

Kan chockmetamorfos i okonventionella mineral hjälpa till att identifiera nedslagskratrar?

Ricky Barabas

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 673
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2024

Kan chockmetamorfos i okonventionella mineral hjälpa till att identifiera nedslagskratrar?

Kandidatarbete
Ricky Barabas

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2024

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Syfte/frågeställning	
2	Bakgrund	7
2.1	Nedslagskratrar	7
2.2	Chockmetamorfos och konventionella mineral	9
2.2.1	Slagkäglor	9
2.2.2	Planar fractures (PFs)	9
2.2.3	Planar deformation features (PDFs)	10
2.2.4	Högtrycks och temperaturdeformations strukturer i konventionella mineral	10
2.3	Okonventionella mineral	10
2.3.1	Ringwoodit	10
2.3.2	Vestait	11
2.3.3	Apatit och Merrillit	11
2.3.4	Magnetit	11
2.3.5	Kalcit	12
2.3.6	Titanit	12
2.3.7	Xenotim	12
2.3.8	Monazit	13
3	Metod	13
4	Resultat och diskussion	14
4.1	Resultat	14
4.2	Diskussion	15
4.2.1	Introduktion till discussion	15
4.2.2	Hur användbara är de okonventionella mineralen?	15
4.2.3	Är okonventionella mineral en del av framtidens forskning?	16
5	Slutsats	17
6	Tack	17
7	Referenser	17

Kan chockmetamorfos i okonventionella mineral hjälpa till att identifiera nedslagskratrar?

Ricky Barabas

Barabas, R., 2024: Kan chockmetamorfos i okonventionella mineral hjälpa till att identifiera nedslagskratrar?
Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet, Nr. 673, 15 hp.

Sammanfattning: När en himlakropp med hyperhastighet kolliderar med jorden skapas nedslagskratrar. Nedslagskratrar ger oss en inblick i hur jordens geologi har blivit påverkad av dessa storskaliga event. När nedslag sker omvandlas projektilens rörelseenergi till chockvågor som rör sig genom berggrunden och deformerar mineral. Detta fenomen har kommit att kallas för chockmetamorfos. Chockvågen skapar chockmetamorfa strukturer hos mängder av mineral. Dessa strukturer fungerar som verktyg för att identifiera nedslagskratrar. Konventionellt har chockmetamorfa strukturer i till exempel kvarts och zirkoner används för att identifiera nedslagskratrar. Denna rapport fokuserar på mineral som inte förekommer lika ofta i litteratur om chockmetamorfos och därav inte lika välstuderade som identifikationsmineral för nedslagskratrar. Genom litteraturstudier har nio okonventionella chockmetamorfa mineral identifierats som lämpliga för att användas som identifikations mineral för nedslagstrukturer. Dessa mineral finns i en rad olika bergarter och uppvisar tillsammans chockmetamorfa strukturer från både låga och höga tryck. Några av strukturerna som uppvisas i mineralerna är PDFs, PFs, PDBs och tvillingar. Genom att titta på för- och nackdelarna av dessa mineral jämfört med de konventionella mineralen drogs slutsatsen att många, om inte alla, av de undersökta okonventionella mineralen kan vara användbara som identifikationsmineral för nedslagskratrar.

Nyckelord: Nedslagskratrar, chockmetamorfos, chockvåg, chockmetamorfa strukturer, nedslag, okonventionella mineral.

Handledare: Sanna Alwmark

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Ricky Barabas, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: Ricky-barabas123@gmail.com

Can shock metamorphism in unconventional minerals help to identify impact craters?

Ricky Barabas

Barabas, R., 2024: Can shock metamorphism in unconventional minerals help to identify impact craters?
Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet, Nr. 673, 15 hp.

Abstract: When a celestial body with hyper speed collides with Earth it creates impact craters. Impact craters gives us an insight into these large-scale events affect Earth's geology. When impact occurs, the kinetic energy of the projectile is converted into shock waves that move through the bedrock and deforms minerals. This phenomenon has come to be known as shock metamorphism. The shock waves create shocked structures within a wide variety of minerals. These structures are used as tools for identifying impact craters. Conventionally, shock metamorphic structures, in for example quartz and zircons, have been used to identify impact craters. This essay focuses on minerals that does not appear as frequently in literature about shock metamorphism and are therefore not as well studied as identification minerals for impact craters. Through literature studies, nine unconventional shock metamorphic minerals have been identified. These minerals are found within a wide variety of rock types and together exhibit both low- and high-pressure shock metamorphic structures. Some of these structures exhibited in these minerals are PDFs, PFs, PDBs and twins. In a comparison of the pros and cons of these minerals with the conventional minerals it was concluded that many, if not all the examined minerals, can be useful as identification minerals for impact craters.

Keywords: impact, crater, shock metamorphism, shock wave, shockmetamorphic structures, unconventional minerals.

Supervisor(s): Sanna Alwmark

Subject: Bedrock Geology

Ricky Barabas, Geologiska institutionen, Lunds university, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-mail: Ricky-barabas123@gmail.com

1 Introduktion

1.1 Syfte/frågeställning

Denna rapport fokuserar på att hitta och vidare undersöka okonventionella chockmetamorfa mineral som kan användas för att identifiera nedslagskratrar som med dagens metoder är svåra att identifiera. Dagens svårigheter är att de flesta nedslagskratrar som studerats på jorden finns i bergarter som innehåller kvarts och där chockad kvarts används och studerats kraftigt. Medan nedslagskratrar i exempelvis basaltiska bergarter är svårare att identifiera på grund av avsaknaden av kvarts. Denna rapports målsättning är att genom litteraturstudier identifiera mineral med chockpåverkan, som idag är dåligt studerade men som kan ge nya möjligheter att identifiera nedslagskratrar och öka förståelsen av hur dessa storskaliga fenomen påverkat jorden.

2 Bakgrund

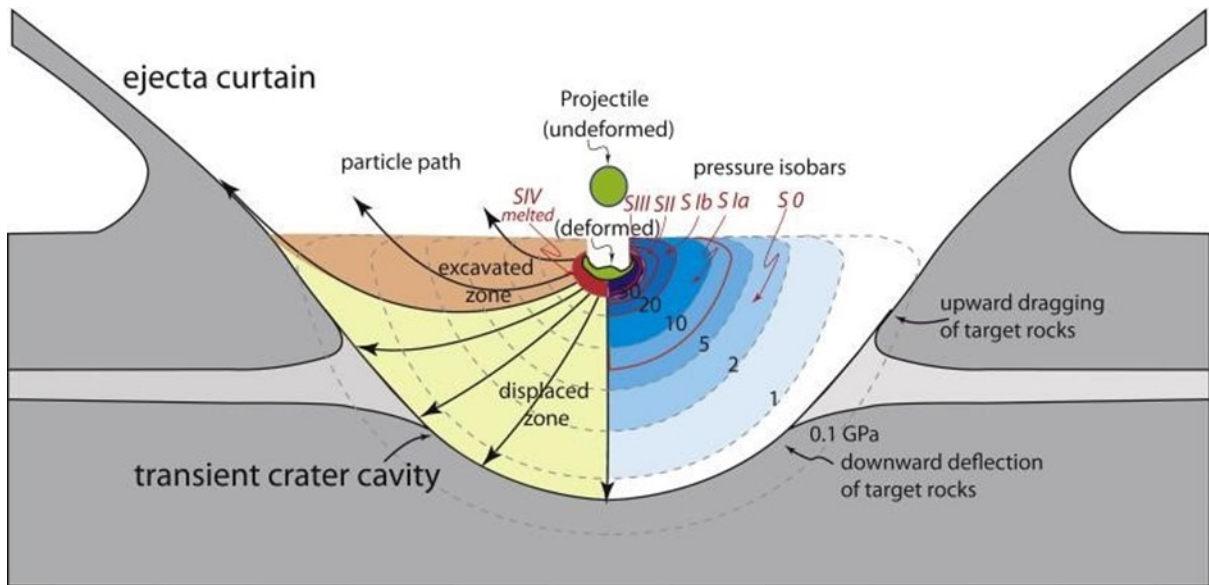
2.1 Nedslagskratrar

Jordens yta har formats av storskaliga händelser genom miljarder år, genom till exempel: jordbävningar, vulkanutbrott, plattetektonik och erosion. Jordens yta har även påverkats av astronomiska händelser i form av nedslag från utomjordiska kroppar. Under jordens historia har det skett många nedslag av himlakroppar. Tidigare ansågs dessa händelser som geologiskt ointressanta, men på senare tid har dessa processer som påverkat jorden blivit accepterade som en viktig faktor till jordens geologiska historia (French, 1998). Stora nedslag på jorden har påverkat jordens geologi genom skapandet av nya bergarter, deformation av jordskorpan, lett till ett massutdöende och även bildat storskaliga cirkulära geologiska formationer i form av nedslagskratrar (French & Koeberl, 2010). Nedslagskratrar har ett stort vetenskapligt värde för att förstå hur planeter har förändrats geologiskt genom deras historia men det finns även ett högt ekonomiskt värde i nedslagskratrar. Det ekonomiska värdet kommer sig av resurserna som kan utvinnas vid och från en nedslagskrater, bland annat uran, diamanter, kolväten och byggnadssten (French, 1998).

Nedslagskratrar bevisar och gör det möjligt att studera forna nedslag på jordens yta. Däremot har nedslagskratrar få exklusiva och särskilda drag och egenskaper som tydligt särskiljer dem från andra mer vanliga geologiska formationer. Dessa egenskaper är bland annat runda och cirkulära former i berggrunden, vulkanism, tektonisk deformation, gravitationsanomalier, formation av breccia och nya bergarter (French & Koeberl, 2010). Detta gör att otvetydig identifikation av nedslagskratrar ofta är svår och andra särskiljande effekter från nedslaget måste användas som kriterium för identifikationen av nedslagskratrar.

Det första steget av tre i hur en krater bildas är kontakt-kompressionsfasen. Denna fas är en kort period som sträcker sig från den tidpunkt när himlakroppen får den första kontakten med målberggrunden till den tidpunkt när kompressionen av projektilen som skapats upphör (Kenkmann et al., 2014). Under kompressionsfasen överförs den massiva rörelseenergin från projektilen till målberggrunden, vid den tidpunkt när projektilen når målberggrunden omvandlas denna rörelseenergi till kraftiga chockvågor. Dessa chockvå-

gor genereras vid nedslagspunkten och rör sig sedan halvsfäriskt ner i målberggrunden och utåt runt jorden. Trycket av chockvågen minskar med avståndet vågen rör sig, vid nedslagspunkten kan trycket uppgå till och överstiga 100 GPa (Gigapascal). Vid stora tryck förångas berggrunden och projektilen omedelbart. Chockvågen som skapats medför förändringar i både densitet, temperatur och tryck. Dessa chockvågor skapar även andra förändringar i berggrunden och mineral. Denna process skapat av chockvågen kallas för chockmetamorfos och de strukturer och/eller texturer man kan se efteråt i mineral är chockmetamorfa strukturer. Andra steget i en kraters uppbyggnad är utgrävningsfasen. Denna fas sker i samband med chockvågens expansion och spridning ifrån nedslagspunkten. Det träffade materialet blir kraftigt sammantryckt och accelererat, materialet närmast nedslagspunkten trycks då uppåt och utåt från centrum och kastas ut från den påbörjade kratern (figur 1), detta material kallas för *ejecta*. Material från berggrunden som ligger djupare ned under nedslagspunkten blir dock inte *ejecta*. Det kompakteras och tränger vidare nedåt i berggrunden och förkastar även underliggande berggrund nedåt (Kenkmann et al., 2014).



Figur 1. Krater formation. Illustration av hur projektilen trycker samman materialet och hur det utkastade materialet (ejecta) transporteras. Orange zon visar zonen där materialet som kommer kastas ut och bli en del av ejecta curtain. Gul zon visar den del av kratern där materialet kommer att kompakteras och förkastas nedåt. Illustration från Kenkmann et al (2014).

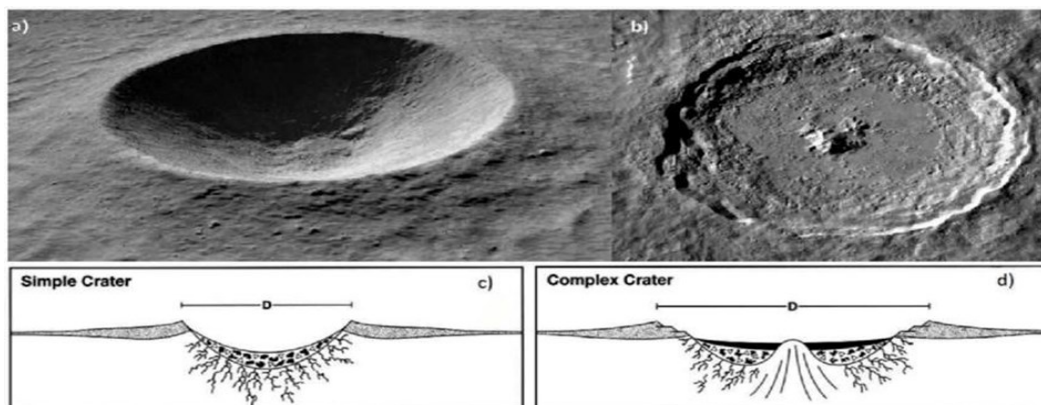
Det är endast den övre tredjedelen av det påbörjade hålrummet som blir *ejecta* (figur 1) (Kenkmann et al., 2014). Först sprids materialet som är närmast nedslagspunkten. Detta material kommer att spridas längst och snabbast, material som kastas ut längre ifrån nedslagspunkten kommer att spridas med en lägre hastighet och deponeras intill kraterns kant som den del av *ejecta blanket* (figur 1) (Kenkmann et al., 2014). Utgrävningen av kratern försvagas och tar slut när rörelseenergin minskar till den punkten där den inte räcker till för att förflytta material ytterligare. Denna fas resulterar i en initial krater som är ostabil. Den resulterande kratern kan ha en storlek några gånger större än projektilens diameter till flera hundratals gånger projektilens diameter, detta avgörs av projektilens storlek, densitet och nedslagshastighet. Efter förflyttningen av material i utgrävningsfasen kommer det sista och slutgiltiga fasen i en kraters uppbyggnad, modifieringsfasen. I denna fas modifieras kraterns struktur genom att den utåtriktade kraften avtar och gravitationskrafter

övertar vilket får kraterns kanter och väggar att kollapsa inåt. Denna fas påbörjas när utgrävningsfasen upphör. Utgrävningsfasen kan dock upphöra under olika tidpunkter runt om i kratern.

Gravitationskrafter är det som styr hur mycket kratern modifieras under denna fas. Skillnader i storlek av den initiala kratern påverkar också hur kraterns slutgiltiga struktur och form kommer att se ut (Kenkmann et al., 2014).

Vid mindre nedslag är den slutgiltiga kratern oftast skålformad och vid större nedslag får kratern en plattare botten. Nedslagskratrar kan vara små formationer på enstaka kilometer i diameter men även storskaliga komplexa geologiska formationer som sträcker sig hundratals kilometer i diameter (French, 1998). Strukturen på nedslagskratrar kan också variera beroende på hur mycket modifiering som skett i den sista fasen, de två vanligaste typerna är enkla och komplexa kratrar (figur 2).

En enkel krater har en skålformad struktur med för-



Figur 2. Enkla och komplexa kratrar (French, 1998). a) en enkel krater med typisk skålformation sedd ovanifrån. b) En komplex krater där den centrala punkten är förhöjd sedd ovanifrån. c) Enkel krater sedd från sidan. d) Komplex krater sedd från sidan. Figur från French (1998).

höjda kanter, med linsformad smältbärande breccior i botten av skålfformationen samt *ejecta* från målberggrunden utanför kratern (figur 2) (French, 1998). En komplex krater har en förhöjning av den centrala nedslagspunkten där omkringliggande berggrunden är platt (figur 2) (Kenkmann et al., 2014). Komplexa kratrar kan också delas in i olika kategorier beroende på deras storlek och struktur. Komplexa kratrar med en mindre storlek och en förhöjd central punkt kallas för *central peak* kratrar, mellanstora kratrar som har en central cirkulär ring av toppar i stället för en topp kallas för *peak ring basin*. De absolut största komplexa kratrarna har flera upphöjda ringar kring kraterns centrum och dessa kallas för *multi-ringed basins* (Kenkmann et al., 2014).

2.2 Chockmetamorfof och konventionella mineral

Chockvågen som skapats vid nedslag påverkar kraterns uppbyggnad, men även bergarterna och mineral i målberggrunden påverkas genom chockmetamorfof. Chockvågens tryck mäts i Gigapascal (GPa) vilket är 10^9 Pascal. Chockmetamorfof definieras av French (1998) som "alla förändringar i mineral och bergarter resulterande från passagen av övergående, högtrycks-chockvågor". Chockmetamorfof förekommer inte från några andra geologiska fenomen. Endast en projektil som behåller sin ursprungs hastighet vid kollision med en annan himlakropp skapar detta fenomen (French & Koeberl, 2010). Chockmetamorfa effekter i bergarter och mineral kan dock återskapas i laboratorium och av kärnvapenexplosioner. Chockmetamorfa effekter i mineral och bergarter är inte alltid lätta att särskilja från de effekter som kan skapas av andra geologiska fenomen, detta speciellt när det kommer till strukturer och texturer av lägre chockmetamorfa tryck förhållanden (French & Koeberl, 2010). Några av de vanligaste mineral som används för att identifiera nedslagskratrar är skrivna i tabellen nedan (tabell 1). Dessa mineral kan därför kallas för konventionella chockmetamorfa mineral så som i tabellen nedan.

Tabell 1. Sammanställning av konventionella mineral med kemiska formler.

Konventionella mineral	Kemisk formel
Kvarts	SiO_2
Zirkon	$\text{Zr}(\text{SiO}_4)$
Coesit	SiO_2 (HP polymorf)
Stishovit	SiO_2 (HP polymorf)

2.2.1 Slagkäglor

Olika diagnostiska chockmetamorfa effekter produceras av olika tryck. Nästan alla strukturer och texturer som produceras av chockmetamorfof går endast att se på en mikroskopisk skala, undantaget är slagkägglor (Kenkmann et al., 2014). Slagkägglor bildas vid relativt låga tryck, ungefär mellan ≥ 2 GPa – ca 30 GPa. Slag-

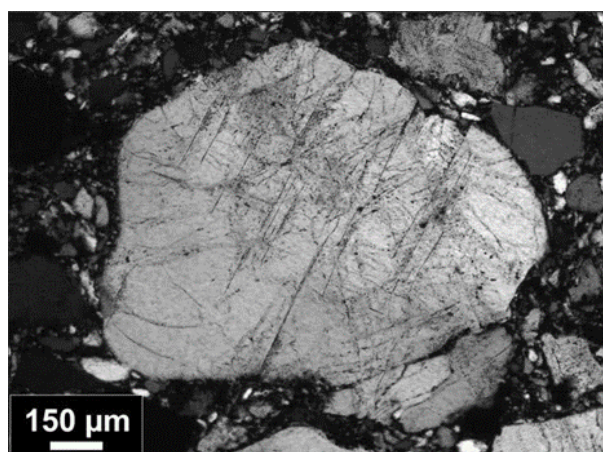
kägglor är distinkta koniska strukturer med räfflade sidor (figur 3) (French & Koeberl, 2010). Slagkägglor används idag som den enda makroskopiska strukturen producerad under kraterbildning för att identifiera nedslagskratrar (French & Koeberl, 2010). Resterande diagnostiska effekter av chockmetamorfof är mikroskopiska, dessa effekter används och studeras som bevis för att ett nedslag skett.



Figur 3. Slagkägla (French & Koeberl, 2010). Slagkägla från nedslagskrater med skala på 4 centimeter, bilden är tagen med vanlig fotokamera. Bild från French & Koeberl (2010).

2.2.2 Planar fractures (PFs)

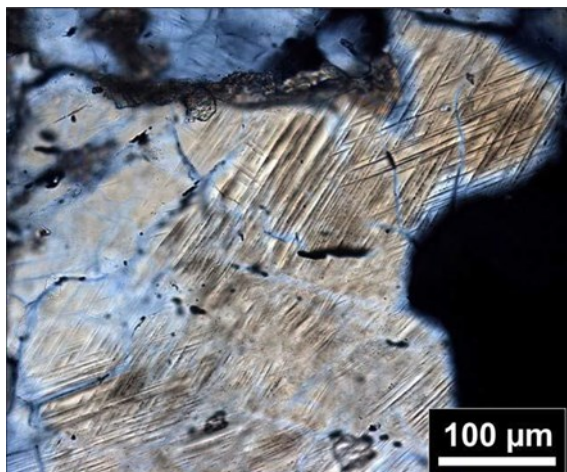
Vid lägre chocknivå (<10 GPa) kan PFs förekomma i kvarts. Strukturen syns som små parallella öppna sprickor i kornen (figur 4). Sprickorna förekommer i en eller flera riktningar, i varje kvartskorn. Sprickorna är raka och parallella med varandra och kvartskornens naturliga spaltplan. PFs förekommer oftast som tunna, öppna men kan även ibland vara ifyllda med andra mineral. PFs har en bred utsträckning i kvartsbärande berggrunder och bildas under relativt låga tryck, detta gör att PFs i kvartskorn kan användas som ett identifikationskriterium för nedslagskratrar (French & Koeberl, 2010).



Figur 4. Planar fractures (PF) i kvarts (French & Koeberl, 2010). Svartvitt foto av planar fractures i ett kvartskorn taget i ett planpolariserat ljus (PPL) mikroskop från French & Koeberl (2010).

2.2.3 Planar deformation features (PDFs)

PDFs är en annan typ av chockmetamorfa strukturer som bildas vid högre chocktryck än PFs (10 – 30 GPa) (French & Koeberl, 2010). Denna struktur framträder som tunna parallella streckliknande stråk på kvartskornen. Vid noga inspektion är individuella PDFs tunna som 1 mikrometer i bredd och varje PDF separeras med några mikrometer. PDFs kan identifieras genom att PDFs är orienterade parallellt med specifika plan i kristallgittret. PDFs i kvartskorn är en av de vanligaste och mest använda kriterierna för identifikation av nedslagskratrar. Det beror på att kvarts finns i många olika bergarter och för att PDFs bildas under ett brett tryckintervall (10 – 30 GPa) (French & Koeberl, 2010). Dessutom sprids chockvågor på dessa tryck genom en stor volym av målbergrunden, samt att kvarts är relativt simpelt optiskt. PDFs förekommer även i andra mineral än kvarts varav vissa är: Sillimanit, granat, zirkon och apatit (French & Koeberl, 2010). Andra PDF-liknande chockmetamorfa strukturer återfinns även i vissa mafiska mineral, som pyroxen och amfibol (French & Koeberl, 2010).



Figur 5. Planar deformation features (PDF) i ett kvartskorn. Bilden är tagen i ett (PPL) mikroskop. Bild från French & Koeberl (2010).

2.2.4 Högtrycks och temperaturdeformations strukturer i konventionella mineral

Det finns flertalet andra strukturer och texturer som kan bildas av de höga tryck och temperaturer som uppstår under chockmetamorfof. Vid chocktryck mellan 30–50 GPa omvandlas mineral som till exempel kvarts och fältspater till formlösa glasliknande faser (French & Koeberl, 2010). Detta sker helt utan att mineral smälter, denna mineralfas kallas för diaplektiskt glas. Ett känt och välstuderat exempel på detta är maskelynit som är diaplektiskt glas av fältspat, som ofta förekommer både i chockade meteoriter/asteroider och nedslagstrukturer på jorden. Ofta förekommer detta glas tillsammans med kvarts som genomgått samma förändring. Denna förändring sker som sagt endast som följd av de höga trycken från chockmetamorfof och inte på grund av smältning genom höga temperaturer (French & Koeberl, 2010). Det kan dock vara svårt att identifiera diaplektiskt glas i mikroskop

när man endast studerar tunnslip, för identifikation av mineral i denna fas behövs andra verifieringsmetoder (DeCarli, 2005). Några av dessa komplementerade metoder kan vara studerandet av ett minerals brytningsindex, användning av röntgendiffraktion eller användandet av transmissionselektronmikroskop (French & Koeberl, 2010).

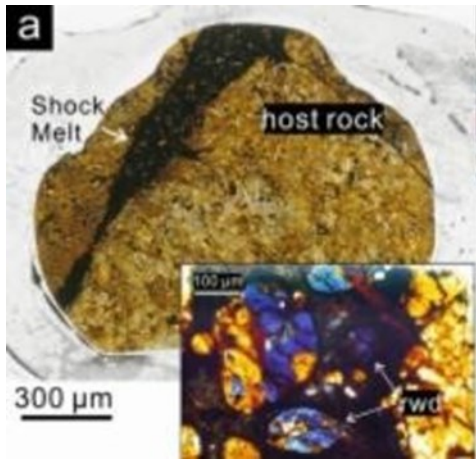
Högtrycksfaser och former av andra mineral kan också förekomma som följd av chockmetamorfof. Bland de mest välstuderade exemplen på detta är coesit och stishovit, dessa mineral är högtrycksformer av kiseloxid (SiO_2). Ytterligare exempel är diamanter som bildats genom att chockvågen omvandlat grafit i bergarten till små mikroskopiska diamanter. Dessa diamanter har ofta hittats i nedslagsformationer. Man behöver dock vara försiktig vid användandet av ovan nämnda mineral som identifikation för nedslagskratrar eftersom de kan förekomma i djupberggrunder, som har utsatts för höga statiska tryck och temperaturer under en lång tidsperiod. Däremot, om coesit eller nedslagsdiamanter skulle förekomma på ytan eller i grunda bergarter kan det vara bevis för att ett nedslag skett på platsen (French & Koeberl, 2010).

Zirkon är ett bra exempel på ett konventionellt mineral som har flera högtrycksfaser som kan användas för identifikation av nedslagskratrar. Zirkonformen reidite har hittats i minst fem nedslagskratrar (Miyahara et al., 2021). Genom experiment bestående av chockåterhämtning har forskare kommit fram till att zirkon omvandlas till reidite vid tryck över 30 GPa. Högtrycksfaser av zirkon kan hjälpa forskare att förstå chockmetamorfa strukturer i nedslagskratrar bättre eftersom det är ett stabilt mineral som kan motstå vittring (Miyahara et al., 2021).

2.3 Okonventionella mineral

2.3.1 Ringwoodit

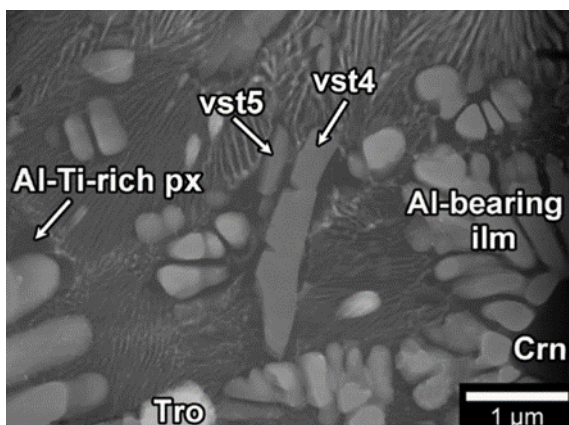
Högtrycks mineral är mineral som skapas under höga tryck (Hu & Sharp., 2021). Dessa mineral har använts för att visa chockmetamorfof i nedslagskratrar och meteoriter, tidigare specifikt för väldigt höga chocktryck (S6). S klassifikationen är typ en av klassifikationssystem som använts för att mäta hur kraftigt påverkad en meteorit varit av chockmetamorfof. Detta är en skala från S1 till S6 utformad av Stöffler (1991). Där S1 är det lägsta chockstadiet (ej chockat <5 GPa) till S6 (väldigt chockat <75 GPa) (Hu & Sharp., 2021). Ett HP mineral som använts för att identifiera chockmetamorfof av graden S6 tidigare är ringwoodit. Detta mineral fokuserar Hu & Sharp (2021) närmare på. Ringwoodit är en högtryckspolymorf av olivin, som ofta uppträder som små blå korn (figur 6) i chockmetamorfa ådror av smälta i meteoriter från bland annat Mars. När Hu & Sharp tittade närmare på andra prover innehållande ringwoodit funnits kom de fram till att mer än 70 % av de meteoriter som innehållit ringwoodit visat en chockgrad i S4 stadiet i stället för S6. Detta tillsammans med den tydliga blå färgen gör att ringwoodit kan fungera som identifikationsmineral för medelhöga chockmetamorfa tryck i kondritter och andra meteoriter (S4)(Hu & Sharp., 2021).



Figur 6. Ringwoodit (rwd) i moderbergart och under mikroskop. a) Moderbergart med smälta. (Liten bild) ringwoodit som blå små korn (PPL).

2.3.2 Vestait

Vestait är ett nytt upptäckt mineral som hittats i den basaltiska eukriten (stenig meteor) NWA 8003 från 2013 (Pang et al., 2018). Eukriten består av bland annat pyroxen och plagioklas, men innehåller många andra accessoriska mineral som till exempel, ilmenit, chromit, zirkon, apatit och merrillit. Andra chockmetamorfa mineral som visar på höga tryck har även påträffats i eukriten, exempelvis coesit och stishovit. Vestait hittades i fickor av titan (Ti) rik smälta omringat av högtrycksformer av plagioklas, ilmenit och augit. Vestait innehåller järn och titan, genom TEM-EDX analyser kom man fram till att den kemiska strukturen för vestait är: $(\text{Ti}^{4+}\text{Fe}^{2+})\text{Ti}_4\text{O}_9$. Genom studien som Pang et al (2018) gjort kristalliserar vestait under chocktryck på ca 10 GPa. Vestait förekommer tillsammans med tissanit som också är ett högtrycksmineral. Detta tillsammans med dess kemiska sammansättning och morfologi pekar på att vestait måste ha kristalliserats från en titanrik smälta (Pang et al., 2018).



Figur 7. Vestait (vstx) i smälta. Bilden är tagen genom ett HAADF-STEM mikroskop. Bild från Pang et al. (2018).

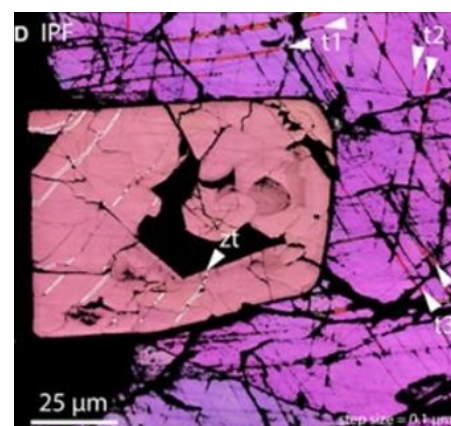
2.3.3 Apatit and Merrillit

Mineral som apatit, monazit och xenotim är några av de många accessoriska mineral som börjat användas

som bevis för nedslagskratrar, på grund av deras förmåga att bibehålla mikroskopiska effekter från chockmetamorfos. Apatit och Merrillit är två mineral som började användas för att utöka kunskapen om planeters geologiska evolution (Darling et al., 2021). Båda är kalciumfosfatmineral och studien som Darling et al gjorde 2021 fokuserar på chockmetamorfa strukturer i klorapatit samt merrillit. Studien visar på att de chockmetamorfa strukturerna varierar kraftigt inom och mellan tunnslip. Detta förklaras genom att chockvågen distribueras heterogent i berggrund. De chockmetamorfa strukturerna som hittades för apatit var PDFs och omkristallisation. Merrillitkorn uppvisade PFs och omkristallisation. Tunnslipen visade även felorientering i kornen med förändrad orientering på totala grader både apatit och merrillit. Varav den sistnämnda hade en högre tendens att forma neoblastar, detta på grund av upphettningen från chockvågen. Genom kemiska mätningar och klorisotopdata har författarna visat på att det finns ett sammanhang mellan chockmetamorfos och kemiskt utbyte av kloridrika vätskor i apatit. Förändringar av $\delta^{37}\text{Cl}$ isotophalten visar också på att chockmetamorfos har varit en faktor till förändringar i isotopförhållandena i kalciumfosfater (Darling et al., 2021).

2.3.4 Magnetit

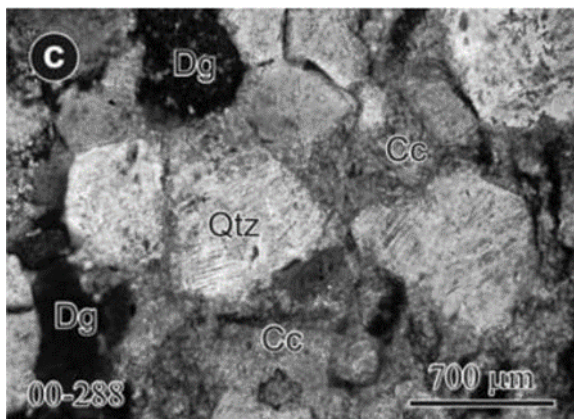
Även magnetit är ett accessoriskt mineral som existerar i flera bergartstyper. Det är genom magnetits magnetiska egenskaper som man studerar bland annat de magnetiska anomalierna som man ofta finner vid nedslagskratrar (Holm-Alwmark et al., 2021). En studie gjordes på nedslagskratern Siljan i Sverige, då undersöktes chockmetamorfa strukturer på magnetit. Den viktigaste chockmetamorfa strukturen som hittades var tvillingar i magnetit (figur 8), tvillingarna hade en bredd på ca 5 mikrometer och korsade ofta varandra. Mellanrummen mellan varje tvilling var ca 2–3 mikrometer och tvillingarna kunde sträcka sig över hela kornets längd. Dessa chockmetamorfa strukturer hos magnetitkornen skapade av chockvågen kan uppstå under många olika chockmetamorfa tryck. Redan på låga chockmetamorfa tryck (ca 5GPa) kan viss tvillingbildning ske (Holm-Alwmark et al., 2021).



Figur 8. Tvillingar i chockad zirkon (zt) och magnetit (t). Lila områden är magnetit och rosa områden är zirkon. Pilarna indikerar tvillingar. Tagen med BSE mikroskop. Bild från Holm-Alwmark et al (2021)

2.3.5 Kalcit

Kalcit ett annat okonventionellt mineral när det kommer till studier av nedslagskratrar. Det är bland annat ett cementerande mineral i många sandstenar. I Osinskis studie från 2007 har sandstenar från Haugton strukturen i Kanada undersökts för chockmetamorfa strukturer, där strukturerna skapade av chockmetamorfof och "impactmetamorfof" hos kalcit varit fokus (Osinski, 2007). Vid låga chockmetamorfa tryck, klass 1 (<5,5 GPa) ökade densiteten av mekaniska tvillingar samtidigt som kornens storlek minskade. När de chockmetamorfa trycken ökade upp till ca 10 GPa (klass 2) hade kalcit blivit nedsmulat till finkorniga kalcit korn som författaren har valt att kalla "mikrobreccia" (Cc) (figur 9). Vid tryck mellan 10 och 20 GPa (klass 3) saknas det mekaniska tvillingar i kalcit. Dessutom uppträder kalcit som grövre korn och återfinns i kristallina former med en euhedral form eller som mindre "droppar" i en glasig smälta. Vid denna klass verkar kalcit kornen att ej vara påverkade av chockmetamorfof då de tidigare nämnda diagnostiska strukturerna saknas, men resultaten indikerar också på att en viss smältning av kornen skett. Vid högre tryck efterliknas strukturen och kornstorlekarna hos kalcit de som uppträder mellan 10 och 20 GPa (Osinski, 2007).

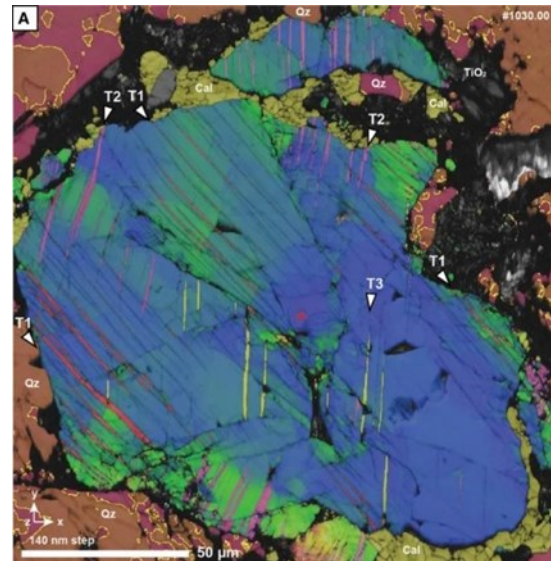


Figur 9. Svartvit bild på sandsten under polarisationsmikroskop (XPL). Mikrobreccia kalcit (Cc), Diaplectic glass (Dg), Kvarts (Qtz). Bild från Osinski (2007).

2.3.6 Titanit

De chockmetamorfa effekterna i ett annat mindre använt mineral är titanit. Titanit är ett monokliniskt mineral vid normala förhållanden och har en ett spaltplan längst $\{110\}$ och kan forma tvillingpar $\{100\}$ (Timms et al., 2019). Vid relativt låga chocktryck på ca 0.5 - 0.8 GPa kan deformationstvillingar formas i titanit (Timms et al., 2019). Timms et al (2019) undersökte fyra titanitkorn, kornen av varierande storlek som inklusioner i och mellan chockade korn av kvarts och fältspat (figur 10). Kornen hade flera par av deformationstvillingar (figur 10) och förtjockning av tvillinglamineringarna. Den typ av deformation som fanns i titanitkornen har inte tidigare rapporterats från naturlig tektonisk deformation, vilket kan betyda att deformationen skett på grund av chockmetamorfof. Genom jämförelse av kvartskorn i tunnslipet tolkades det att

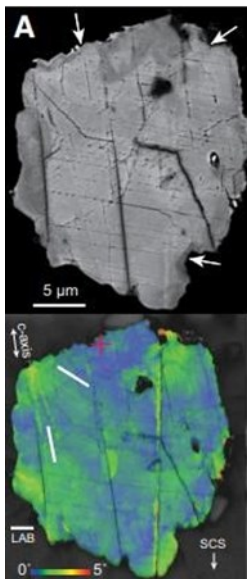
titaniten är chockad vid ungefär 14 GPa. Tvillingarna längs $\{111\}$ och $\{130\}$ skiljer sig kraftigt från tvillingar skapade av tektonisk deformation. Därför finns då en bra möjlighet för titanit att användas som identifikationsmineral för nedslagskratrar (Timms et al., 2019).



Figur 10. Tvillingar i titanit. Pilarna indikerar tvillingar i titanit kornen. Bilden är en EBSD map av titanit, från Timms et al (2019).

2.3.7 Xenotim

Xenotim är ett accessoriskt mineral som nyligen studerats i chockmetamorfa kontexter. Granitprover från Santa Fe-kratern New México i USA innehöll bland annat chockad kvarts och slagkägglor (Cavosie et al., 2016). Tunnslip av bergartsprover från kratern innehöll många andra klassiska konventionella identifikationsmineral som blivit påverkade av chockmetamorfof samt accessoriska mineral som xenotim och zirkoner. Mineralen xenotim hittades som inneslutningar i både muskovit och fältspat. Kornen är små och varierar i storlek mellan 28 - 50 mikrometer. Vid närmare analys hittades flera typer av mikrostrukturer, bland annat PFs, planar deformation bands (PDBs). PDBs hittades i ett av kornen och tvillinglamineringar kunde identifieras i vissa av kornen. De PFs som hittades i kornen låg tätt intill varandra, med mellanrum på ca 0,5 mikrometer (figur 11). De PDBs som hittades indikerar genom orientering att de bildats genom chockmetamorfof, jämfört med zirkoner med samma deformations mönster. Tvillinglameller som identifierades i några av kornen är som 100 nanometer och är $\{112\}$ tvillingar. Genom slagkägglorna som tunnslipen producerades från samt graden av deformation som hittades i kvartskornen kunde en uppskattning på hur högt trycket från chockvägen varit när xenotimkornen deformerats fastställas. Deformationsstrukturerna i xenotim tros därför skapats under tryck mellan 5-20 GPa (Cavosie et al., 2016).



Figur 11. Bild på xenotimkorn ovan (BSE) orientation map under. Pilarna indikerar orienteringen av PFs i kornet. Bild från Cavosite et al. (2016).

ionella mineral är för något efterforskades det flitigt på hemsidor som Web of Science och Lubsearch, detta för att hitta många artiklar som möjligt som diskuterar chockmetamorfa mineral som även används som ett kriterium för identifiering av nedslagskratrar. När man kommit fram till vilka de konventionella chockmetamorfa mineralen är påbörjades sökandet efter mindre efterforskade mineral. Ju nyare en artikel är desto högre är chansen att man hittar någon ny forskning som visar på nya chockmetamorfa effekter på mineral som inte tidigare är speciellt efterforskade. Målet är att hitta forskning som kan hjälpa till att fylla ut tomrummen där konventionella mineral misslyckats, även hopp om att dagens okonventionella mineral kan bli morgondagens konventionella chockmetamorfa identifierings mineral. När dessa okonventionella mineral hittades, valdes lämpliga artiklar ut för att användas som bakgrundsfakta samt som resultat.

2.3.8 Monazit

Monazit är ett accessoriskt mineral som förekommer i metamorfa, sedimentära och magmatiska bergarter. Monazit har flertalet chockmetamorfa strukturer som indikerar olika tryck, till exempel tvillingar, omkristallisation och deformation av kristallgittret (Erickson et al., 2017). Tvillingar är den mest betydande chockmetamorfa strukturen hos monazit, med några av tvillingarnas orientering i $\{101\}$, $\{110\}$ och $\{212\}$. Dessa tvillingar skiljer sig från dem som hittas i tektoniskt deformationerad monazit vilket gör att de fungerar som ett diagnostiskt verktyg för att indikera chockmetamorfos i monazitkorn. Utöver detta hittades även PDBs i monazitkorn. Zirkoninklusioner i monazitkorn uppvisade $\{112\}$ tvillingar. För att denna struktur i zirkon ska bildas krävs ett tryck av minst 20 GPa. Proverna som de chockade monazitkornen fanns i togs från nedslagskratern Vredefort, Syd-Afrika. Tidigare studier har visat att kratern varit utsatt för ett tryck på minst 30 GPa i dess centrala delar. I en annan studie som Seydoux-Guillaume et al utförde 2022 jämfördes naturliga chockmetamorfa strukturer i monazit med de effekter som framställs genom att experimentellt chocka monazit. Även då hittades samma deformation tvillingar, PDBs samt mosaicism i flera av de studerade kornen (Seydoux-Guillaume et al., 2022). Monazit är även tåligt mot radioaktiv strålning och kan behålla kristallin struktur över långa geologiska tidsperioder, vilket gör det till ett bra mineral för chockmetamorfa studier (Seydoux-Guillaume et al., 2022).

3 Metod

Efter att ha valt ämnet ”chockmetamorfos i okonventionella mineral” påbörjades grundlig efterforskning. Till en början hittades och lästes artiklar och tidskrifter som behandlade ämnet brett. Söktermer som ”shock metamorphism”, ”impact metamorphism” och ”shocked minerals” användes. I början krävdes även grundläggande kunskap om själva nedslags eventen som skapar chockmetamorfos. Då användes *“Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures”* skriven av French B.M. 1998. För att sedan förstå vad okonvent-

4 Resultat och diskussion

4.1 Nedslagskratrar

Tabell 2. Sammanställning av mineral med chockpåverkan

Konventionella mineral	Kemisk formel	Vanliga berggrunder	Estimerat chocktryck	Chockmetamorfa strukturer	Referenser
Kvarts	SiO ₂	Magmatisk, sedimentär, felsiska berggrunder	<10 - 50 GPa	PFs, PDFs, diaplectic glasses	(French, 1998; French & Koeberl, 2010)
Zirkon	Zr(SiO ₄)	Felsiska bergarter, metamorf	-30 GPa (Reidite)	Högtrycksfas av zirkon	(Miyahara et al., 2021). magmatisk,
Coesit	SiO ₂ (HP polymorf)	Magmatisk, sedimentär, felsiska berggrunder	30 GPa (formas)	Högtrycksfas av kiseloxid	(French, 1998; French & Koeberl, 2010)
Stishovit	SiO ₂ (HP polymorf)	Magmatisk, sedimentär, felsiska berggrunder	12-15 GPa (formas)	Högtrycksfas av kiseloxid	(French, 1998; French & Koeberl, 2010)
Okonventionella mineral					
Ringwoodit	(Mg,Fe ²⁺) ₂ SiO ₄	Basaltiska, Magmatiska	S4, 30> GPa	Högtryckspolymorf av olivin	(Hu & Sharp, 2021)
Vestait	(Ti ₄₊ Fe ²⁺)Ti ₄₊₃ O ₉	Basaltiska	Kristalliserar på 10 GPa	Återfinns i Ti rika smältor	(Pang et al., 2018)
Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (Cl/F/OH)	Ultramafisk, magmatisk	S2 - S5, 5-35> GPa	PFs, PDFs, omkristallisation, δ ¹³ C isotop	(Darling et al., 2021)
Merrillit	Ca ₉ NaMg(PO ₄) ₇	Ultramafisk, magmatisk	S2 - S5, 5-35> GPa	PFs, omkristallisation, neoblastar, δ ¹³ C isotop	(Darling et al., 2021)
Magnetit	Fe ₂ Fe ₃₊₂ O ₄	Magmatiska, metamorfa	5> GPa	Tvillinglaminering	(Holm-Alwmark et al., 2021)
Kalcit	CaCO ₃	Sedimentära	<5,5 – 20 GPa	Mekaniska tvillingar, minskad kornstorlek, microbreccia, inklusioner i smälta	(Osinski, 2007)
Titanit	CaTi(SiO ₄)O	Magmatiska, metamorfa	Ca 1-14 GPa	Deformations tvillingar	(Timms et al., 2019)
Xenotim	YPO ₄	Magmatiska, Granit från Santa Fe	5 – 10 GPa	PFs, PDBs, tvillinglamineringar	(Cavosie et al., 2016)
Monazit	Ce(PO ₄)	Magmatiska, metamorfa,	20 – 59 GPa tvillingar, PDBs,	Deformations al., 2017; sedimentära	(Erickson et mosaicism Seydoux-Guillaume et al., 2022)

4.2 Nedslagskratrar

4.2.1 Introduktion till diskussion

Eftersom geologi är ett naturvetenskapligt ämne där nya upptäckter sker genom tiden så förändras och debatteras ämnen som chockmetamorfos ofta. Detta leder till att strukturer som påvisar chockmetamorfos med säkerhet ofta förändras. Vissa strukturer som har varit säkra indikatorer kan bli mindre användbara med tiden som nya upptäckter inom området sker. Detsamma gäller nya chockmetamorfa strukturer i andra mindre studerade mineral, dessa strukturer kan snabbt bli accepterade som säkra identifikations mineral. Med detta så är det väldigt svårt att med säkerhet säga vilka strukturer och mineral som är användbara inom ämnet, detta bör även beaktas när det kommer till rapportens diskussion..

Genom litteraturen som har studerats inför denna rapport har nio okonventionella mineral med chockpåverkan påträffats. Några är vanligare, mer studerade och mer användbara än andra. Dessa mineral har till synes bra förmåga att bredda både kunskapen om chockmetamorfos och underlätta identifieringen av nedslagskratrar när konventionella mineral som kvarts och zirkon saknas eller inte räcker till. De nio okonventionella mineral som beskrivits i denna rapport återfinns i en rad olika målberggrunder, indikerar chocktryck från låga tryck till höga tryck (tabell 2). Majoriteten av de chockmetamorfa strukturerna och faserna som uppvisas av mineral i rapporten är lätta att särskilja från andra naturliga typer av metamorfos. Resultaten (tabell 2) visar att chockmetamorfos skapar samma strukturer på flera av dessa mineral, som PDFs och tvillingar. Förhoppningen är att man kan identifiera nedslagskratrar som blivit delvis eroderade eller där man endast har tillgång till de yttre delarna som blivit utsatta för betydligt lägre chockmetamorfa tryck.

Att lättare och med en större säkerhet kunna identifiera vart forna nedslag har träffat jorden är viktigare än vad man kanske tror. Kratrar ger oss människor stora mängder kunskap om varför vår planet och dess geologi ser ut som den gör idag (French, 1998). Detta gäller förstås även andra planeter, ju mer vi utforskar rymden och andra planeter desto viktigare blir det att förstå deras geologi. Vilket i sin tur gör att om vi kan identifiera nedslagskratrar på andra planeter så kan vi även få en djupare förståelse om deras geologiska historia. Genom att studera de chockmetamorfa effekterna på flera okonventionella mineral kan det bli enklare att identifiera en uråldrig krater som skett i en berggrund som saknar eller har låga kvarts halter. Ökande kunskap om chockmetamorfos och lättare identifiering av nedslagskratrar leder också potentiellt till fler ekonomiska möjligheter (French, 1998), både ur ett rent råvarumässigt perspektiv och möjlig turism. För att se hur okonventionella mineral kan hjälpa till med identifikation av nedslagskratrar bör rapportens nio mineral diskuteras.

4.2.2 Hur användbara är de okonventionella mineralen?

Ringwoodit

Studien som Hu & Sharp gjorde 2021 visade att ringwoodit indikerar ett chocktryck av ca 30 GPa eller S4, vilket skiljer sig från tidigare forskning som visade på högre tryck (S6). Eftersom detta mineral skapas under höga tryck skulle det potentiellt kunna vara ett mineral som kan användas för att identifiera nedslagskratrar (Hu & Sharp, 2021). Fynd av ringwoodit bör därför tillhöra centrala områden i nedslagskratern där chockvågen varit kraftig. Den tydligt blå färgen under mikroskop gör även det lätt att identifiera och särskilja från andra mineral i tunnslip (figur 6). Studien som gjordes 2021 fokuserar på meteoriter från Mars och inte på prover från jorden (Hu & Sharp, 2021). Detta gör att fynden som gjorts av dessa författare bör beaktas varsamt när det kommer till syftet av denna litteraturstudie, eftersom identifikation av nedslagskratrar genom okonventionella chockmetamorfa mineral är huvudfokuset i denna litteraturstudie. Däremot är ringwoodit en högtryckspolymorf av olivin och har även hittats på jorden, men genomgår denna omvandling då på ca 440 – 660 km djup (Ricard, 2007). Vid fynd av ringwoodit nära ytan bör man vara säker på att det uppkommit på grund av chockmetamorfos och att man möjligen står där en nedslagskrater varit eller är (Ricard, 2007). Eftersom konventionella mineral som kvarts och zirkon också har möjlighet att indikera chockvågstryck av ca 30 GPa (tabell 2) och högre har ringwoodit en bra möjlighet att vara ett komplement för att identifiera nedslagskratrar. Dessutom återfinns ringwoodit i bland annat basaltiska bergarter (tabell 2) vilket gör att möjligheterna för ringwoodit ett identifikationsmineral ökar.

Vestait

Mineralet vestait upptäcktes 2018 och har därav inte studerats länge (Pang et al., 2018). Detta gör att man direkt får en indikation att mer forskning kan vara behövlig för att veta om vestait utgör ett bra indikationsmineral för nedslagskratrar. Eftersom vestait upptäcktes på en basaltisk eukrit är det svårt att veta om det förekommer i nedslagskratrar på jorden. Studien som gjordes av Pang et al (2018) visade på att vestait kristalliserar vid ett tryck på av ca 10 GPa (tabell 2). Detta gör att vestait skulle kunna vara en bra kandidat för att identifiera zoner som blivit utsatta för lägre tryck i en nedslagskrater. Dock kan trycket som berggrunden blivit utsatt för överstigit 10 GPa vid nedslagstillfället vilket gör att andra chockmetamorfa mineral krävs för att säkerställa hur högt trycket varit vid den zonen. Vestaitkornen som hittats är även små vilket gjorde att röntgenkristallografi för kristallerna ej kunde genomföras (Pang et al., 2018). Upptäckten av vestait visar att chockmetamorfos är en faktorn till skapandet av nya mineral i meteoriter, men att fler experiment krävs för att kunna med säkerhet förstå vilka förhållanden som krävs för att vestait ska bildas (Pang et al., 2018). Detta gör att vestait lämpar sig bättre som ett mineral för att utöka förståelsen av historiska kollisioner hos meteoriter (Pang et al., 2018).

Apatit och merrillit

Dessa två kalciumfosfatmineral visar chockmetamorfa strukturer, i form av plastisk deformation som PFs, och omkristallisation (Darling et al., 2021), (tabell 2). Merrillit hade även en större tendens att forma neoblastar medan PDFs hittades hos apatitkornen. Detta särskiljer de två mineralen (Darling et al., 2021). Eftersom båda mineral uppvisar en rad olika chockmetamorfa strukturer vid låga till medelhöga chockvågstryck (Darling et al., 2021). De två mineralen kan användas inom ett brett tryckområde vid nedslagskratrar, även i mafisk berggrund (tabell 2). Ytterligare en faktor som gör dessa två kalciumfosfatmineral till potentiellt bra mineral för fortsatta studier är att man kan mäta $\delta^{37}\text{Cl}$ isotopvärden och se hur de skiljer sig från korn som ej blivit chockade (Darling et al., 2021). Detta stöds ytterligare av att det fanns ett klart samband mellan förändringar i isotopvärdena och chockmetamorfos enligt Darling et al (2021).

Kalcit

När det kommer till chockmetamorfos och nedslagskratrar är kalcit ett av få chockindikerande mineral som främst finns i sedimentära berggrunder (tabell 2). Kalcit är ett potentiellt bra identifikationsmineral för nedslagskratrar. För det första visar kalcit en rad olika chockmetamorfa strukturer (tabell 2) som alla bildas vid relativt låga tryck (tabell 2), (Osinski, 2007). För det andra återfinns många av de chockmetamorfa strukturerna hos kalcit även i andra mineral som tvillingbildning och inklusioner i nedslagssmältan (tabell 2). För det tredje är flera av dessa strukturer lättare att identifiera i kalcitkornen, som exempel ökad densitet av tvillingar och minskad kornstorlek, strukturer som skett under låga tryck (Osinski, 2007), (tabell 2). Forskning av chockpåverkad kalcit är viktig eftersom ungefär en tredjedel av alla kända nedslagskratrar innehåller karbonater (Osinski, 2007). Eftersom kalcit påvisar relativt låga chocktryck har kalcit möjlighet att användas som identifikations mineral vid nedslag i till exempel sedimentära berggrunder även om det saknas andra lågtryckschockmetamorfa mineral. De låga chocktrycken gör att man lättare kan identifiera hur mycket av målberggrunden omkring nedslagspunkten blivit påverkad. Det negativa med kalcit är att under högre tryck verkar kornen sakna chockpåverkan och i stället börjat smälta (Osinski, 2007).

Accessoriska mineral (Titanit, Xenotim, Monazit, Magnetit)

Flertalet av de okonventionella mineral som nämns i denna rapport är accessoriska mineral. De har och kommer nog fortsätta att vara ledande för forskningen om chockmetamorfos. De chockmetamorfa strukturer som förekommer är mineraltvillingbildning i samtliga mineral (tabell 2) (Cavosie et al., 2016; Erickson et al., 2017; Holm-Alwmark et al., 2021; SeydouxGuillaume et al., 2022; Timms et al., 2019). Tvillingbildningen gör att det med säkerhet går att konstatera om mineral blivit utsatta för chockmetamorfos, genom att kontrollera riktningen av tvillingarna och sedan jämföra dessa med tektoniskt deformerade tvillingar (Timms et al,

2019). Titanit, magnetit och xenotim visar chockmetamorfa effekter redan vid låga tryck (tabell 2), (Cavosie et al., 2016; Holm-Alwmark et al., 2021; Timms et al., 2019). Detta gör de tre ovan nämna mineral till bra komplimenterande mineral när man innan endast hittat eller studerat chockmetamorfa mineral som visar strukturer skapade av högre tryck från målberggrunden. Monazit uppvisar inte chockmetamorfa strukturer vid de lägre trycken men har ett brett spann av trycknivåer (tabell 2) (Erickson et al., 2017; Seydoux-Guillaume et al., 2022), vilket gör monazit till ett mineral som har bred potential när det kommer till olika zoner i nedslagskratrar. Xenotim och monazit uppvisar båda PDBs och xenotim även PDFs (tabell 2) (Cavosie et al., 2016; Erickson et al., 2017; Seydoux-Guillaume et al., 2022). Detta gör dem ännu mer användbara när det kommer till identifikation av nedslagskratrar.

4.2.3 Är okonventionella mineral en del av framtidens forskning?

Alla mineral som behandlas i denna rapport har en plats i forskningen om chockmetamorfos av mineral och kan på ett eller flera sätt hjälpa till med att identifiera nedslagskratrar. Mineral som magnetit, kalcit, xenotim och titanit har alla goda egenskaper för att kunna användas som identifikationsmineral i utkanter av nedslagskratrar där energin från chockvågen avtagit och trycket minskat. Detta eftersom majoriteten av de strukturer dessa mineral uppvisar på grund av chockmetamorfos skapas alla under låga tryck (Cavosie et al., 2016; Holm-Alwmark et al., 2021; Osinski, 2007; Timms et al., 2019). Vestait uppvisar inga chockmetamorfa strukturer utan skapas av chockmetamorfos (Pang et al., 2018). Ringwoodit saknar också chockmetamorfa strukturer, men ringwoodit är lättare att identifiera på grund av den blå färgen (Hu & Sharp, 2021). Samt att ringwoodit är ett välstuderat mineral som har hittats på jorden (Ricard, 2007), medan vestait är ett nytt upptäckt mineral som upptäcktes på en eukrit (Pang et al., 2018). Vestait har en möjlighet att i framtiden bli ett potentiellt bra mineral för identifiering av nedslagskratrar men i dagsläget lämpar det sig bättre inom meteoriters kollisionens historia (Pang et al., 2018).

Jämför man egenskaperna hos de nio okonventionella mineralen i tabell 2 med de konventionella mineral som används idag visar de okonventionella mineralen bra potential för att i många fall fungera minst lika bra som identifikationsmineral, om inte bättre när det kommer till låga tryck. Överlag finns det mycket som pekar på att okonventionella mineral kommer och redan är en komplimenterande del till konventionella mineral som kvarts. Efterhand som forskningen om chockmetamorfos i mineral fortgår är chansen stor att några om inte alla av de mineral som denna rapport tagit upp kommer att användas lika flitigt som dagens konventionella mineral för att identifiera nedslagskratrar.

5 Slutsats

Denna rapport har visat att det finns ett flertal okonventionella mineral som uppvisar chockmetamorfa strukturer, många redan vid låga tryck. Dessa nio mineral har en spridning över magmatiska, metamorfa och sedimentära bergarter, de uppvisar även vanliga och lätt igenkännbara chockmetamorfa strukturer som exempelvis PDFs, PFs och tvillingar. Detta gör att okonventionella mineral och majoriteten av rapportens nio mineral kan användas som identifikationsmineral för nedslagskratrar på jorden. Förhoppningsvis gäller även detta på andra planeter, om tillräckliga investeringar gjorts i sample return.

6 Tackord

Jag vill ge ett stort tack till min handledare Sanna Alwmark för stöttningen, engagemanget och all hjälp som erbjudits under tiden som jag ägnat åt detta arbete.

7 Referenser

- Cavosie, A. J., Montalvo, P. E., Timms, N. E., & Reddy, S. M. (2016). Nanoscale deformation twinning in xenotime, a new shocked mineral, from the Santa Fe Impact Structure (New Mexico, USA). *Geology*, *44*(10), 803–806. <https://doi.org/10.1130/g38179.1>
- Darling, J. R., White, L. F., Kizovski, T., Černok, A., Moser, D. E., Tait, K. T., Dunlop, J., Langelier, B., Douglas, J. O., Zhao, X., Franchi, I. A., & Anand, M. (2021). The shocking state of apatite and merrillite in Shergottite Northwest Africa 5298 and extreme nanoscale chlorine isotope variability revealed by Atom Probe Tomography. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, *293*, 422–437. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.11.007>
- DeCarli, P. S. (2005). Shock metamorphism. *Encyclopedia of Geology*, 179–184. <https://doi.org/10.1016/b0-12-369396-9/00323-3>
- Erickson, T. M., Timms, N. E., Kirkland, C. L., Tohver, E., Cavosie, A. J., Pearce, M. A., & Reddy, S. M. (2017). Shocked monazite chronometry: Integrating microstructural and in situ isotopic age data for determining precise impact ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *172*(2–3). <https://doi.org/10.1007/s00410-017-1328-2>
- French, B. M. (1998). *Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. Lunar and Planetary Institute.
- French, B. M., & Koeberl, C. (2010). The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, *98*(1–2), 123–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>
- Holm-Alwmark, S., Erickson, T., & Cavosie, A. (2021). Empirical constraints on progressive shock metamorphism of magnetite from the Siljan Impact Structure, Sweden. *Geology*, *50*(3), 377–382. <https://doi.org/10.1130/g49498.1>
- Hu, J., & Sharp, T. (2021). Formation, preservation and extinction of high-pressure minerals in meteorites: Temperature effects in shock metamorphism and shock classification. *Progress in Earth and Planetary Science*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-853190/v1> (Hu & Sharp., 2021)
- Kenkmann, T., Poelchau, M. H., & Wulf, G. (2014). Structural geology of impact craters. *Journal of Structural Geology*, *62*, 156–182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.015>
- Miyahara, M., Tomioka, N., & Bindi, L. (2021). Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials. *Progress in Earth and Planetary Science*, *8*(1). <https://doi.org/ARTN 5910.1186/s40645-021-00451-6>
- Osinski, G. R. (2007). Impact metamorphism of caco₃-bearing sandstones at the Haughton Structure, Canada. *Meteoritics & Planetary Science*, *42*(11), 1945–1960. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb00552.x>
- Pang, R.-L., Harries, D., Pollok, K., Zhang, A.-C., & Langenhorst, F. (2018). Vestaitite, (Ti₄+Fe₂)Ti₃+o₉, a new mineral in the shocked Eucrite Northwest Africa 8003. *American Mineralogist*, *103*(9), 1502–1511. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6522>
- Ricard, Y. (2007). Physics of mantle convection. *Treatise on Geophysics*, 31–87. <https://doi.org/10.1016/b978-044452748-6.00115-2>
- Seydoux-Guillaume, A.-M., de Resseguier, T., Montagnac, G., Reynaud, S., Leroux, H., Reynard, B., & Cavosie, A. J. (2022). Bridging the shocked monazite gap – deformation microstructures in natural and laser shock-loaded samples. *Earth and Planetary Science Letters*, *595*, 117727. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117727>
- Timms, N. E., Pearce, M. A., Erickson, T. M., Cavosie, A. J., Rae, A. S., Wheeler, J., Wittmann, A., Ferrière, L., Poelchau, M. H., Tomioka, N., Collins, G. S., Gulick, S. P., Rasmussen, C., & Morgan, J. V. (2019). New shock microstructures in titanite (CATISIO5) from the peak ring of the Chicxulub impact structure, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *174*(5). <https://doi.org/10.1007/s00410019-1565-7>

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

618. Östsjö, Martina, 2021: Geologins betydelse i samhället och ett första steg mot en geopark på Gotland. (15 hp)
619. Westberg, Märta, 2021: The preservation of cells in biomineralized vertebrate tissues of Mesozoic age – examples from a Cretaceous mosasaur (Reptilia, Mosasauridae). (45 hp)
620. Gleisner, Lovisa, 2021: En detaljerad undersökning av kalkstenslager i den mellanordoviciska gullhögenformationen på Billingen i Västergötland. (15 hp)
621. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2021: Origin and early evolution of isopods - exploring morphology, ecology and systematics. (15 hp)
622. Selezeneva, Natalia, 2021: Indications for solar storms during the Last Glacial Maximum in the NGRIP ice core. (45 hp)
623. Bakker, Aron, 2021: Geological characterisation of geophysical lineaments as part of the expanded site descriptive model around the planned repository site for high-level nuclear waste, Forsmark, Sweden. (45 hp)
624. Sundberg, Oskar, 2021: Jordlagerföljden i Højeådal utifrån nya borrhningar. (15 hp)
625. Sartell, Anna, 2021: The igneous complex of Ekmanfjorden, Svalbard: an integrated field, petrological and geochemical study. (45 hp)
626. Juliusson, Oscar, 2021: Implications of ice-bedrock dynamics at Ullstorp, Scania, southern Sweden. (45 hp)
627. Eng, Simon, 2021: Rödslam i svenska kraftdammar - Problematik och potentiella lösningar. (15 hp)
628. Kervall, Hanna, 2021: Feasibility of Enhanced Geothermal Systems in the Precambrian crystalline basement in SW Scania, Sweden. (45 hp)
629. Smith, Thomas, 2022: Assessing the relationship between hypoxia and life on Earth, and implications for the search for habitable exoplanets. (45 hp)
630. Neumann, Daniel, 2022: En mosasaurie (Reptilia, Mosasauridae) av paleocensk ålder? (15 hp)
631. Svensson, David, 2022: Geofysisk och geologisk tolkning av kritskollors utbredning i Ystadsområdet. (15 hp)
632. Allison, Edward, 2022: Avsättning av Black Carbon i sediment från Odensjön, södra Sverige. (15 hp)
633. Jirdén, Elin, 2022: OSL dating of the Mesolithic site Nilsvikdalen 7, Björøy, Norway. (45 hp)
634. Wong, Danny, 2022: GIS-analys av effekten vid stormflod/havsnivåhöjning, Morupstrakten, Halland. (15 hp)
635. Lycke, Björn, 2022: Mikroplast i vattenavsatta sediment. (15 hp)
636. Schönherr, Lara, 2022: Grön fältspat i Varbergskomplexet. (15 hp)
637. Funck, Pontus, 2022: Granens ankomst och etablering i Skandinavien under postglacial tid. (15 hp)
638. Brotzen, Olga M., 2022: Geologiska besöksmål och geoparker som plattform för popularisering av geovetenskap. (15 hp)
639. Lodi, Giulia, 2022: A study of carbon, nitrogen, and biogenic silica concentrations in *Cyperus papyrus*, the sedge dominating the permanent swamp of the Okavango Delta, Botswana, Africa. (45 hp)
640. Nilsson, Sebastian, 2022: PFAS- En sammanfattning av ny forskning, med ett fokus på föroreningskällor, provtagning, analysmetoder och saneringsmetoder. (15 hp)
641. Jägfeldt, Hans, 2022: Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimatsystem. (15 hp)
642. Sundberg, Melissa, 2022: Paleontologiska egenskaper och syreisotopsutveckling i borrhkärnan Limhamn-2018: Kopplingar till klimatförändringar under yngre krita. (15 hp)
643. Bjermo, Tim, 2022: A re-investigation of hummocky moraine formed from ice sheet decay using geomorphological and sedimentological evidence in the Vomb area, southern Sweden. (45 hp)
644. Halvarsson, Ellinor, 2022: Structural investigation of ductile deformations across the Frontal Wedge south of Lake Vättern, southern Sweden. (45 hp)
645. Brakebusch, Linus, 2022: Record of the end-Triassic mass extinction in shallow marine carbonates: the Lorüns section (Austria). (45 hp)
646. Wahlquist, Per, 2023: Stratigraphy and palaeoenvironment of the early Jurassic volcanoclastic strata at Djupadalsmölla, central Skåne, Sweden. (45 hp)
647. Gebremedhin, G. Gebreselassie, 2023: U-Pb geochronology of brittle deformation using LA-ICP-MS imaging on calcite veins. (45 hp)
648. Mroczek, Robert, 2023: Petrography of impactites from the Dellen impact structure, Sweden. (45 hp)
649. Gunnarsson, Niklas, 2023: Upper Ordovician stratigraphy of the Stora Sutarve core (Gotland, Sweden) and an assessment of the Hirnantian Isotope Carbon Excursion

- (HICE) in high-resolution. (45 hp)
650. Cordes, Beatrix, 2023: Vilken ny kunskap ger aDNA-analyser om vegetationsutvecklingen i Nordeuropa under och efter Weichsel-istiden? (15 hp)
651. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2023: Palaeocolour, skin anatomy and taphonomy of a soft-tissue ichthyosaur (Reptilia, Ichthyopterygia) from the Toarcian (Lower Jurassic) of Luxembourg. (45 hp)
652. Kryffin, Isidora, 2023: Exceptionally preserved fish eyes from the Eocene Fur Formation of Denmark – implications for palaeobiology, palaeoecology and taphonomy. (45 hp)
653. Andersson, Jacob, 2023: Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering. En undersökning av Mars främsta yt-dateringsmetod "Crater Counting". (15 hp)
654. Sundberg, Melissa, 2023: A study in ink – the morphology, taphonomy and phylogeny of squid-like cephalopods from the Jurassic Posidonia Shale of Germany and the first record of a loligosepiid gill. (45 hp)
655. Häggblom, Joanna, 2023: En patologisk sjöililja från silur på Gotland, Sverige. (15 hp)
656. Bergström, Tim, 2023: Hur gammal är jordens inre kärna? (15 hp)
657. Bollmark, Viveka, 2023: Ca isotope, oceanic anoxic events and the calcareous nannoplankton. (15 hp)
658. Madsen, Ariella, 2023: Polycykliska aromatiska kolväten i Hanöbuktens kustnära sediment - En sedimentologisk undersökning av vikar i närhet av pappersbruk. (15 hp)
659. Wangritthikraikul, Kannika, 2023: Holocene Environmental History of Warming Land, Northern Greenland: a study based on lake sediments. (45 hp)
660. Kurop, Anna, 2023: Reconstruction of the glacier dynamics and Holocene chronology of retreat of Helagsglaciären in Central Sweden. (45 hp)
661. Frisendahl, Kajsa, 2023: Holocene environmental history of Washington Land, NW Greenland: a study based on lake sediments. (45 hp)
662. Ryan, Cathal, 2023: Luminescence dating of the late Quaternary loess-palaeosol sequence at Velika Vrbica, Serbia. (45 hp)
663. Lindow, Wilma, 2023: U-Pb datering av zirkon i metasediment tillhörande Stora Le-Marstrand, SV Sverige. (15 hp)
664. Bengtsson, Kaisa, 2023: Geologisk karaktärisering av den kambriska Faludden-sandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring. (15 hp)
665. Granbom, Johanna, 2023: Insights into simple crater formation: The Hummeln impact structure (Småland, Sweden). (45 hp)
666. Jonsson, Axel, 2023: Datering av vulkanen Rangitoto, Nya Zeeland, genom paleomagnetiska analysmetoder. (15 hp)
667. Muller, Elsa, 2023: Response of foraminifera *Ammonia confertitesta* (T6) to ocean acidification, warming, and Deoxygenation An experimental approach. (45 hp)
668. Struzynska, Patrycja, 2023: Petrography, geochemistry, and origin of deep magmatic cumulates in the Canary Islands – the xenolith record. (45 hp)
669. Krätzer, Tobias, 2023: Artificiella torskrev i Hanöbukten: Förstudie. (15 hp)
670. Khorshidian, Farid, 2023: 3D modelling and resistivity measurements for hydrogeological assessments in the northern part of Vombsänkan. (45 hp)
671. Sundberg, Oskar, 2023: Methodology for Stored Heat "Heat In Place" (HIP) assessment of geothermal aquifers – Exemplified by a study of the Arnager Greensand in SW Scania. (45 hp)
672. Haraldsson, Emil, 2023: Kan akademien hjälpa industrin utveckla mer robusta grundvattenmodeller? En studie av moderna Svenska industriframtagna grundvattenmodeller. (15 hp)
673. Barabas, Ricky, 2024: Kan chockmetamorfos i okonventionella mineral hjälpa till att identifiera nedslagskratrar? (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund