvist m.fl. 2004, lokal nr 5, s. 29–32).

De flesta fragmenten är starkt krossade och sönderspruckna och består huvudsakligen av alkalifältspater (mikroklin och sericitbemängd albit) i vilka tvillinglamellerna brutits av eller böjts så att kornen fått undulös utsläckning. Kvarts verkar saknas eller är mycket underordnad gent emot fältspat. Lite ljus glimmer ingår också.

Vidare finns plastiskt utvalsade, mylonitiska (skifferliknande), ibland bananformigt böjda små bergartsfragment. Deras mineralinnehåll (kvarts, kvarts och fältspat, eller bara fältspat) är svårt att bestämma utan tillgång till mikrosond e.dyl.

Provet är att beteckna som ett mellanting mellan impaktsmälta och suevit (K. Ernstson, se appendix).

Likheterna med ovan beskrivna slipprover av blocken vid Ingärdningsbodarna är påfallande.

FRAGMENTBERGART I TÄKT I BERGKARLÅS

I en större bergtäkt vid Bergkarlås (ca 6767500/1438600), beskriven i Lundqvist m.fl. (2004, lokal 9, s. 33) påträffades en för området tidigare okänd typ av fragmentbergart (fig. 14–15), som troligen uppkommit vid meteoritnedslaget. Den exakta platsen för fyndet är 6767529/1438839. Bergarten finns i fasta berget, under ca 6 meter med Järnagranit. Då den upptäcktes provtogs den, och syftet var att vid ett återbesök undersöka förekomsten närmare. Den var då övertäckt av fyllnadsmaterial, och vid grävning i detta var grundvattennivån så hög att inga nya observationer kunde göras på platsen. Nedanstående observationer är därför tyvärr ofullständiga.

Bergarten är rödbrun till grå, inhomogen och ojämnkornig (fig. 14–15). I partier kan en viss skiktning eller glidstruktur ses i stufferna. Den förefaller ligga flackt under Järnagranit. Kontakten mot graniten har inte kunnat undersökas närmare, men borde p.g.a. bergartens troliga genes vara tektonisk.



Fig. 14. Grått och rödbrunt parti av bergart i bergtäkten vid Bergkarlås. Bergarten innehåller fragment av kvarts, granit och flagor med flytstrukturer som kan vara impaktsmälta. Sågat snitt ca 15 x 19 mm.

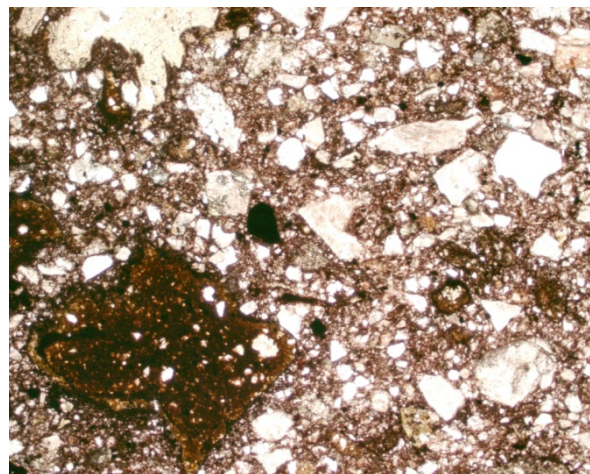


Fig. 15. Mikrofoto av fragmentbergart i bergtäkten vid Bergkarlås (prov Bergkarlås 1). Fragment av alkalifältspat, kvarts och granit samt enstaka opakmineral ligger i en starkt brunpigmenterad kvarts-fältspatmatrix. Det mörka fragmentet nere t.v. kan vara en impaktsmälta. 1 nic. Bilyta 2,7 x 3,4 mm.

Bergkarlås 1. Klastisk, mörkt brunröd, finkornig bergart liggande under granit av Järntyp.

Textur: Klastisk. Talrika kantiga eller flikiga (korroderade) delvis mer rundade fältspat-, kvarts- och bergartsfragment, vanligen av millimeterstorlek, men upp till ca 1 cm långa, ligger inbäddade i en brunröd, opakrik matrix. Fragmenten är mestadels ganska obetydligt (eller inte alls) krossade, men ca 10 % av dem visar den extrema krossning som är en följd av Siljansimpakten. En del fragment är av en smältbergart eller av glaspartiklar, men också av breccia i breccia. Provet kan bäst beskrivas som en suevit eller suevitliknande bergart (K. Ernstson, se appendix).

Mineralfragmenten består av kvarts (inga entydiga chocklameller kunde ses), sericitomvandlad albit och mycket lätt sericitomvandlad peritit. Underordnat finns epidot (i fältspatfragmenten), opakmineral, kloritaggregat och sericit/muskovit.

Bergartsfragmenten består av:

- 1) Ännu mer finklastiska bergarter än matrix i huvudbergarten (se nedan).
- 2) Serpentin/talkartade aggregat av sekundärmineral efter femiska mineral (olivin m.fl.), eller i skifferliknande strimmor.
- 3) En del fragment visar en fluidalstruktur och är extremt starkt järn(hydr)oxidpigmenterade. De kan tänkas vara smältbergarter uppkomna vid Siljansimpakten.

Matrix mellan fragmenten är mycket finkornig och några mineral kan inte säkert identifieras här på grund av den starka pigmenteringen av järnoxid eller -hydroxid. Troligen rör det sig dock mest om alkalifältspat och kvarts.

SAMMANFATTNING

De ca 20 block och stenar med impaktsmälta som påträffats, främst öster om Ingärdningsbodarna, tyder på att det kan finnas sådan smälta kvar i berggrunden under områdets morän. Några stenar med liknande smälta har även hittats mot sydväst i det stråk med isälvserosion och isälvsediment som passerar Ingärdningsbodarna och går ut i Siljan vid Färnäs. Fynden likar mest de pseudotakylitbreccior som finns beskrivna i Vredefortdomen, som är den hittills största verifierade impaktstrukturen på Jorden med en diameter av minst 250 km. I båda fallen verkar granit vara den bergart som breccierats och till stor del läkts med impaktsmälta (Reimold, m.fl. 2005). Kompletterande information finns bl.a. på denna internetsida: Visit Deep Impact – The Vredefort Dome. Newsflash – 2005 July 14 – The Vredefort Dome is declared a World Heritage Site, tillgänglig på webadressen <http://www.hartrao.ac.za/other/vredefort/vredefort.html>

Fragmentbergarten i Bergkarlås ligger märkligt nog under ca 6 m uppkrossad Järnagranit med högt inslag av slagkäglor. En möjlig uppkomst av denna fragmentbergart kan vara att den är en klastisk, lokal, suevitartad avsättning i samband med en impakt. Senare träffades både fragmentbergarten och dess granitunderlag av likaledes impaktrelaterade, horisontella överskjutningar.

LITTERATUR

- Ahl, M., Sundblad, K. & Schöberg, H., 1999: Geology, geochemistry, age and geotectonic evolution of the Dala granitoids, central Sweden. *Precambrian Research* 95, 147–166.
- Bottomley, R.J., York, D. & Grieve, R.A.F., 1977: ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Scandinavian impact craters. *Meteoritics* 12, 182–183.
- Bottomley, R.J., York, D. & Grieve, R.A.F., 1978: ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Scandinavian impact structures in Mien and Siljan. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 68, 79–84.
- Collini, B., 1988: Geological setting of the Siljan ring structure. I A. Bodén & K.G. Eriksson (red.): *Deep Drilling in Crystalline Bedrock, Vol. 1*. Springer-Verlag, 349–354.
- Collini, B., 1991: Geological setting of the Siljan Ring structure. I Vattenfall (Swedish State Power Board; av Juhlin m.fl.): *Scientific Summary of the Deep Gas Drilling Project in the Siljan Ring Impact Structure*. Serial number U(G) 1991/14, 11–25.
- Collini, B. & Aldahan, A.A., 1992: Geological results of the drilling in the Siljan Ring Structure. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 114, 157–158.
- Dalwigk, I. von, 2004: Skandinaviens största katastrof – eller en gåva från ovan. *Geologiskt Forum* 43, 32–39.
- Fredén, C., (red.), 2002: *Berg och jord. Sveriges Nationalatlas, tredje utgåvan*. Sveriges Nationalatlas Förlag. 208 s.
- Grieve, R.A.F., 1988: The formation of large impact structures and constraints on the nature of Siljan. I A. Bodén & K.G. Eriksson (red.): *Deep drilling in crystalline bedrock, vol. 1*, Springer-Verlag, 328–348.

- Henkel, H. & Aaro, S., 2005: Geophysical investigations of the Siljan impact structure – a short review. *I C.Koeberl & H. Henkel (red.): Impact tectonics*. Springer-Verlag, s. 247–283.
- Hjelmqvist, S., 1961: The Relation between diabase, granite, and porphyry at Bullberget in Dalarna, central Sweden. A proof of magmatic granite formation. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala XL*, 69–80.
- Hjelmqvist, S., 1966: Beskrivning till berggrundskarta över Kopparbergs län. Med karta i skalan 1:200 000. *Sveriges geologiska undersökning Ca 40*, 217 s.
- Juhlin, C., AlDahan, A.A., Castaño, J., Collini, B., Gorody, T. & Sandstedt, H., 1991: *Scientific summary report of the deep gas drilling project in the Siljan impact structure*. Vattenfall, Swedish State Power Board, U(G) 1991/14, 257 s.
- Kenkmann, T. & von Dalwigk, I., 2000: Radial transpression ridges: A new structural feature of complex impact craters. *Meteoritics and Planetary Science 35*, 1189–1201.
- Kresten, P., Aaro, S. & Karis, L., 1991: Berggrundskartorna 14E Mora NO och SO. Skala 1:50 000. *Sveriges geologiska undersökning Ai 50 och 51*.
- Källberg, I., Sundberg, A. & Wigström, B., 1991: Berggrundskarta över Kopparbergs län. *Sveriges geologiska undersökning Ah 18*.
- Lee, J.K.W., Onstott, T.C., Henne, R., Krogh, T.E. & Castaño, J. R., 1988: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe and U-Pb geochronology of Siljan Ring samples. *Geological Society of America, Centennial Celebration, Denver, Colorado. Abstracts with Programs no. 26576, A24*.
- Lindström, M., 2001: Impaktstrukturer (astroblem). *I M.Lindström, J. Lundqvist & T. Lundqvist: Sveriges geologi från urtid till nutid*. Andra upplagan, andra tryckningen, del 1, kapitel 9. Studentlitteratur, Lund, s. 193–199.
- Lundqvist, T., Snäll, S. & Svedlund, J.-O., 2004: Berggrundsgeologiska nyheter i Siljansområdet. *SGU-rapport 2004:11*, 49 s.
- Persson, P.-O. & Ripa, M., 1993: U-Pb zircon dating of a Järna-type granite in western Bergslagen, south-central Sweden. *I T. Lundqvist (red.): Radiometric dating results. Sveriges geologiska undersökning C 823*, 41–45.
- Reimold, W.U. & Gibson, R.L., 2005: "Pseudotachylites" in Large Impact Structures. *I C. Koeberl & H. Henkel (red.): Impact Tectonics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 1–53.
- Reimold, W.U., Kelley, S.P., Sherlock, S.C., Henkel, H. & Koeberl, C., 2005: Laser argon dating of melt breccias from the Siljan impact structure, Sweden: Implications for a possible relationship to Late Devonian extinction events. *Meteoritics & Planetary Science 40*, 591–607. Finns också som Abstract, *Lunar and Planetary Science 35*, abstr. 1480, CD-ROM.
- Svensson, N.B., 1971: Probable meteorite impact craters in Sweden. *Nature Physical Science 229*, 90–92.
- Svensson, N.-B., 1973: Shatter cones from the Siljan structure, Central Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 95*, 139–143.
- Wickman, F.E., 1988: Possible Impact Structures in Sweden. *I A.Bodén & K.G. Eriksson (red.): Deep drilling in crystalline bedrock, vol. 1*. Springer-Verlag, s. 298–327.

Åberg, G. & Bollmark, B., 1985: Retention of U and Pb in zircons from shocked granite in the Siljan ring structure, Sweden. *Earth and Planetary Science Letters* 74, 347–349.

APPENDIX

Utlåtande från Prof. Kord Ernstson, Universität Würzburg, med bedömning av slipprover från Siljansområdet och jamforelser med kanda meteoritkratrar.

In general, the sections and the facies they display are familiar to me when compared with typical impactites e.g. from the Ries and Rochechouart craters (Figs. A1–A4):

Comparing the Siljan sections with the Ries and Rochechouart sections the same problems arise that is a clear definition of impactites. An attempt has been made by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks, Study Group for Impactites, but many discrepancies and simplifications were clearly evident. On our websites, I've some time ago pointed to these clear weak points, and meanwhile a revision exists, [http://www.bgs.ac.uk/scmr/docs/papers/paper_11.pdf]. From this nomenclature, *impact melt rocks are crystalline, semihyaline or hyaline rocks which have solidified from shock-produced impact melt and which contain variable amounts of clastic debris.*

As I've written on our impact structures website, a clear distinction between impact melt rocks and impactites of the suevite type is sometimes difficult and partly a matter of scale. Different from impact melt rocks, *suevites are polymictic impact breccias with clastic matrix and mineral clasts in various stages of shock metamorphism including cogenetic impact melt particles which are in a glassy or crystallized state* (IUGS definition). With regard to the impact cratering process, a formation of “pure” melt rock bodies and “pure” suevite bodies may take place largely, however a mixing to a certain degree and transitions are clearly to be expected. A typical example is given by the suevite of the Ries impact structure hosting large amounts of clasts that with regard to the IUGS definition are impact melt rocks (the so-called Ries glass bombs). Meanwhile, impact researchers from the “impact community” (whatever that is...) have realized these problems, and especially for the Ries crater a discussion on the melt rock or suevite character of the Ries suevites has been introduced:

<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lmi2008/pdf/3033.pdf>

This discussion already began in the eighties when the Polsingen suevite of the Ries crater was no longer considered a suevite but was declared to be an impact melt rock (see Fig. A3), and a similar discussion may be conducted with regard to the Siljan impactites and your thin sections. Basically, the following impact scenarios with the formations of various impactites may occur:

– **contact and compression stage** (see, e.g., <http://www.impactstructures.com/understand.html>): formation of a melt sheet followed, with decreasing shock intensity, by a zone of brecciated rocks exhibiting decreasing shock metamorphism down to zero shock level. Thus in the very beginning of cratering, there is a melt sheet as a base for the formation of more or less pure glassy or crystalline impact melt rocks and a zone of brecciated rocks with varied amounts of shock features from shock-produced melt to melt-free composition. Due to the more or less continuously decreasing intensity of the propagating shock front, there will be a more or less continuous transition from pure melt rocks over breccias containing melt rock clasts, over melt-free shocked breccias to unshocked breccias. Here the “pure” nomenclature of impactites may apply:

- impact melt rocks (pure crystalline or glassy rocks with no or subordinate clastic debris that survived shock melting),
- suevites (clastic rocks – a breccia – composed of rock fragments, shocked and unshocked, and melt fragments,
- melt free breccias containing shocked minerals, so-called lithic breccias according to nomenclature,
- unshocked (monomictic) breccias.
- **excavation stage** (see e.g. <http://www.impact-structures.com/understand.html>). Now, things are getting complex. Due to the rock mass flow behind the propagating shock front and the traversing excavation trajectories, the previous clear zoning can drastically be disturbed leading to a partial mixing of the originally more or less coherent impact melt rock, suevite, lithic-breccia and unshocked-breccia complexes with the outcome of the formation of impactites no longer matching any “official” nomenclature. A simple but typical example may be the melt-rock bombs embedded in the Ries suevites.

More complications are given upon landing and emplacement of excavated shocked and unshocked, mixed and unmixed impact rocks. In the course of the so-called secondary cratering, they all may additionally mix with autochthonous local, in general completely unshocked material to great extent.

- **modification stage** (see e.g. <http://www.impact-structures.com/understand.html>). Things may become still more complex in the modification stage when all previously produced impact rocks may undergo a further mixing upon elastic rebound and collapse of the transient cavity. In very large craters, the modification stage may start even when the excavation has not come to standstill thus providing more complex rock interaction.

- The special case of pseudotachylites. Pseudotachylites in impact structures have always been a matter of discussion; see e.g., <http://www.springerlink.com/content/v6916517v81jv631/>

In principle, they are frictionally produced melt rocks that may or may not contain lithic clasts exhibiting shock or not any shock. Consequently, in hand specimen it is in general impossible to decide whether the melt rock is a pseudotachylite or a shock melt rock. Even in the field, on cursory inspection, it may be impossible to decide whether a melt vein was produced by friction or is the result of injected shock melt. In the extreme case, impact pseudotachylites may even contain fragments of earlier produced solidified shock melt rock or, vice versa, fragmented solidified pseudotachylites could in the final modification stage have been intermixed into impact melt rocks.

Summarizing, impactites may be of arbitrarily complex composition and facies, and from one thin section it may in general be impossible to classify the rock unit the thin section was taken from. For example, a thin section I let made from a sandstone clast embedded in Ries suevite was absolutely void of any shock signature in the quartz grains. This in advance before commenting on the Siljan thin sections. (Please consider the restricted microscope conditions, without rotational stage.)

Bergkarlås thin section

I largely agree with Prof. Lundqvist. Best described perhaps as a suevite or suevite-like impact breccia. Contains melt rock and glass particles (Fig. A7, Fig. A6), and brecciated clasts (breccia-within-breccia; Fig. 6, in contact with the glass particle). Sparsely planar features, however, no absolutely clear shock metamorphism (e.g. PDFs, Planar Deformation Features) in minerals.

Trollberget thin section (Figs. A8, A9)

Similar to Bergkarlås. A few strongly plastically deformed (cataclastic flow texture) clasts; few grains with some indications of shock (see Fig. A10). The probably diaplectic quartz in Fig. 9 could point to higher shock levels (>10 GPa). Probably an impactite somewhere between impact melt rock and suevite – see discussion on the Ries suevite. According to Prof. Lundqvist, an impact melt would be more likely due to his opinion that the rock was formed by in situ melting at a granite–dolerite contact.

Siljan 1 thin section

Very similar to Trollberget; probably a clast-poor melt rock or suevite impactite. Flow texture of matrix indicated by alignment of elongated clasts. Strong deformation of minerals (deformation lamellae or deformation twinning in plagioclase), but no clear shock throughout the thin section. A few PDFs in feldspar may occur. Because of the practically absent shock, an interpretation as pseudotachylite may apply.

Siljan 3 thin section

I would say: a “classic” suevite breccia with melt particles and shocked minerals (Figs. A11, A12), breccias-within-breccias.

Siljan 4 thin section

Difficult: Perhaps a lithic breccia (no clear melt particles, moderately shocked plagioclase, quartz, Figs. A13, A14) in contact with melt rock and/or suevite. With regard to the above discussion, a mixture of various “pure” impactite facies must be taken into consideration.

Siljan 5 thin section

Melt rock in the broadest sense; obviously more than one melt generation; not any shock in minerals to be observed. Pseudotachylite?

Siljan 6 thin section

A kind of suevite (?) breccia with melt fragments (Fig. A15) however without noticeable shock in minerals (Fig. A16, deformations are not necessarily from shock). The rock may have been

formed in the late stage of impact cratering when already solidified shock melt was fragmented and mixed with unshocked breccia.

In summary, the general aspect of the thin sections suggests the rocks have been formed in the Siljan impact process. In the broadest sense they can be said to be melt breccias that have probably originated somewhere between impact melt rocks and suevites, although the few and only moderately shocked minerals are obvious. Therefore, a strongly mobile whole-rock shock melt that was (locally?) injected into a weakly shocked or unshocked however strongly brecciated crater floor may be considered. A formation of pseudotachylite frictional melt having been injected into the brecciated crater floor may additionally be taken into consideration.

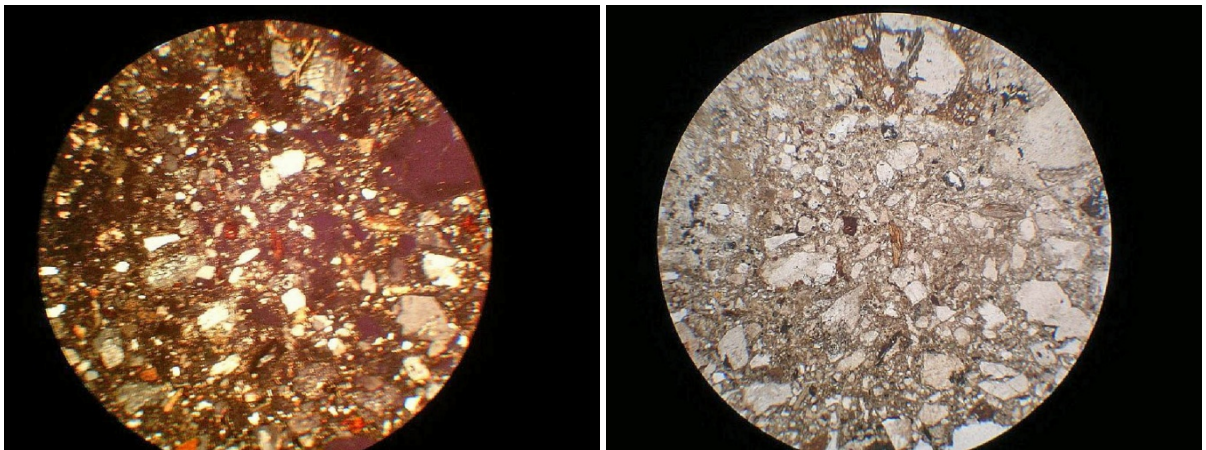


Fig. A1. Ries impact structure: Zipplingen suevite; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane polarized light.

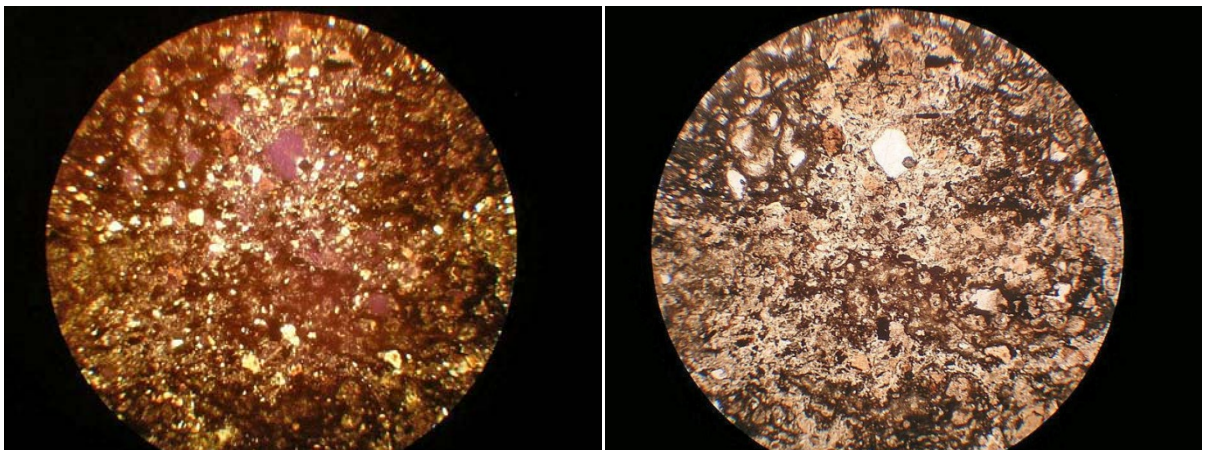


Fig. A2. Rochechouart impact structure: Montoume (red) suevite; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane polarized light.

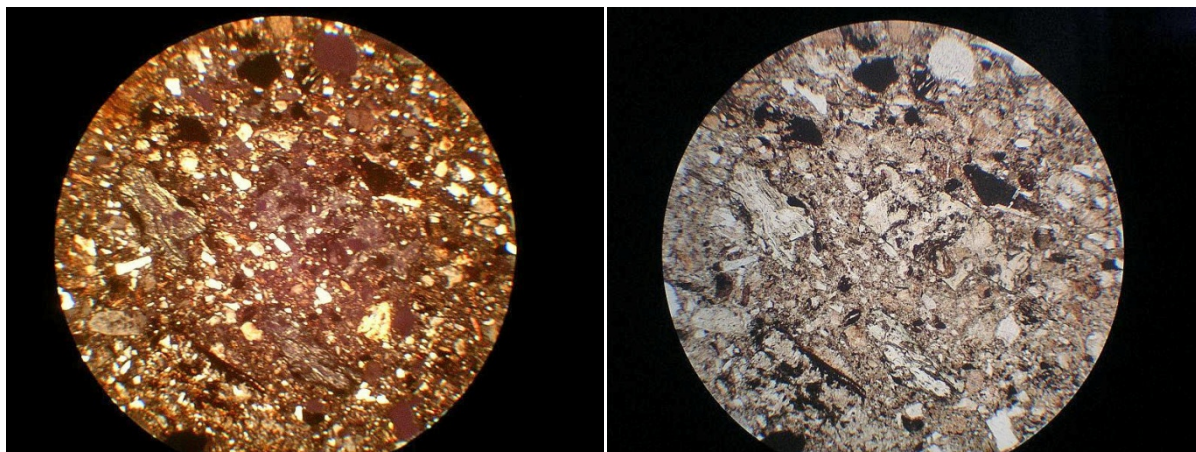


Fig. A3. Ries impact structure: Pölsingen impact melt rock; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane polarized light. The Pölsingen melt rock was originally considered a suevite. See discussion in the text.

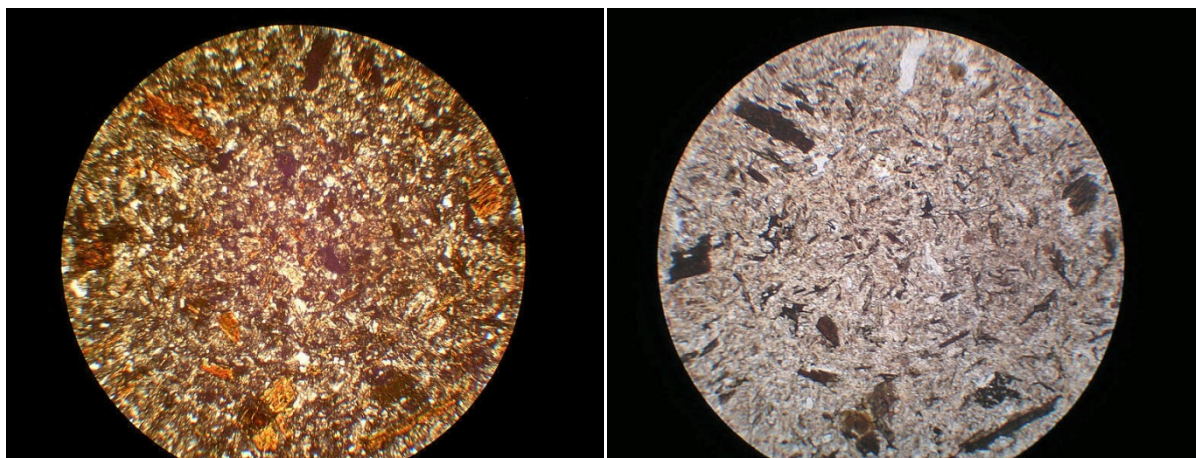


Fig. A4. Rochechouart impact structure: Chassenon (green) suevite; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane polarized light.

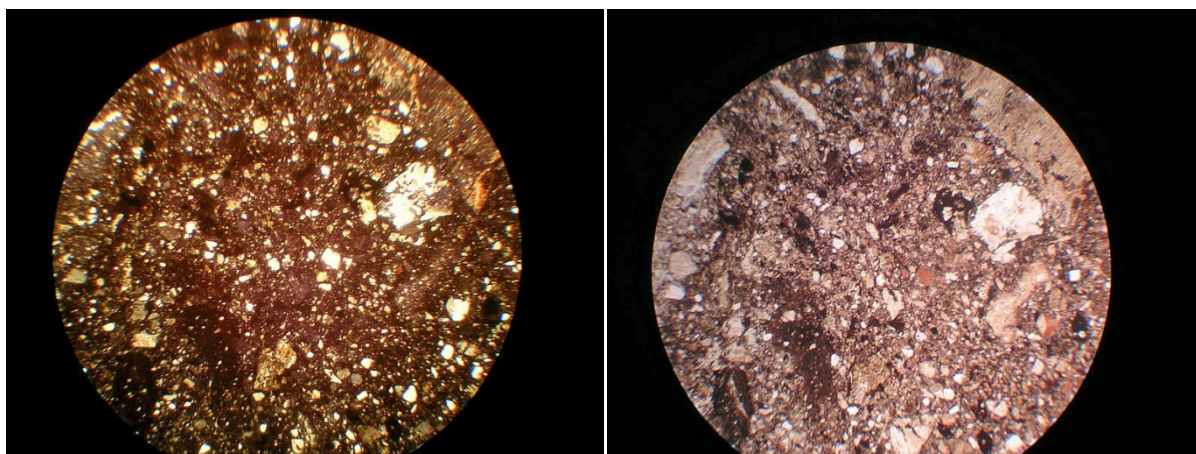


Fig. A5. Siljan impact structure, thin section 6; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane polarized light.

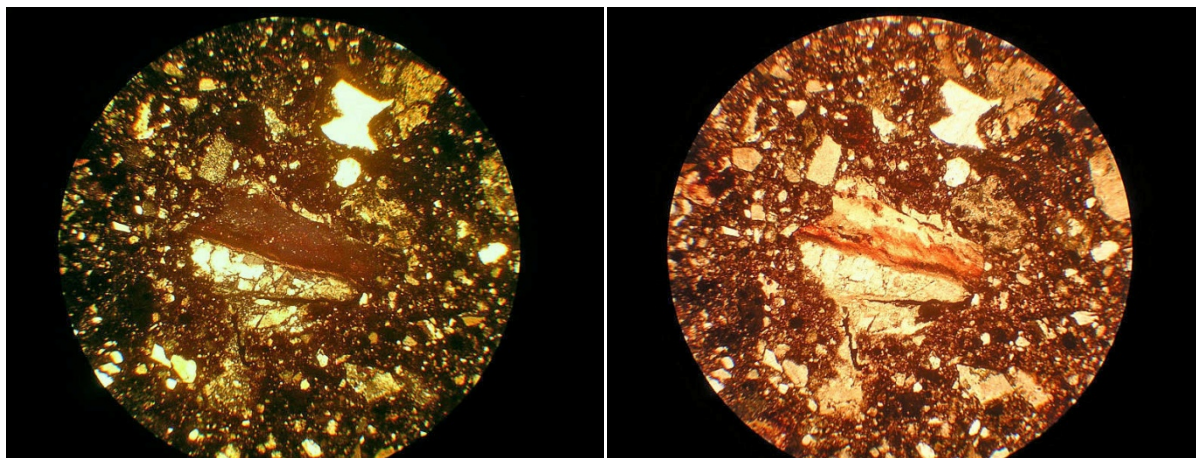


Fig. A6. Siljan impact structure, Bergkarlås thin section; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane polarized light. Glass particle in the very center.

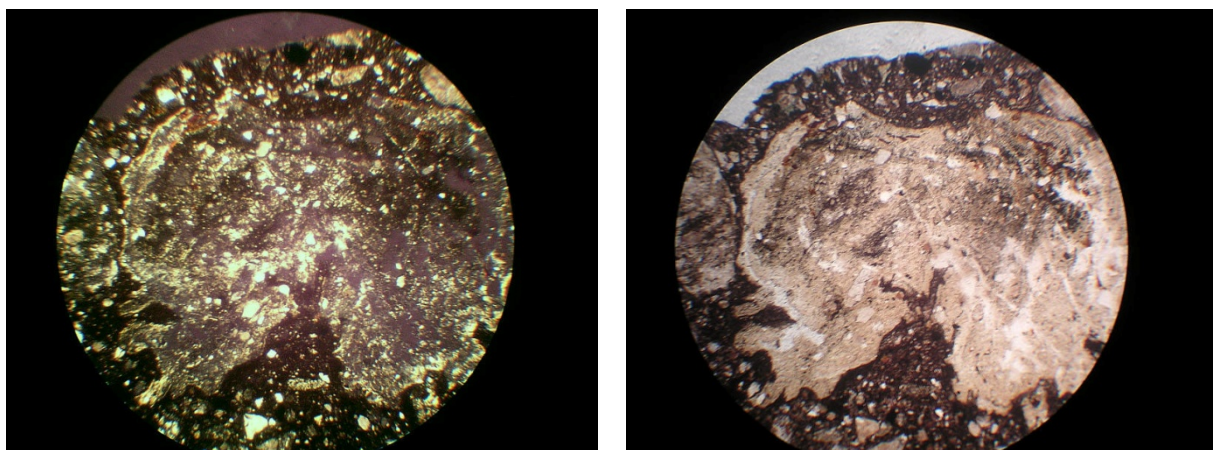


Fig. A7. Siljan impact structure, Bergkarlås thin section; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane pol. light. Larger melt rock particle.

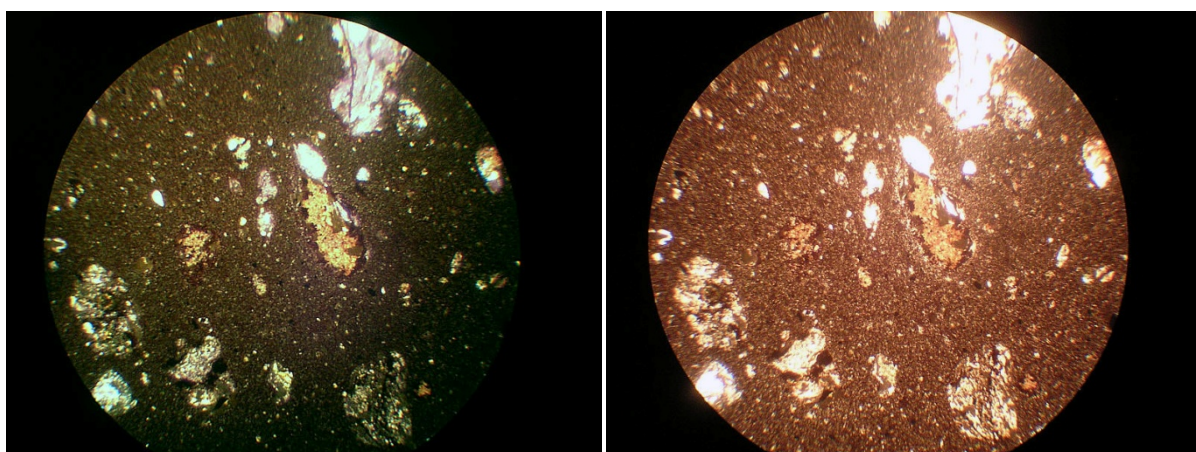


Fig. A8. Siljan impact structure, Trollberget thin section; field diameter 4 mm. Crossed polarizers and plane pol. light.

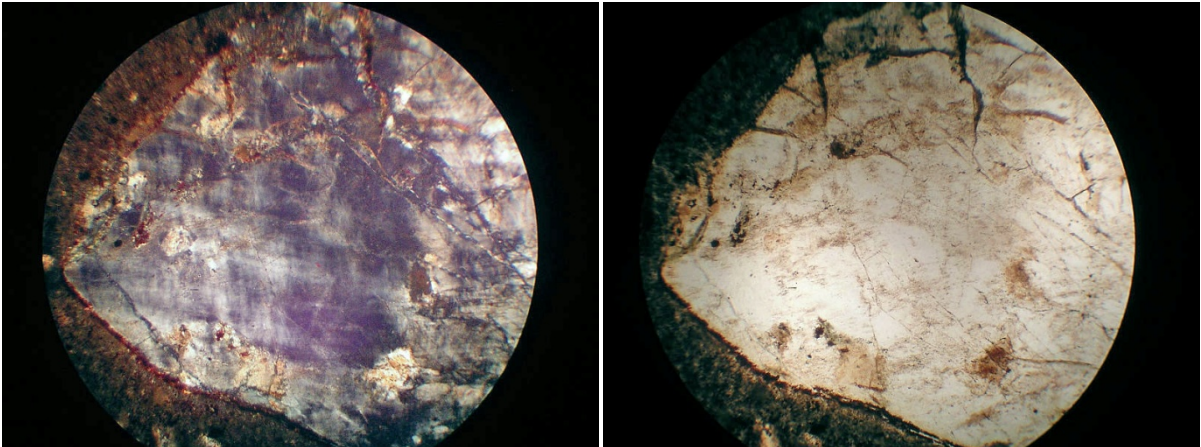


Fig. A9. Siljan impact structure, Trollberget thin section; field diameter 1.4 mm. Crossed polarizers and plane pol. light. Probably diaplectic quartz (partly isotropic crystal).

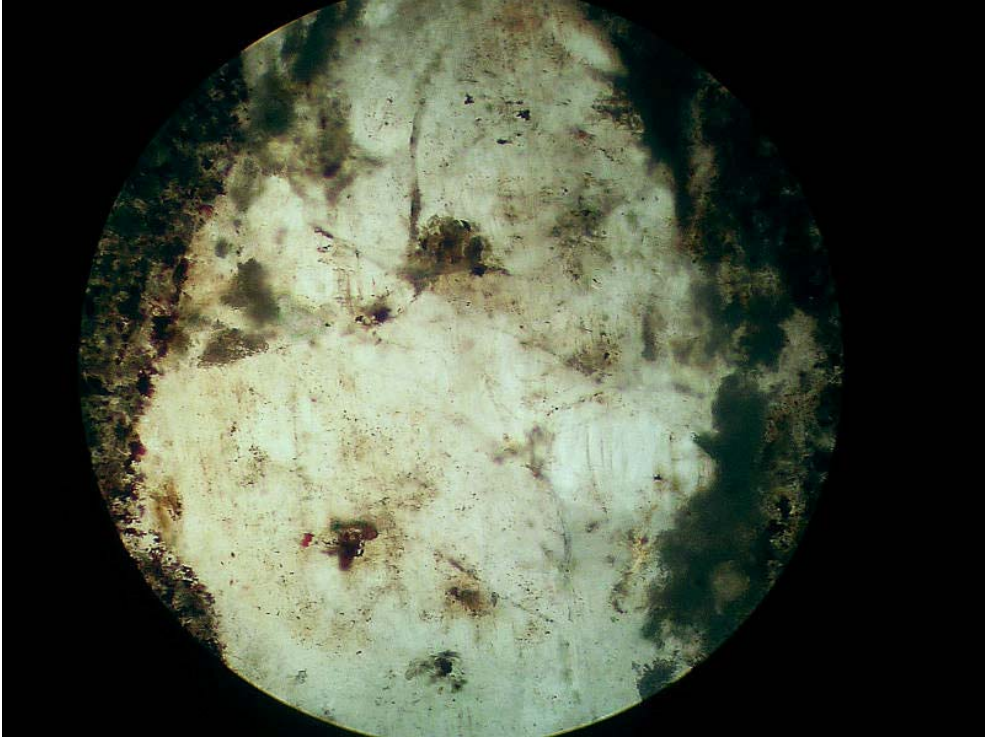


Fig. A10. Trollberget. Multiple sets of faint planar features in quartz, possibly PDFs.

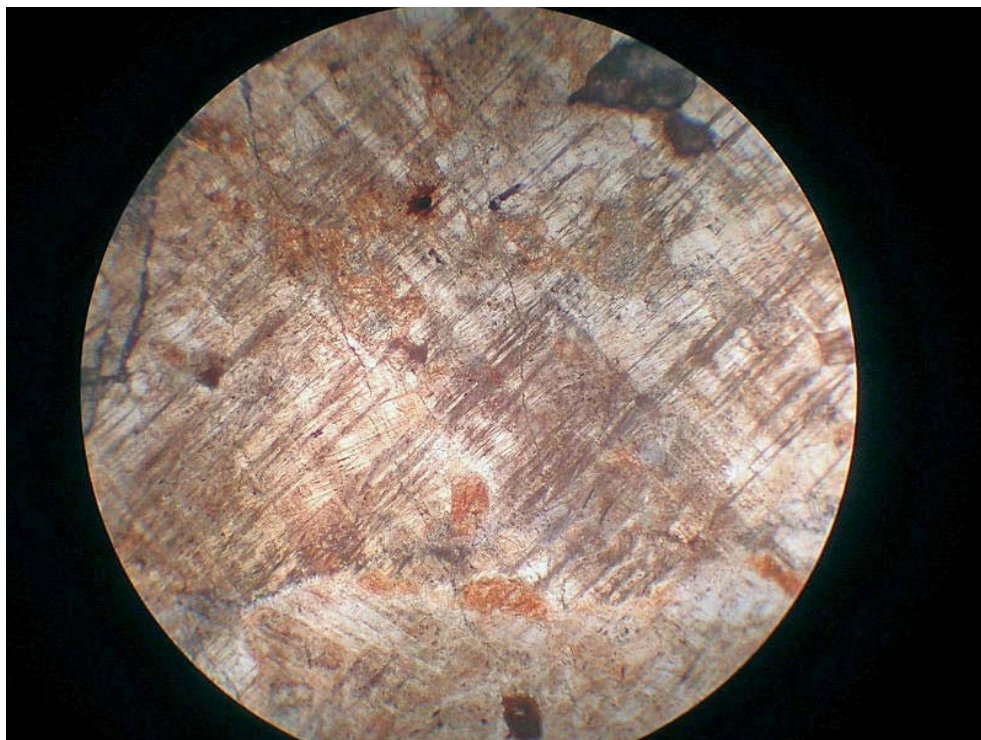


Fig. A11. Siljan 3 thin section, suevite; shocked plagioclase with deformation twins, planar fractures and multiple sets of PDFs. Detail in Fig. A12. Crossed polarizers, field diameter 1.4 mm.

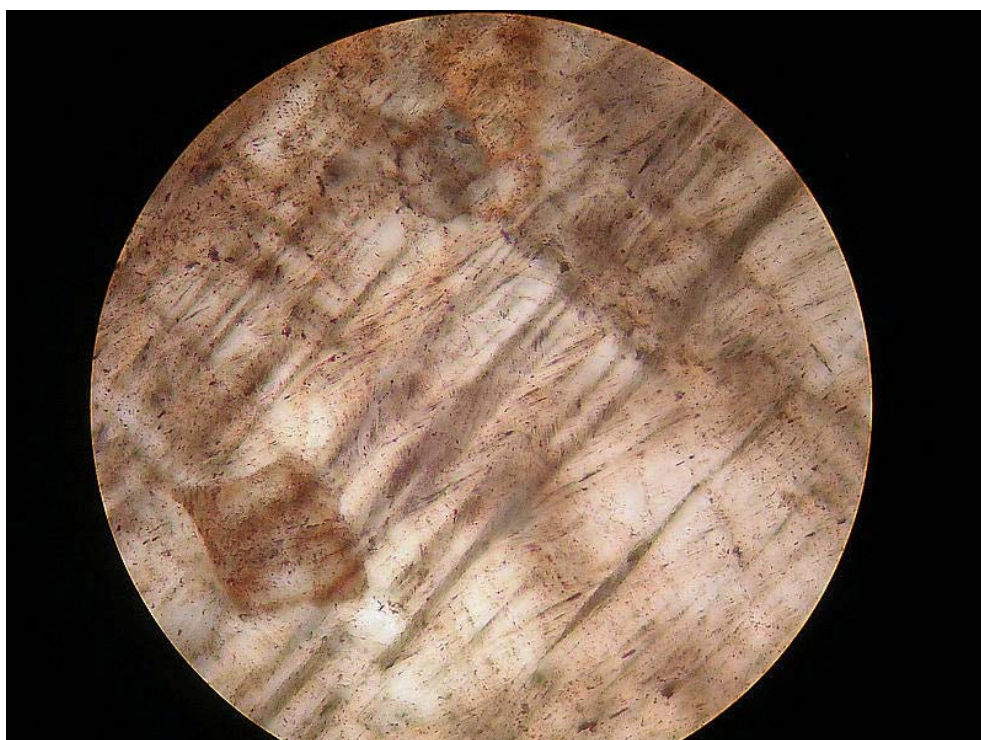


Fig. A12. Siljan 3 thin section, suevite; detail of shocked plagioclase in Fig. A11. Multiple sets of PDFs, partly showing typical "ladder" texture (see, e.g., B. French, Traces of Catastrophe). Field diameter 350 μm .

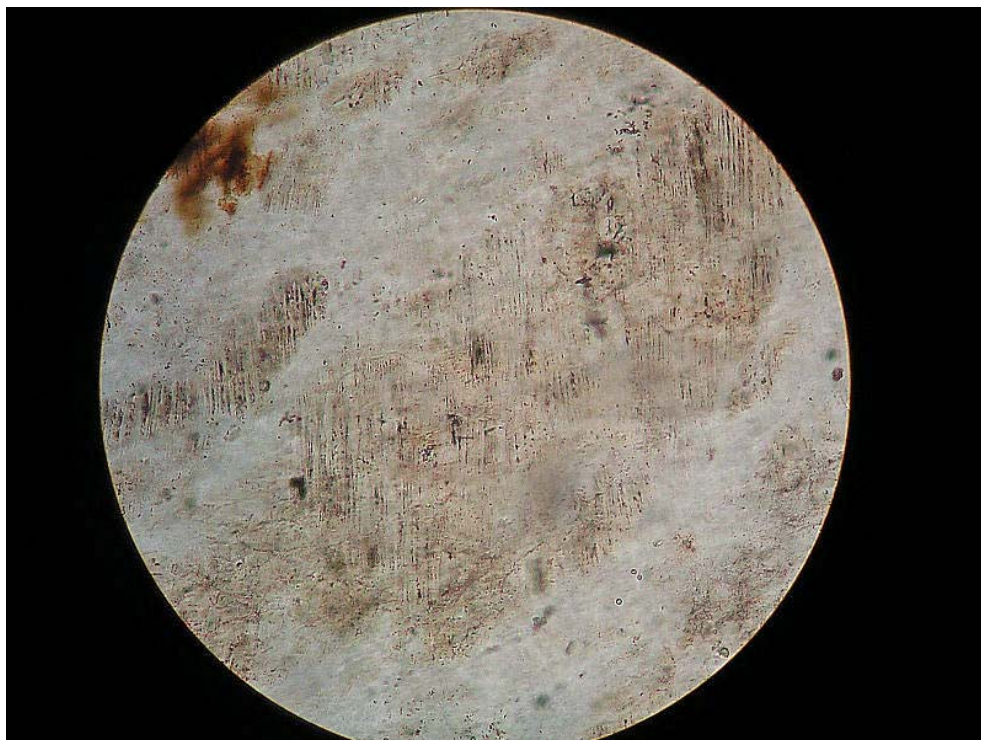


Fig. A13. Siljan 4 thin section. Planar deformation features in ?plagioclase; plane pol. light, field diameter 350 μm .



Fig. A14. Siljan 4 thin section. Planar deformation features in quartz; slightly rotated pol., field diameter 350 μm .

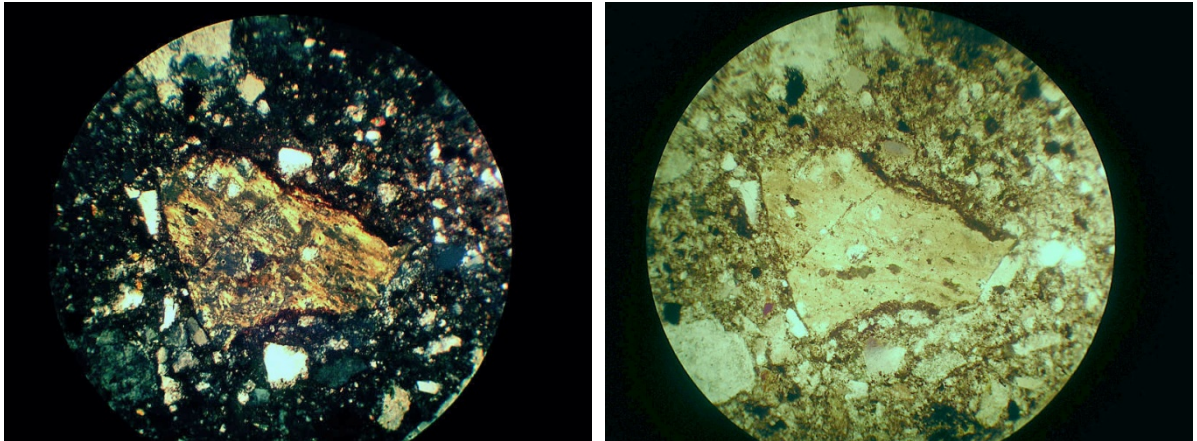


Fig. A15. Siljan 6 thin section. Probable melt particle; Crossed polarizers and plane pol. light; field diameter 1.4 mm.



Fig. A16. Siljan 6 thin section. Plagioclase with deformation features and matrix dikelet cutting through the grain; Crossed polarizers.