

2013

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 2

KRATERSTRUKTURER, METEORITTER OG CHOKEFFEKTER:

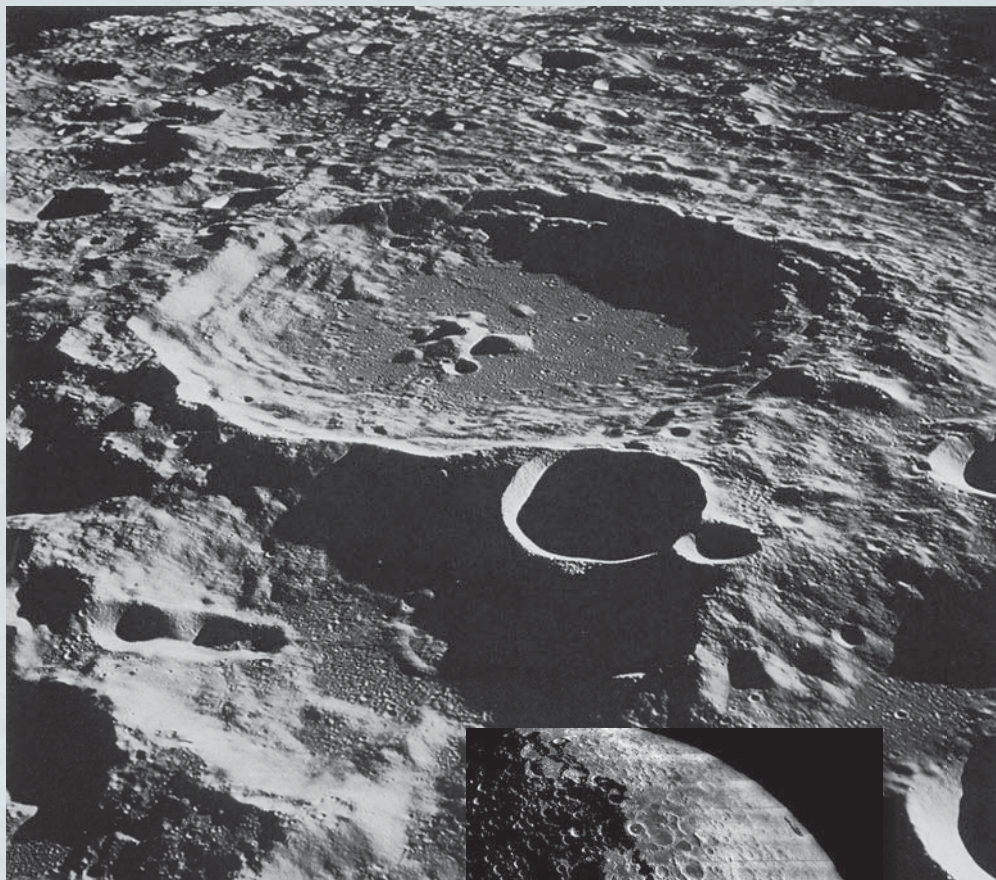
– TRUSLER OG GAVER FRA RUMMET



KRATERSTRUKTURER, METEORITTER OG CHOKEFFEKTER

Den 15. februar 2013 om morgenen sås en usædvanlig kraftig ildkugle på himlen over den russiske by Chelyabinsk. I løbet af få sekunder blev den kraftigere og kraftigere, indtil den var lige over byen. Her eksploderede den i en ufattelig energiudladning, der langt overgik Solen i lysstyrke. Mange af byens indbyggere for hen til vinduerne for at se, hvad der var sket. Efter ca. 2 1/2 minut blev byen ramt af trykbølgen fra eksplosionen, som knuste tusindvis af vinduer og sendte glasskårene ind i hoderne på de stakkels beboere. Sprængkraften er senere beregnet til 500.000 tons TNT, hvilket svarer til 40 gange Hiroshima-bomben. En helt ufattelig kraftig eksplosion! Ikke mindst fordi meteoren 'kun' var på 10.000 tons. Alligevel er det russiske nedslag for intet at regne mod den meteor, der for 3 milliarder år siden ramte det vi i dag kalder Maniitsoq i Grønland. Den havde formentlig en sprængkraft på over 1 milliard tons TNT og dannede et krater på omkring 500 km i diameter. Denne udgave af Geoviden graver i baggrunden for disse spændende begivenheder.

Kolliderende himmellegemer er en meget væsentlig og helt naturlig del af solsystemers udvikling. På Jorden sætter de sig spor i form af både meteoritter og meteorkrater. Kraterne tillader os at rekonstruere nogle af de voldsomme nedslag, som vores planet har været udsat for igennem milliarder af år, og mange meteoritter gemmer på tydelige tegn fra andre kollisioner ude i solsystemet. Der kendes i øjeblikket 183 store og små meteorkrater på Jorden. Forfatterne har besøgt to relativt unge og velbevarede krater, nemlig Ries krateret i det sydlige Tyskland og Gosses Bluff krateret i Australiens indre, som begge afspejler chokeffekter i den øvre del af jordskorpen. Forfatterne beskriver også den usædvanligt store, nyfundne og ganske unikke, hele 3 milliarder år gamle Maniitsoq kraterstruktur i Vestgrønland,



Begge fotos er af Månen bagside. Til højre ses noget af Månens overflade nær sydpolen, optaget af Orbiter 4-sonden i 1967 i forbindelse med NASAs kortlægning, med henblik på at finde velegnede Apollo-landingssteder. Ovenfor ses det 80 km (diameter) store 'krater nr. 308'. Billedet blev taget af astronauterne Armstrong og Aldrin 21. juni 1969 lige efter starten fra Månen.

Kilde til krater nr. 308: Picturepoint Ltd.
Kilde til det lille foto: NASA.

Begge billeder gengivet efter:
Atlas over verdensrummet, Lademann 1972.



hvor hele jordskorpen blev sat i ødelæggende svingninger, og effekter af nedslaget trængte helt ned i Jordens kappe.

Alle solsystemets faste himmellegemer er dannet ved sammenklumpning af materiale fra en roterende skive af støv og gas omkring den nydannede Sol. Selv om skiven næsten er ryddet for materiale i dag, er processen ikke gået helt i stå, og Jorden modtager stadig hvert år omkring 75.000 tons materiale fra rummet. Langt det meste brænder dog op som harmless stjernesud. Alle solsystemets himmelle-

gemer indeholder enorme mængder kinetisk energi på grund af deres høje hastigheder, som typisk er i størrelsesordenen 10–50 kilometer i sekundet, se boksen side 3.

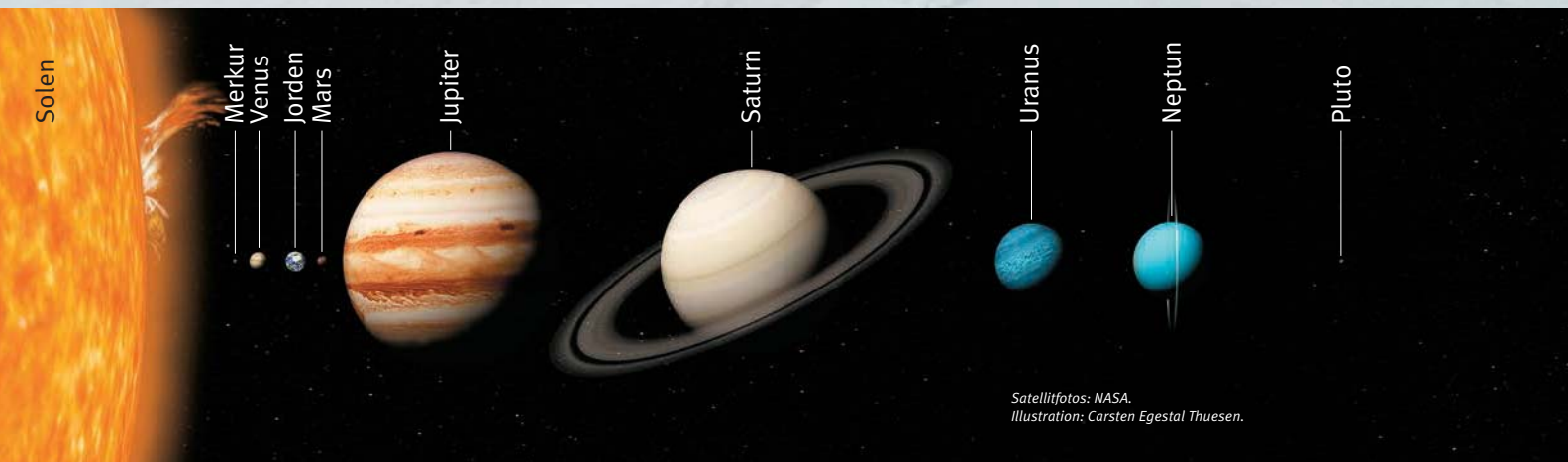
På grund af de store hastighedsforskelle sker der næsten ufatteligt store energiudladninger, når to himmellegemer af en vis størrelse kolliderer med hinanden. Det er derfor, at den russiske meteor kunne have en sprængkraft på ikke mindre end 500.000 tons TNT, selv om den 'kun' vejede 10.000 tons og ikke bestod af sprængstoffer.

ADAM A. GARDE

Seniorforsker, GEUS.
aag@geus.dk

HENNING HAACK

Lektor, Geologisk Museum (SNM).
hh@snm.ku.dk



Satellitfotos: NASA.
Illustration: Carsten Egestal Thuesen.

FYSIKKEN BAG KOLLISIONER I RUMMET

Størrelsen af det krater, som et stort nedslag genererer, er bestemt af den kinetiske energi, E_{kin} , som projektilet indeholder: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2$, hvor m er massen af projektilet og v dets hastighed. Projektilets hastighed indgår i 2. potens i ligningen og er derfor af meget større betydning end dets størrelse og vægt.

Alle planeter, kometer og asteroider i solsystemet bevæger sig i elliptiske baner omkring Solen. De objekter, der er tættest på Solen, har langt højere banehastigheder end objekterne i Solsystemets ydre dele. Merkur har fx en banehastighed på knap 50 km/s; Jorden er lidt langsommere med 29,6 km/s, mens is-legemerne i Solsystemets yderste afkroge er nede på hastigheder under 0,1 km/s. Lige da solsystemet blev skabt, var der gas til stede i skiven omkring Solen, og denne gas fik alle legemerne til at bevæge sig i pæne, regelmæssige cirkulære baner om Solen. Det betød, at eventuelle sammenstød var blide, og at planeterne stille og roligt kunne bygges op ved gradvist at tilføre materiale med forholdsvis lav hastighed. Da gassen forsvandt, blev det muligt at bevæge sig i baner der skar ind over de cirkulære baner, som de fleste planeter befinder sig i. Det betød, at kollisionerne blev voldsommere, og at asteroider typisk mistede materiale i stedet for at vokse sig større, når de mødtes. Typiske kollisionshastigheder i asteroidebæltet er 5 km/s – hvilket er højere end lydhastigheden og derfor fører til voldsomme ødelæggelser i det materiale, der befinder sig nær nedslagsstedet – og undertiden i hele asteroiden.

Kollisionshastighederne er typisk højest i det indre solsystem, hvor hastighederne er størst. Alle objekter med kurs mod Jorden bliver desuden tiltrukket af Jordens tyngdefelt og vil derfor ramme os med mindst Jordens undvigelseshastighed på 11 km/s.

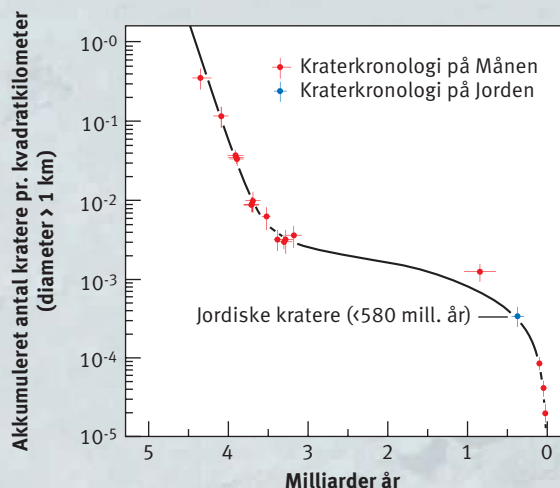
De rigtigt voldsomme sammenstød optræder ved mødet med en komet, der bevæger sig avet om – den gale vej om Solen, modsat planeterne. Det gør næsten halvdelen af de kometer, der kommer ind fra det ydre Solsystem. I faldet ind mod Solen opnår de en meget høj hastighed – og hvis vi så oven i købet møder dem i en frontalkollision, kan hastigheden nå op over 70 km/s. Det er sådan en komet, der lige nu udgør en trussel mod Mars, som den kan ramme med en hastighed på 56 km/s. Det vil i givet fald udløse en eksplosion, der foreløbigt ser ud til at blive 10.000 gange kraftigere end 'KT-nedslaget', der forårsagede Chicxulub krateret på Yucatan-halvøen i Mexico. 'KT-nedslaget' er en forkortelse for det berømte meteornedslag, der markerer grænsen mellem de geologiske perioder Kridt og Tertiær. Læs mere herom på side 5 og i boksen side 8.

De fleste af Jordens egne geologiske processer er meget langsomme, ja næsten umærkelige, og selv kraftige jordskælv eller vulkanudbrud er for intet at regne i sammenligning med et større meteornedslag. Heldigvis for os er sådanne hilsner fra himlen meget sjældne set i et menneskeligt tidsperspektiv.

JORDEN ER AKTIV,
MÅNEN ER DET IKKE LÆNGERE

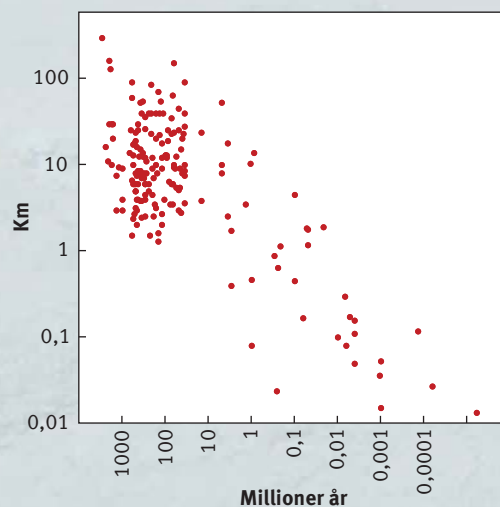
Det er svært at forestille sig, at hele Jorden er dannet af materiale, som er kommet hertil ved nedslag af himmellegemer fra rummet, men man kan blot se op på Månen for at forvisse sig om, at det er rigtigt. Månen er ikke længere geologisk aktiv, og gamle meteorkraterer nedbrydes derfor kun af nye nedslag. Månens overflade er dækket af store og små kraterer, hvoraf de fleste er mellem 3 og 4 milliarder år gamle. De fleste af dem blev dannet under det såkaldte 'Late Heavy Bombardment' for omkring 3,9 milliarder år siden, og dette bombardement må have været mindst lige så intenst på Jorden som på Månen. Månens 'mare' (latin: hav) er gamle kraterstrukturer, der senere er fyldt med basaltisk lava i forbindelse med gigantiske vulkanudbrud. Det største af dem alle, Mare Imbrium ('Regnskylles Hav'), har en diameter på ikke mindre end 1146 km; dvs. stor nok til at rumme både England, Skotland og Irland inden for kraterenden!

I modsætning til Månen bliver Jordens overflade og dens kraterstrukturer til stadighed – omend meget langsomt – omdannet ved aflejring af materiale, erosion, vulkansk aktivitet



Fordelingen af alder og størrelse på kraterstrukturer på Månen og Jorden. Langt de fleste kraterer i solsystemet blev dannet for knap 4 milliarder år siden. Diagrammet viser, hvor mange kraterer man finder pr. kvadratkilometer på Månen. Det meste af Månens overflade er omkring 4 milliarder år gammel, og her er krateretætheden ca. 1000 gange større end på Jorden. Det meste af Jordens overflade er meget ung og under 100 millioner år gammel, og her er der kun ganske få kraterer.

Illustration: Adam A. Garde, baseret på forskellige kilder.



Størrelse og alder af kendte kraterer på Jorden ifølge Earth Impact Database, med tilføjelse af Maniitsoq kraterstrukturen øverst til venstre. Begge skalaer er logaritmiske. Det ses tydeligt, at kraterdannelsen er aftaget gennem Jordens historie, og at alle unge kraterer er meget små. Samtidig ved vi, at mange gamle kraterer må være gået tabt, fordi de gennem tiden er blevet ødelagt af geologiske processer på Jordens overflade.

Illustration: Adam A. Garde.

og jordskælvs, som hver på deres måde er styret af pladetektoniske processer. Derfor er der kun blevet bevaret meget få meteorkraterer hos os. Trods fund af åbenlyse meteorkraterer var det først i løbet af den anden halvdel af 1900-tallet, at det blev almindeligt accepteret, at der i det hele taget findes meteorkraterer på Jorden, og at de har været overordentligt vigtige for både selve Jordens udvikling og i særdeleshed for livets udvikling på dens overflade.

CHOKPROCESSER - HVORDAN KAN VI UNDERSØGE DEM?

Hvad sker der, når to faste himmellegemer rammer hinanden, og hvor kan vi undersøge det? Vi kan være heldige at iagttage kollisioner i rummet med teleskoper eller fra rumfartøjer, eller vi kan vende os mod Jorden selv og undersøge de få bevarede kraterstrukturer og ikke mindst faldne meteoritter. Det skal vi se på i det følgende.

METEORITTER BLIVER NÆSTEN ALDRIG FUNDET

Solsystemet indeholder anslået omkring 100 milliarder klippestykker af mindst meter-størrelse. Når disse klippestykker rammer de større faste legemer i Solsystemet, dannes der kraterer. Hver gang der dannes et krater, slynges der materiale ud fra overfladen, der så kommer til at indgå i Solsystemets bestand af mindre klippestykker. De små klippestykker kredser typisk omkring Solen i nogle millioner år, inden de rammer et større legeme eller slynges helt ud af Solsystemet. De klippestykker, som

Jordens atmosfære rammes af, ender oftest som smukke stjernesud. Hvis objektet er stort nok og farten lav nok, kan dele af det nå hele vejen gennem atmosfæren og lande på Jordens overflade som en meteorit. Statistisk set falder der en meteorit per 15.000 km²/år – eller 3 om året i Danmark. Da der kun findes en enkelt friskfalden meteorit pr. århundrede i Danmark, må vi desværre konstatere, at langt de fleste aldrig bliver fundet.

Det har vist sig, at de meteoritter, der falder på Jorden, hovedsageligt stammer fra asteroiderne, men der findes også meteoritter fra Mars og Månen. Meteoritter fra asteroider er overraskende forskelligartede. Vi kan konstatere, at vi har fundet meteoritter fra mindst 100 forskellige asteroider og med vidt forskellige egenskaber. Nogle af dem har været totalt opsmeltede, andre delvist smeltede, og andre igen har aldrig været varmet op over 100°C.

Det sidste gælder fx for den asteroide, som Maribo-meteoritten stammer fra. Nogle af asteroiderne er dannet i et meget iltfattigt (reducerende) miljø, mens andre har haft meget iltrige omgivelser.

De meteoritter, der stammer fra ikke-smeltede asteroider, består af løst sammenkittet støv og partikler, der oprindeligt er dannet i frit kredsløb om Solen i de første få millioner år af Solsystemets udvikling. En af hovedbestanddelene er millimeterstore, størknede smeltdråber, der kaldes kondruler. Kondrulerne har givet navn til hele gruppen af primitive meteoritter. Alle de meteoritter, der indeholder kondruler, kaldes kondritter. Det er primært ved at studere det velbevarede primitive materiale i kondritterne, at vi har været i stand til at rekonstruere Solsystemets tilblivelse.

De allerførste asteroider, der blev dannet, indeholdt så meget radioaktivt aluminium

DEFINITIONER AF METEOR, METEOROIDE, METEORIT, ASTEROIDE, STJERNESKUD

Asteroider er objekter på mindst 100 m i diameter, der kredser om Solen – typisk i Asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter. **Meteoroider** er de tilsvarende objekter på under 100 m i diameter. Når Jordens atmosfære rammes af en meteoroid, dannes der et stjernesud, også kaldet en **meteor**. Særligt kraftige stjernesud, som fx den over Chelyabinsk kaldes desuden **ildkugler**. Hvis en stump eller større del af meteoren overlever turen og lander på Jordens overflade, kaldes den for en **meteorit**. Af historiske årsager benævnes det samme objekt altså meteoroider, meteor/ildkugle og til sidst meteorit på sin vej mod Jorden.

Selv gasplaneter kan påvirkes af kollisioner. Således kan observationer af kollisioner på Jupiter i 1994 og 2009 ses på internetsiden:

http://en.wikipedia.org/wiki/Comet_Shoeemaker%E2%80%93Levy_9

Skive af pallasitten Imilac, der er fundet i Atacama-ørkenen i Chile. Pallasitter kommer fra grænsen mellem kappe og kerne i en opsmeltet asteroide. De gullige mineralkorn er olivin, der dominerer i bunden af kappen, mens det grå materiale er metal fra asteroidens kerne.

Foto: Ole Bang Berthelsen (tidligere: GI, KU).



1 cm

METEORITTEN BEVARER SIN INFORMATION

Alle meteoritter har været udsat for chok effekter mindst én gang, nemlig da de blev slået løs fra deres moderlegeme. De mineralkorn, som de består af, er blevet deformeret, knust eller ligefrem smeltet i forskellig grad, afhængigt af, hvor kraftig chokpåvirkningen har været. Man kunne tro, at meteoritterne også blev udsat for voldsomme chok effekter ved mødet med Jordens atmosfære og den efterfølgende landing, men det er faktisk ikke tilfældet. Passagen gennem atmosfæren sker på få sekunder og under kraftig opbremsning. I den forbindelse smelter det meste af materialet, men det materiale, der overlever, forbliver koldt på nær et tyndt smeltelag yderst på den endelige meteorit. Det er naturligvis meget heldigt. En opvarmning af meteoritten ville slette meget af den information, den har gemt på i 4,5 milliarder år – og endda, lige inden vi fik den i hånden... en skræmmende tanke for en meteoritforsker! Til gengæld kan trykpåvirkningen ved det pludselige møde med atmosfæren flå det indtrængende himmellegeme i småstykker, så der lander en hel byge af meteoritstumper efterfulgt af en trykbølge, som det skete den 15. februar 2013 over Chelyabinsk, se fx artikel i Politiken, 16. februar 2013. Almindelige, små meteoritter rammer jordoverfladen med en relativt lav hastighed, hvor luftmodstanden modsvares af tyngdekraften.

KRATERSTRUKTURER VIDNER OM CHOK

Kraterstrukturer er vores vigtigste og mest håndgribelige informationskilde til studiet af chok-

processer, og de forsyner os med et langt mere sammenhængende billede af chokprocesserne, end dem man kan studere i meteoritter. Når en større meteor eller en asteroide kolliderer med Jorden med mange gange lydens hastighed, vil dens enorme kinetiske energi få den til at fordampe og udløse en gigantisk eksplosion dybt under det, der var Jordens overflade før nedslaget. Det er derfor ikke selve nedslaget, men derimod eksplosionen, der resulterer i det færdige meteorkrater. Størrelsen af det færdige eller endelige krater afhænger ikke af asteroidens størrelse, men derimod af dens kinetiske energi. Faktisk er krateret langt større end selve asteroiden. For eksempel resulterede et nedslag af en 10 km stor asteroide på grænsen mellem de geologiske tidsafsnit Kridt og Tertiær ('K/T-grænsen') for 65 millioner år siden i et krater på over 200 km i diameter. Ved dette nedslag udslættedes omkring 75 % af alle arter på Jorden, deriblandt dinosaurerne.

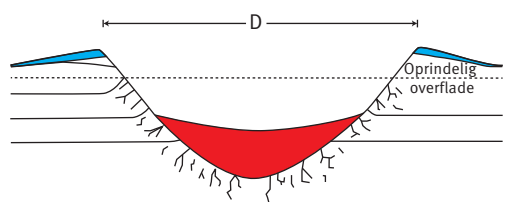
Når asteroiden rammer sit mål, dannes der momentant en supersonisk chokbølge med et tryk, som er flere størrelsesordener højere end det tryk, der kan opstå under selv de mest ekstreme 'jordiske' geologiske processer i Jordens overfladelag. Ved kollisionen fordeler denne øjeblikkelige trykbølge sig både fremad ind i målområdet og baglæns ind i asteroiden selv, og kastes derefter tilbage under en ekstrem, men meget kortvarig varmpåvirkning. Herved fordamper hele asteroiden som regel, og noget af målområdet smelter også op og fordamper. Tryk- og varmebølgerne danner desuden nogle helt unikke strukturer i de mineraler, som overlever kollisionen. De er beskrevet nærmere på side 8 og 9.

1 cm

Skive af kulkondritten Allende, der faldt i Mexico i 1969. De irregulære hvide inklusioner er såkaldte CAI'er, dvs. Calcium-Aluminium-rige Inklusioner. Med en alder på 4567,3 millioner år er CAI'erne det ældste materiale, vi kender til. De runde objekter er kondruler.

Foto: Daniel Wielandt, Ph.d., KU.

(²⁶Al), at de smeltede helt op på grund af varmeudviklingen under henfaldet. Derved blev disse asteroider på samme måde som Jorden opdelt i en metalkerne, en stenkappe og yderst en vulkansk skorpe. Efterhånden er mange af disse asteroider blevet totalt opknust efter utallige katastrofale sammenstød, og vi kan derfor modtage stumper fra både deres kerne (jernmeteoritter), kappe og skorpe (stenmeteoritter). De opsmeltede meteorittyper har givet os et forunderligt indblik i, hvordan planeter som Jorden ser ud indeni.



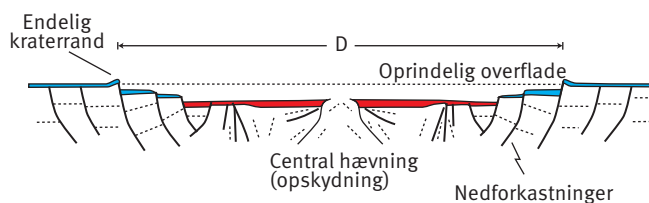
A

A: Simpelt krater.

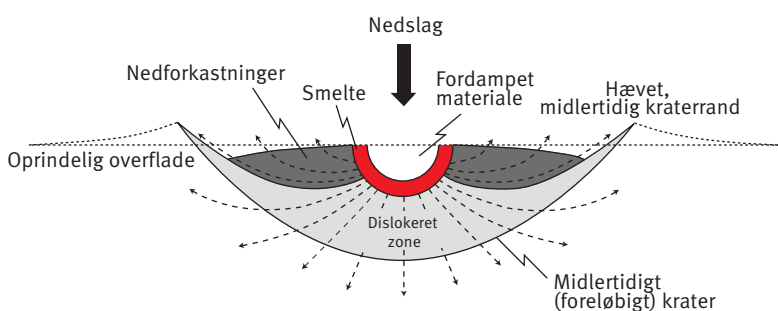
B: Større, komplekst krater med en central hævnning, der udligner den manglende tyngde af det udkastede materiale (såkaldt isostatisk kompensation).

C: Komponenterne i det midlertidige og endelige krater. Ries krateret og Gosses Bluff kraterne er eksempler på mellemstore, komplekse krater. Maniitsoq kraterstrukturen i Vestgrønland er endnu mere kompliceret, med en knust midte og en smeltezone, som rækker dybt ned i jordskorpen.

Illustration: Adam A. Garde.



B



C

SIMPLE OG KOMPLEKSE KRATERE

På grund af forskelle i projektilernes størrelse, nedslagshastighed og nedslagsvinkel og målområdernes varierende geologiske opbygning er alle kraterstrukturer forskellige, men de har naturligvis også mange fælles træk.

Man skelner mellem simple og komplekse kraterstrukturer. Små krater har en simpel struktur og består blot af det oprindelige, omtrent halvkugleformede krater, som dannes under selve nedslaget (omend oftest i mere eller mindre sammenskredet form) samt eventuelle bevarede rester af materiale, som er slynget ud af krateret. På Jorden måler simple

krater under 4 km i diameter, men for eksempel på Månen og Mars kan de blive væsentligt større, fordi tyngdekraften der er svagere.

Store og mere energirige nedslag skaber meget mere komplekse kraterstrukturer. Det færdige krater er mange gange større end det oprindelige krater, og dets udvikling kan strække sig over adskillige minutter.

En stor kollision med høj hastighed medfører en total opsmeltning af bjergarterne i det øverste af målområdet, og choksmeltet materiale slynges højt op i luften. De omliggende bjergarter bliver slynget udad, og længere væk opstår der en krans af udslynget materiale, som bliver til randen af det færdige krater. Siderne af det oprindelige krater skrider sammen, og midten af kraterbunden hæves op som kompensation for det manglende materiale, der er slynget ud. Noget af det choksmeltede bjergarts materiale falder tilbage i krateret og kan danne en stor kratersø af totalt smeltet lava, eventuelt blandet med bjergartsfragmenter. Hvis der bagefter løber overfladevand eller havvand ind i kraterstrukturen, vil det medføre voldsomme eksplosioner, og efter nogen afkøling kan der senere opstå celler af opvarmet, cirkulerende vand langs revner og sprækker, som kan medføre massive omdannelser i undergrunden dybt under kraterets bund.

Der kendes kun en håndfuld kraterstrukturer på Jorden, som er op imod 100 km i diameter eller endnu større (se boks side 8). De fleste er meget små og meget unge. På Jorden bliver de fleste mindre krater nemlig meget hurtigt eroderet væk eller dækket af yngre aflejringer. Det forhindrer os dog ikke nødvendigvis i at finde nogle af dem. Men i tidens løb kan de også blive ødelagt ved at ryge ind i en pladetektonisk kollisions- eller subduktionszone.

183 GODKENDTE KRATERSTRUKTURER PÅ JORDEN

I modsætning til alle andre geologiske strukturer findes der en internationalt anerkendt database over alle verificerede kraterstrukturer på Jorden. *Planetary and Space Science Centre, University of New Brunswick* i Canada opbevarer og opdaterer oplysningerne i **Earth Impact Database**. I skrivende stund er der optaget 183 strukturer i databasen, og der kommer løbende flere til. Maniitsoq strukturen i Vestgrønland er så ny og ubeskrevet, at den endnu ikke er med på listen. Denne strenge skelnen mellem anerkendte, mulige og ikke-eksisterende kraterstrukturer afspejler flere forskellige forhold. Den internationale konkurrence om at finde nye kraterstrukturer er benhård, og det er hensigtsmæssigt at kunne skelne klart mellem sikre kraterstrukturer, mangelfuldt dokumenterede forslag (som kan stamme fra både professionelle og amatører), og rene fantasifostre.

MODELBEREGNING AF KRATERUDVIKLING

Computerbaseret modelberegning (i to dimensioner + tid) af en kraterudvikling, som det kan tænkes at have set ud for et Maniitsoq-lignende nedslag. Modelberegningen er foretaget af B.A. Ivanov, *Institute of Planetary Science*, Moskva. Ved denne type beregninger opdeles nedslagsområdet i små kasser, der som udgangspunkt opfattes som homogene og deformerbare væsker. Man beregner så chokbølgens udbredelse og den gensidige påvirkning af kasserne over tid. Figurerne viser tilstanden ved $t = 0$ sek., 100 sek., 300 sek., 400 sek. og 1400 sek.

Modellen er stærkt afhængig af forskellige valgte parametre såsom projektilets hastighed, indfaldsvinkel og størrelse, jordskorpens tykkelse, den geothermale gradient i nedslagsområdet m.v. Der skal også på forskellig måde kompenseres for det faktum, at nedslaget foregår i faste stoffer og ikke i en væske. Trods disse begrænsninger giver modellen en ide om de kolossale forandringer, der sker i løbet af de første minutter efter nedslaget. Det bemærkes, at en forholdsmæssigt stor del af materialet i nedslagsområdet forbliver inde i selve kraterstrukturen. Det skyldes, at Jordens tyngdekraft begrænser udslyngningen af materiale mere og mere, jo kraftigere nedslaget er. Modellen tager ikke højde for de seismiske svingninger i jordskorpene og deraf følgende knusning, som er påvist ved Maniitsoq. På figur E viser pilen erosionsdybden, som ved Maniitsoq kraterstrukturen i dag.

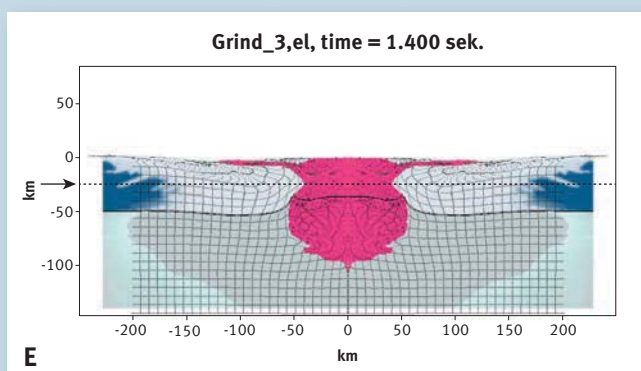
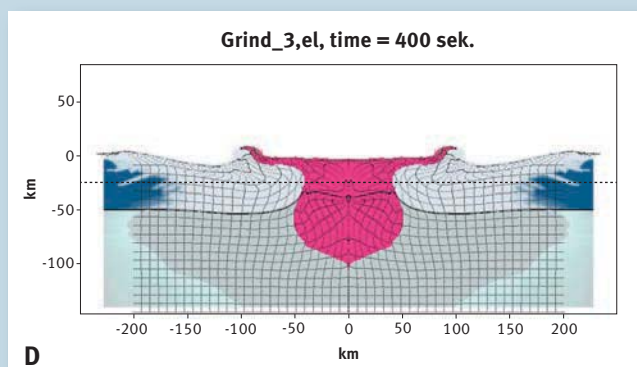
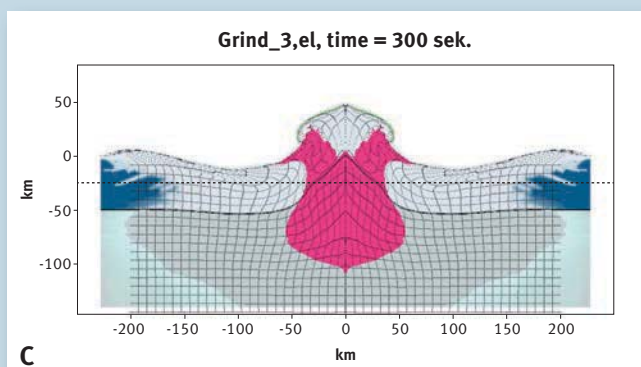
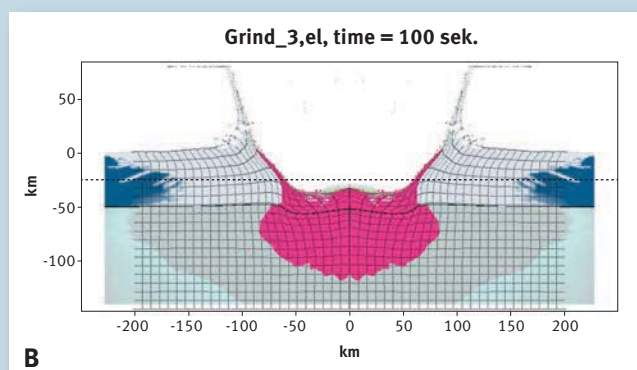
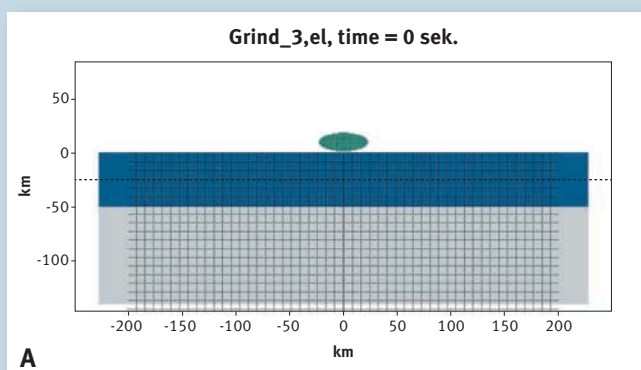


Illustration: B. A. Ivanov.



Illustration af en tænkt kollision mellem en stor meteor og Jorden.

Satellitfotos: NASA.

Illustration: Carsten Egestal Thuesen.

KORT OVER KRATERSTRUKTURER

Kortet viser Jordens 183 godkendte kraterstrukturer samt Maniitsoq. De 7 største kraterstrukturer samt Ries og Gosses Bluff kraterne er fremhævet med en sort ring. Fordelingen af kraterer på Jorden er meget ujævn. Den afspejler både målområdernes alder (fleste kraterstrukturer i gamle skjoldområder) og lokalt pionerarbejde, hvor der tidligt blev opdaget mange kraterer især i Canada, Australien, Sverige og Finland. Det er lettest at finde kraterstrukturer i ørkener eller arktiske områder uden vegetation, og sværest i regnskovsområder.

	Størrelse km	Alder** Millioner år	Beskrivelse
Maniitsoq Grønland	≤500*	3000.9 ± 1.9	Verdens måske største og ældste kendte kraterstruktur. Krateret dannet under igangværende bjergkædedannelse. Dybt nederoderet (25 km). Ingen synlig kraterstruktur. Udbredt choksmeltning af mineraler som feldspat og biotit. Ødelæggende rystelser af jordskorpen i sekunderne efter nedslaget.
Vredefort Sydafrika	160*	2023 ± 4	Berømt kraterstruktur, som det tog omkring 50 år at bevise. Delvist nederoderet. Den ene halvdel dækket af yngre aflejringer. Huser verdens største guldforekomster i Witwatersrand lagene. Kun lidt choksmeltning ses i midten.
Chicxulub Mexico	150*	64.98 ± 0.05	Nedslaget afslutter Kridttiden. Dinosaurernes uddøen. Nedslaget i kalkstenslag menes at have udviklet giftige gasser. Krateret delvis begravet af sedimenter. Huser en mellemstor olieforekomst i knuste og porøse lag. Rester af et verdensomspændende støvlag ses som 'Fiskeleret' i Stevns Klint.
Sudbury Canada	130*	1850 ± 3	Delvist nederoderet, men smeltelaget i kraterbunden delvist intakt. Deformeret af senere bjergkædedannelse og delvist begravet. Huser meget store nikkelforekomster i bunden af smeltelaget.
Acraman Australien	90*	~590	Først beskrevet i 1986 efter fund af chokmetamorfoserede sten, som blev kastet ud i de omkringliggende sedimenter. Stor sø i midten af kraterstrukturen.
Popigai Sibirien	90*	35.7 ± 0.2	Måske den bedst bevarede store kraterstruktur, men utilgængelig. Kendt for sine enorme forekomster af industridiamanter. Ved nedslaget blev grafit i området omdannet til diamanter. De indeholder lonsdaleite, som er endnu hårdere end alm. diamant. Diamanterne blev brudt af straffefanger i Stalin-tiden.
Manicouagan Canada	85*	214 ± 1	Måske samtidig med flere andre kraterer (Rochechouart, Saint Martin): Sønderdeling af en kæmpemæssig meteor eller komet i atmosfæren? Ligger afsides i Quebec provinsen og dyr at komme til. Kendt for sin ringformede sø med diameter på 40 km, som let kan ses fra rummet.

* Reviderede størrelser fra 2012 som angivet i Earth Impact Database (diameter of collapsed transient crater).

** Aldrene er bestemt med forskellige metoder, blandt andet ved radioaktivt henfald af uran til bly i mineraler, eller ved alderen af pålejrte sedimenter. Mange kraterstrukturer er af forskellige grunde svære at tidsbestemme.

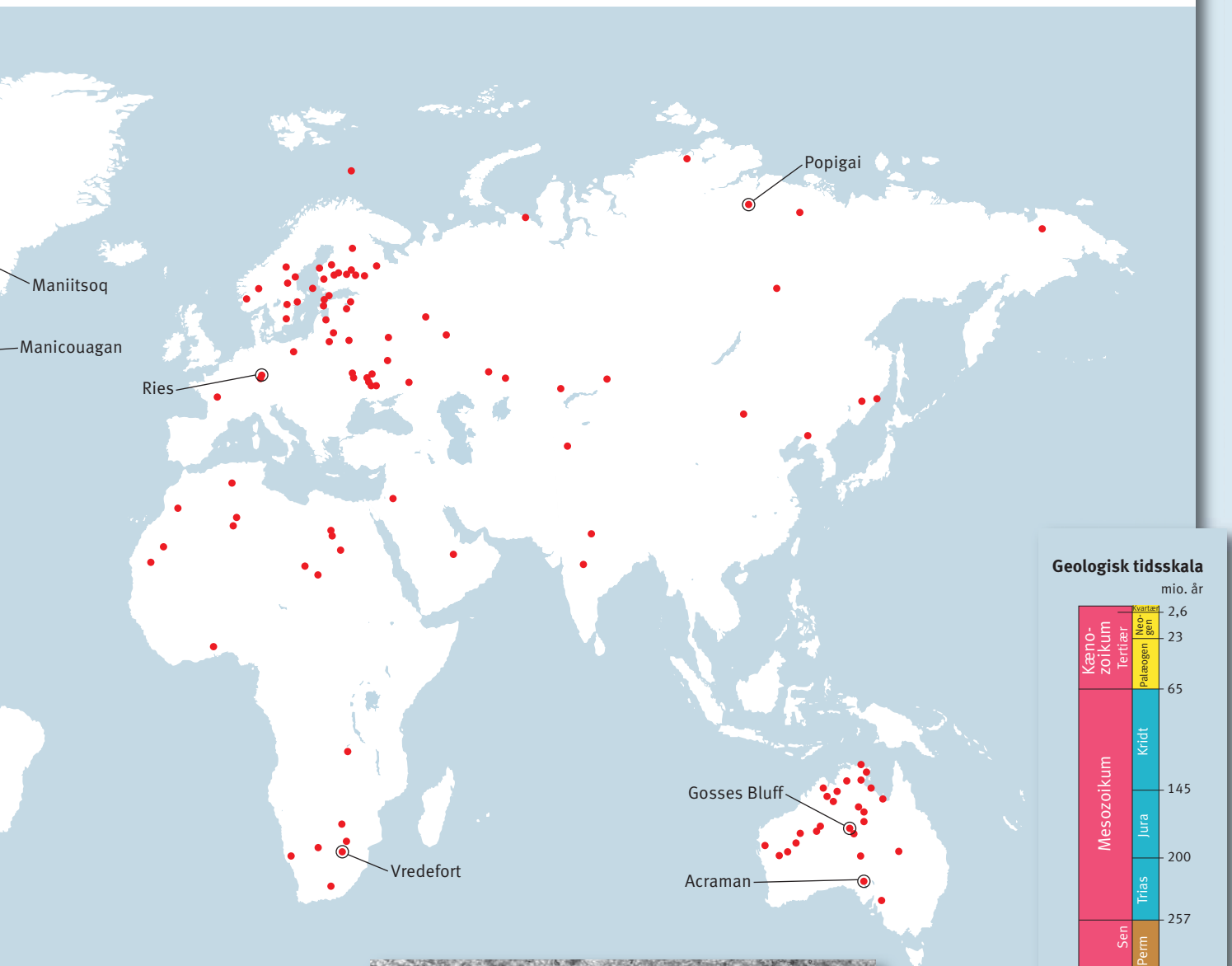


CHOKSTRUKTURER I BJERGARTER OG MINERALER

Grundige undersøgelser af mange kraterstrukturer, som alle er dannet og bevaret i den øverste, sprøde og kolde del af jordskorpen, har gjort det muligt at opstille en række unikke kendetegn, som dokumenterer, om der er tale om et meteoritkrater. De alment accepterede og sikre kendetegn omfatter (1) dannelse af komplekse og meget karakteristiske, kegleformede trykstrukturer, såkaldte *shatter cones* i finkornede se-

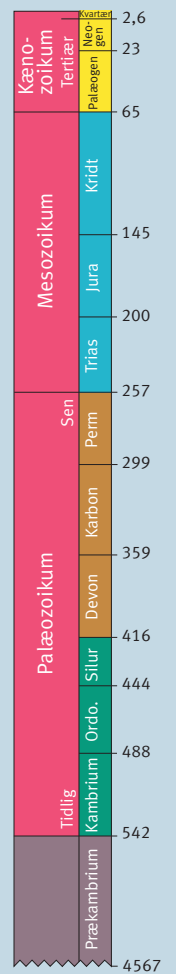
dimentære bjergarter, (2) rester af ekstraterrestrisk materiale, fx et forhøjet indhold af metallet *iridium*, som er sjældent på Jordens overflade men mere almindeligt i asteroider, (3) forekomst af *højtryksmineraler* som coesit, som kan dannes af chokbølgen, (4) forekomst af *choklameller* i mineraler, især kvarts, se foto side 9 og (5) *choksmeltning* af enkeltmineraler - også kaldet direkte mineralsmeltning, side 16. Denne meget specielle form for smeltning sker momentant under tilbagekastningen af chokbølgen. Direkte smelt-

ning af enkeltmineraler kræver meget høje temperaturer på mindst 1500–2500 grader. Den foregår vel at mærke uden nogen kemisk reaktion mellem forskellige mineraler, som det ellers altid er tilfældet ved almindelige og forholdsvis langsomme geologiske smelteprocesser såsom vulkanisme eller granitdannelse. De smeltede enkeltmineraler bliver efter passagen af chokbølgen typisk bevaret som glas eller meget finkornede aggreger af re-krystalliseret materiale.



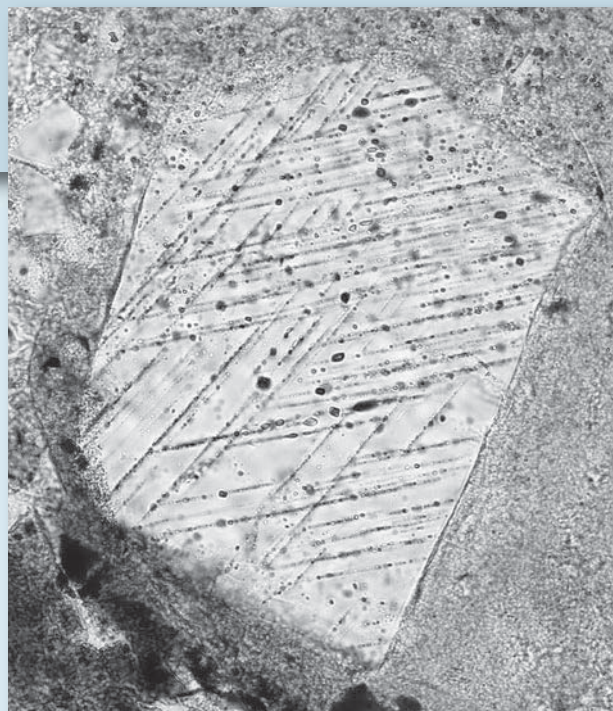
Geologisk tidsskala

mio. år



Choklameller i et kvartskorn fra Suvasvesi krateret i Finland. Man ser to sæt planære lameller med en indbyrdes vinkel på omkring 45°. Deres orientering er bestemt af kvartskornets indre krystalstruktur. De oprindelige glaslameller, som blev dannet af chokbølgen fra nedslaget, er i tidens løb blevet erstattet af bittesmå væskeindeslutninger.

Kilde: Martin Schmieder [CC-BY-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)], via Wikimedia Commons.



100 µm



Nördlingen middelalderby, bymuren og kraterenden i horisonten.

Foto: Adam A. Garde.

UNGE, VELBEVAREDE KRATERE

Ries krateret. Den 24 km store, ringformede struktur i landskabet omkring den smukke middelalderby Nördlingen i det sydlige Tyskland, var et af de første steder, hvor et meteor-krater blev endeligt bevist.

Man troede ellers tidligere, at der var tale om en usædvanligt stor og højeksplosiv vulkansk dannelse. Beviset kom i 1960, da den amerikanske geolog Eugene Shoemaker identificerede højtryksmaterialet coesit i en sten fra byens statelige kirke. Coesit er et højtryksm Mineral med samme kemiske sammensætning som kvarts, SiO_2 . Kirken selv er bygget af suevit, en højst mærkelig bjergart, som stammer fra et stenbrud i kraterets udkant. Suevit består af delvist knuste fragmenter af lokale kalksten og granit fra bunden af kraterstrukturen, blandet med store, forvredne, næsten sorte plader af choksmeltet glas, samt bittesmå diamanter og coesitkorn, som blev omkrystalliseret fra henholdsvis grafit og kvarts på grund af chokbølgen. Kirken er bygget i slutningen af 1400-tallet, og den eneste tilgængelige lokale bygningssten var suevit. Desværre er de smukt udhuggede sten temmelig medtagne af forvitring, som skyldes det store indhold af glas og de mange sprækkede bjergartsfragmenter.

Med en diameter på omkring 24 km er Ries et af Jordens større krater. Det er kun 15,1 millioner år gammelt og derfor relativt velbevaret, og der findes også et mindre søsterkrater i nærheden ved navn Steinheim. Det indre af Ries krateret består i dag af helt fladt og meget frodigt landbrugsland. Den gode jord har et højt indhold af søkalk fra en stor kratersø, som

engang dækkede kraterbunden. Kraterenden hæver sig 100–150 m over den gamle søbund og huser adskillige små stenbrud. Her kan man finde rester af 'Bunte Breccie' (se foto side 11), som består af en blanding af forskellige kalksten og mergelbjergarter fra Trias, Jura og Kridt perioderne, som er slynget ud fra kraterets midte. Oven på breccien kan man se aflejringer



Vinduesparti af kirken i Nördlingen, som er bygget af suevit. Bemærk de mange sorte glasklumper, som stammer fra den smeltede kraterbund og har været en tur oppe i atmosfæren.

Foto: Adam A. Garde.

af suevit. Man mener, at alle ingredienserne i suevitten, inklusive de allesteds nærværende, nævestore klumper af totalt smeltet materiale, har været slynget højt op i luften og først er landet igen nogle minutter efter selve nedslaget.

Nedslaget smeltede mange kubik-kilometer klippe, og en stor del af smelten sprøjtede ud af krateret og landede mange hundrede kilometer væk. Mange af smeltesråberne har været helt ude af atmosfæren, mens de var på vej væk fra krateret. Den slags luftbårne choksmelter fra store kratere kendes også fra flere andre store nedslag og kaldes for tektitter. Smelten fra Ries krateret har en karakteristisk grøn farve på grund af deres høje indhold af jern med et lavt iltningstrin, og disse tektitter kaldes for moldavitter. I Tjekkiet er der blotlagt store områder med nedfald fra Ries krateret, og derfor er der her fundet mange flotte moldavitter. Vittige hoveder har dog foreslået, at de i stedet stammer fra marsmænd, der har smidt tomme ølflasker ud fra deres rumskib efter grundige besøg i tjekkiske ølkældre.

Ries krateret og Nördlingen by er historiske steder. Her blev de første amerikanske astronauter undervist, inden de skulle op og se andre chokpåvirkede (måne-) landskaber og bjergarter, og lige inden for bymuren ligger et fremragende museum. Her kan man blandt andet opleve en animation af et stort meteornedslag og studere meteoritter af mange slags. Man kan endda se en ægte månesten på langt over hundrede gram, som er en gave fra USA.

Gosses Bluff krateret i Australien er som Ries et mellemstort og ret velbevaret krater. Det er 22 km i diameter, og er også dannet i kalksten. Med sine 142,5 millioner år på bagen er det dog delvis nedslidt. I modsætning til Ries ligger Gosses Bluff i en næsten ubeboet halvørken med spredt vegetation. Fra Alice Springs kan det nås på nogle timer med en 4-hjulstrækker. Gosses Bluff er ganske spektakulært. Den hævede midte af det komplekse krater er stadig synlig på mange kilometers afstand, selv om den er delvist nederoderet. Med sine rødligt forvitrende kalksten står den frem som en markant formation i det ellers helt flade landskab.

Hævningen i den centrale del af krateret er en kompensation for den trykafledning, som altid foregår i komplekse kraterstrukturer, efter at midten af krateret er fordampet eller er



Bunte Breccie i Ries krateret. Udkastet materiale i randen af krateret med kulørte mesozoiske kalksten, overlejret af suevit med mørke glaspartikler. Grænsen mellem de to vidt forskellige kraterbjergarter går lidt over enden af hammerskaftet. De overlevende stenfragmenter i suevitten er faktisk ældre end Bunte Breccie, men var en tur højt op i luften, inden sten og smelteglas landede oven på Bunte Breccie.

Foto: Adam A. Garde.

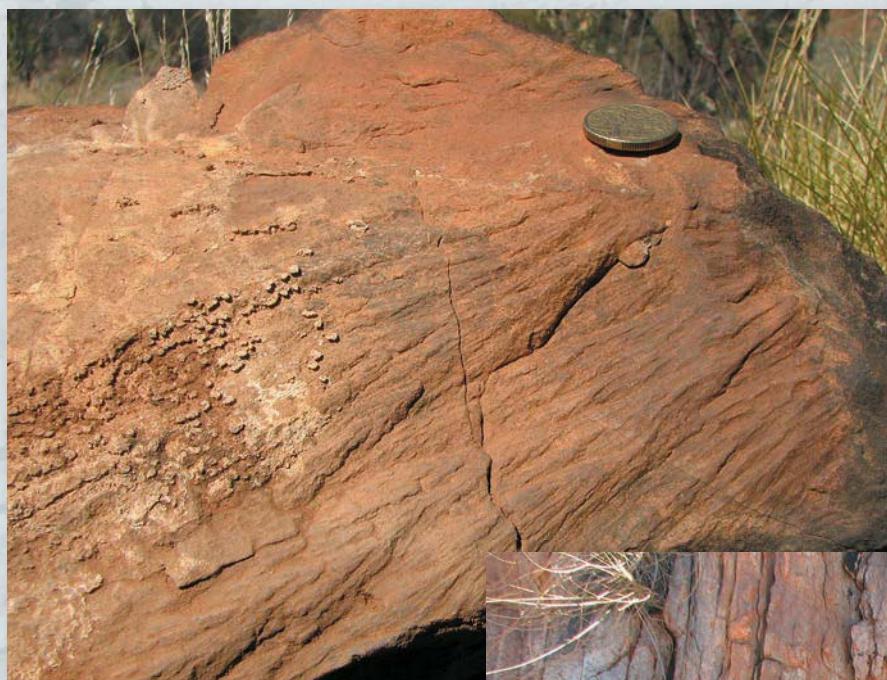


Suevit med glasklump, der indeholder aflange glasblærer. Otting stenbruddet i Ries krateret, hvor de første Apollo-astronauter blev uddannet, inden de landede på Månen i 1969. Mønt som skala.

Foto: Adam A. Garde.



Gosses Bluff kraterstrukturen: resterne af den opløftede kerne set fra nord. De ydre dele af krateret og kraterranden er eroderet helt væk.
Foto: Adam A. Garde.



'Shattercones': koniske trykstrukturer i en løsblok af finkornet kalksten fra midten af Gosses Bluff kraterstrukturen. De koniske trykstrukturer er skabt af chokbølgen og er et karakteristisk og sikkert kendetegn for kraterstrukturer i den øverste del af jordskorpen. De er dybt forgrenede og gennemtrænger hele stenen.
Foto: Adam A. Garde.

Chok-opsprækket kalksten i midten af Gosses Bluff kraterstrukturen.
Foto: Adam A. Garde.

blevet kastet ud i periferien af strukturen. Gosses Bluff er en hellig struktur for Australiens oprindelige befolkning, og fremmede besøgende skal have en lokal guide med. Når man går rundt langs den lille sti i kraterets midte, forundres man over de store kræfter, som har opsprækket, knust og ødelagt kalkstenene i miles omkreds. Man kan ret let finde gode eksempler på 'shatter cones' (se ovenfor), som er et af de få alment accepterede og endelige beviser på chokpåvirkning ved en ekstraterrestrisk kollision. De ydre dele af kraterstrukturen og kraterranden er eroderet væk, og der er ingen bevarede rester af smeltede bjergarter.





HER KAN DU LÆSE MERE

Brænder du efter at læse mere om berømte meteoritter og meteoritkratere fra hele verden; om solsystemets dannelse; om meteoritjagt eller måske om den danske samling af meteoritter mv., så er Henning Haacks bog: 'Meteoritter' fra 2012 et rigtigt godt bud.



Harmonikafolder mellem kraterstrukturens nedknuste centrum og smelteringen, som skyldes sideværts sammenpresning ved vibrationerne under meteoritnedslaget.

Foto: Adam A. Garde.

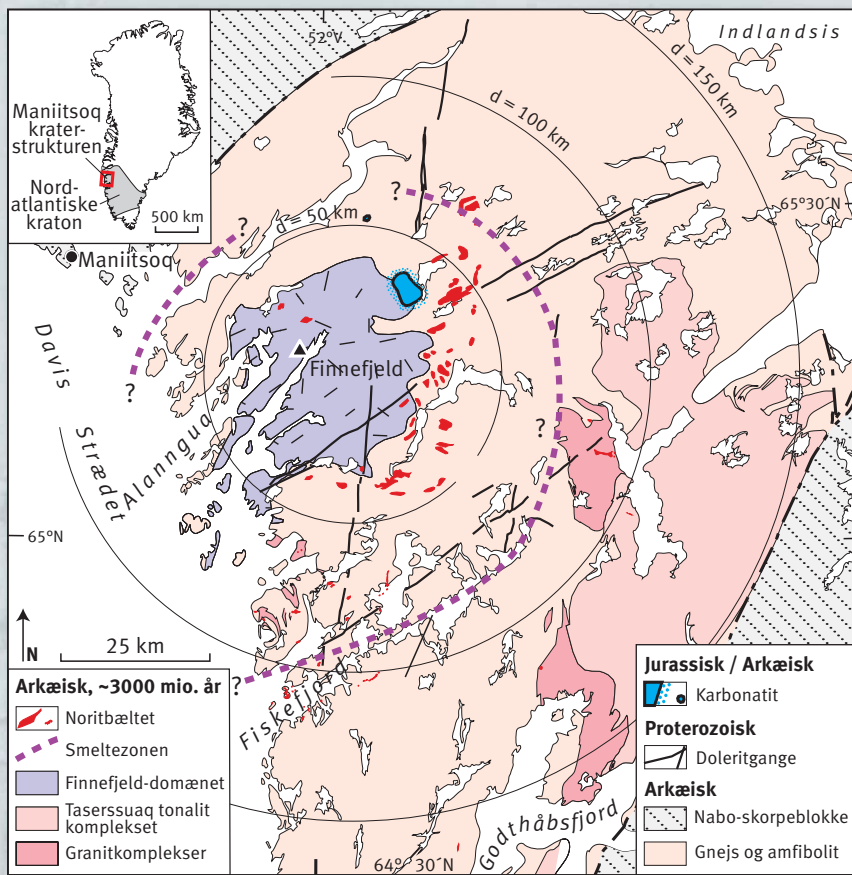
MANIITSOQ KRATERSTRUKTUREN: EN GAMMEL, NEDSLIDT KÆMPE

Maniitsoq kraterstrukturen ligger sydøst for byen Maniitsoq i Vestgrønland. Den dækker det meste af området mellem kysten og Indlandsisen og er af mange forskellige grunde unik. Strukturen blev 'opdaget' ved et skrivebord i København i 2009, hele 3 milliarder år efter at en meteorit på måske 30 km i diameter slog ned med ufattelig kraft i et område, der geologisk set har lignet den japanske øbue i dag. Størrelsen af nedslaget taget i betragtning må det forventes, at denne meteorit har afstedkommet en 'global impact' af mindst

samme størrelse som Chicxulub-nedslaget for 65 millioner år siden. Der var bare ikke meget liv dengang. Projektilet ramte et geologisk aktivt område med vulkanisme, pladetektoniske bevægelser og varmepåvirkning i undergrunden. Den første beskrivelse blev offentliggjort i en videnskabelig artikel i 2012, og strukturen er endnu ikke officielt anerkendt. Der er dog flere artikler på vej, og det er formentlig blot et spørgsmål om tid, før kraterstrukturen bliver internationalt accepteret.

I dag er der ikke noget krater at se i Maniitsoq-området. Det er for længst slidt ned og forsvundet. Området ligner umiddelbart de fleste

andre dele af grundfjeldet i det sydlige Vestgrønland. De dominerende bjergarter er grå, brune og svagt purpurfarvede gnejser og granitter med rester af vulkanske lavabælter. Ved at sammenligne med omgivelserne kan man se at hele regionen er eroderet 25 km ned i løbet af de 3 milliarder år, der er forløbet, siden meteoritten slog ned. De klipper, man nu går rundt på eller sejler forbi, var altså dengang en del af den dybe jordskorpe. Maniitsoq betyder 'det ujævne land', og nutidens vestgrønlandske landskab er skabt af istiden. Uregelmæssige fjeldmassiver og knolde i mange forskellige højder står tilbage mellem plateauer, slugter og dale,



Forenklet kort over Maniitsoq kraterstrukturen. Finnefjeld-domænet i midten består af totalt knust og mekanisk homogeniseret materiale. De seneste undersøgelser har vist, at smeltezonen rundt om Finnefjeld-domænet er betydeligt større end vist på tidligere kort (for eksempel i Geoviden 4, 2012).

Illustration: Adam A. Garde.

hvor istidens gletsjere har været på arbejde. Områdets geografiske vartegn er det over 1097 m høje Finnefjeld (side 19), som også markerer midten af de bevarede rester af kraterstrukturen.

For overhovedet at kunne efterlade spor i hele 25 kilometers dybde må det oprindelige Maniitsoq krater have været væsentligt større end alle de andre kraterstrukturer, som man indtil nu har fundet på Jorden. Den oprindelige størrelse af det færdige krater på Jordens overflade kan ud fra modelberegninger anslås til i omegnen af 500 km. De dybe rester af Maniitsoq kraterstrukturen, som er bevaret i dag, har en diameter på omkring 150 km, men det er temmelig usikkert, hvordan resterne af strukturen egentlig skal afgrænses. Til sammenligning er den ældste og hidtil kendte største kraterstruktur, Vredefort i Sydafrika, 'kun' godt 2 milliarder år gammel. Vredefort kraterets oprindelige størrelse var omkring 250 km, og det er kun eroderet ca. 10 km ned (se boks side 8).

Hvordan blev Maniitsoq-kraterstrukturen overhovedet fundet, når der nu ikke kan ses

noget krater i landskabet? Det er lidt af en geologisk detektivhistorie. De første relevante iagttagelser blev gjort af den nu afdøde geolog Asger Berthelsen omkring 1960, sjovt nok næsten samtidig med, at Ries krateret i Tyskland blev verificeret. Berthelsen var allerede på dette tidspunkt en meget dygtig iagttagere, og ved at se på mineralteksturer i mikroskop konstaterede han, at hele Finnefjeld-området i modsætning til omgivelserne en gang for meget længe siden måtte have været fuldstændig knust. Han havde dog ingen forestilling om, hvad der kunne have forårsaget denne knusning, og hans observationer gik senere i glemmebogen. Geologisk kortlægning og mineral efterforskning i løbet af de følgende årtier afslørede dog, at regionen også indeholder mange andre geologiske mærkværdigheder, som var svære, ja faktisk umulige at forklare – indtil ideen om en enorm og dybt nederoderet kraterstruktur kom frem. Artiklen om Maniitsoq strukturen fra 2012 opregner ikke mindre end 15 forskellige, højst unormale geologiske

forhold, som pludselig fik en helt ny betydning som ingredienser i en ekstremt stor og dybt nederoderet kraterstruktur. I det følgende vil vi beskrive et par af disse forhold.

Som Maniitsoq kraterstrukturen fremstår i dag består den i al sin enkelhed af en enorm, totalt knust kerne (Finnefjeld-domænet). Over den knuste kerne er der forsvundet omkring 25 km materiale ved erosion. Kernen har en udbredelse på ca. 35 x 50 km, som er omgivet af en mange kilometer bred, ringformet smeltezone. I smeltezonen ses direkte opsmeltning af mineraler og intens knusning, begge dele med stærkt varierende intensitet. Længere ude i periferien af strukturen ses en mindre intens knusning og lokale smeltefænomener ud til omkring 75 km fra centrum, svarende til ca. 150 km i diameter. Øst for den nedknuste kerne og ned gennem smeltezonen ligger noritbæltet. Det er en 75 km lang, nærmest agurkeformet zone, som indeholder langt over 50 meget markante og homogene intrusioner af forskellig størrelse. Intrusionerne stammer fra stensmelter (magma), som er dannet i Jordens kappe i forbindelse med nedslaget og derfra er trængt op i jordskorpen. Magmaet var meget varmt og har også været i stand til at smelte noget af den omkringliggende skorpe og blande sig med den. Når stensmelter fra kappen og skorpen blandes direkte med hinanden, får de en karakteristisk kemisk sammensætning, som kaldes norit. Man kan faktisk forestille sig, at noritbæltet repræsenterer en kæmpemæssig og meget kortlivet revne hele vejen ned gennem jordskorpen, hvorfra der er strømmet stensmelter op fra kappen.

Store dele af strukturen viser desuden tegn på kraftig omdannelse og smeltning under medvirken af vand. Bjergarterne under bunden af krateret har således været stærkt påvirket af varmt vand. Ikke vand, som vi kender det, men H₂O i såkaldt superkritisk tilstand under meget højt tryk og temperatur, hvor skillelinjen mellem væske og damp er forsvundet. Denne proces kaldes hydrotermal omdannelse. Vi formoder, at overfladevand eller måske mere sandsynligt store mængder havvand er trængt ind i det unge krater. De første vandmasser er givetvis fordampet eksplosivt, men efter en delvis afkøling af kraterstrukturen har det varme vand kunnet cirkulere rundt i store konvektionsceller i det indre af jordskorpen, som var 'lukket op' og gjort tilgængelig af den voldsomme opspækning og knusning.

KNUSNING I MANIITSOQ

Fotoet viser en geologisk blotning af en ganske almindelig grå gnejs med nogle højst usædvanlige strukturer, som er fundet i højlandet øst for kraterstrukturens midte. Man ser flere aflange legemer i forskellige grå nuancer, som er trængt ind i hinanden i flere omgange. Normalt ville der være tale om forskellige generationer af stensmelter, som var trængt ind, størknet og deformeret gennem en periode på millioner af år. Men en nærmere undersøgelse afslører, at der er tale om nogle helt ekstreme, ja nærmest 'umulige' bjergarter, og at de må være dannet på få minutter. Geoviden præsenterer her for første gang en nærmere beskrivelse af, hvad der egentlig foregik.

De aflange, grå legemer repræsenterer slet ikke størknede stensmelter, men består af knust og derefter sintret (sammenkittet) gnejsmateriale. Under mikroskop ser man massevis af ganske små krystalfragmenter med skarpe kanter, og de forskellige grå nuancer svarer til forskellige grader af nedknusning. Bjergarterne er 'umulige', fordi de er opstået dybt inde i jordskorpen, 20–25 km under overfladen. Der nede foregår selv den mest intense deformation i

forbindelse med almindelige bjergkædedannelse meget langsomt, og alle bjergarter er så bløde, at de reagerer ved at blive bøjet, strakt, trykket sammen eller udvalset, men aldrig knust. Normalt kan det ganske enkelt ikke lade sig gøre at knuse en bjergart i den nedre del af jordskorpen.

De mærkelige mikrostrukturer, som kan ses i boksen om choksmeltning på de næste to sider, afslører, at der opstod meget voldsomme svingninger og rystelser i jordskorpen lige efter, at selve chokbølgen var passeret. Det er disse rystelser, som også har knust den grå gnejs på billedet og flyttet rundt på det knuste materiale. Det hurtigt gentagne tryk og træk under jordskorpens rystelser har først produceret masser af tætsiddende, lodrette sprækker i gnejsen, og derefter knust det ene gnejspanel efter det andet og med et fint ord *fluidiseret* det knuste materiale. Stenpulveret har nu kunnet bevæge sig af sted i kortvarige pulser synkront med rystelserne, indtil det 'satte sig' og blev klemmt fast, og nye paneler af gnejs blev smadret og fluidiseret. Hele processen har formentlig kun taget nogle minutter.



Foto: Adam A. Garde.

CHOKSMELTNING AF MINERALER I MANIITSOQ KRATERSTRUKTUREN

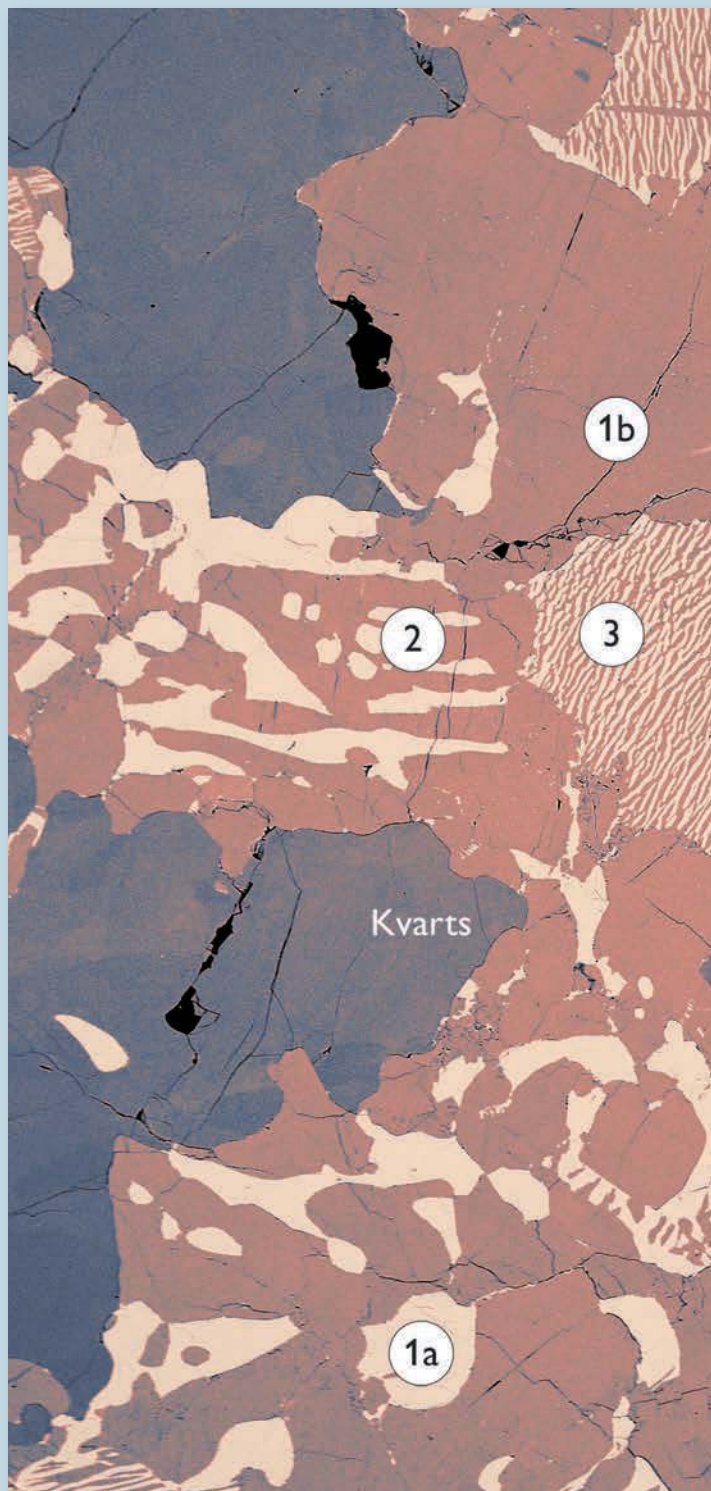
I Maniitsoq kraterstrukturens smeltezone ser man varierende grad af choksmeltning af mineraler. Det er en proces, som kun forekommer på Jorden i forbindelse med kraterdannelse ved meteoritnedslag samt helt lokalt ved lynnedslag. Choksmeltning kræver meget høje temperaturer i intervallet omkring 1500–2500°C, og almindelige bjergarter i jordskorpen ville for længst være smeltet på normal vis, inden de nåede op på så høje temperaturer. Det særlige ved choksmeltning er, at den foregår lynhurtigt – temperaturstigningen på grund af chokbølgen sker på brøkdelen af et sekund. De enkelte mineraler har slet ikke tid til at reagere med hinanden, men smelter spontant og øjeblikkeligt, hvis deres specifikke smeltetemperatur overskrides. Under kollisionen mellem projektilet og jordskorpen sker der en voldsom elastisk sammenpresning af jordskorpen samtidig med opvarmningen og choksmeltningen. Umiddelbart derefter sker der en udvidelse tilbage mod det gamle volumen. Denne udvidelse **forbruger** varme, og derfor er temperaturstigningen under chokmetamorfosen inde i jordskorpen meget kortvarig.

HVAD VISER TYNDSLIBET

Figuren viser en ganske lille, poleret flade på ca. 3 x 3 mm af en granit med choksmeltning, set i et skanning elektronmikroskop, og Geoviden præsenterer her for første gang et nærmere eftersyn af denne mærkelige og meget sjældne bjergart. De mørke områder er kvarts, som næppe har været smeltet. De stærkt mønstrede, lysebrune og brune områder består af to ganske almindelige feldspatmineraller, nemlig kalifeldspat og plagioklas. Det viser sig, at de to slags feldspat kan deles op i områder med tre meget forskellige teksturer. Der er både 'rene' områder (1a) og (1b), og områder, hvor de to slags feldspat danner masser af smalle tunger og lober (2), som er flettet og filtret ind i hinanden, og endelig områder, hvor ganske tynde lameller af de to slags feldspat regelmæssigt veksler med hinanden (3).

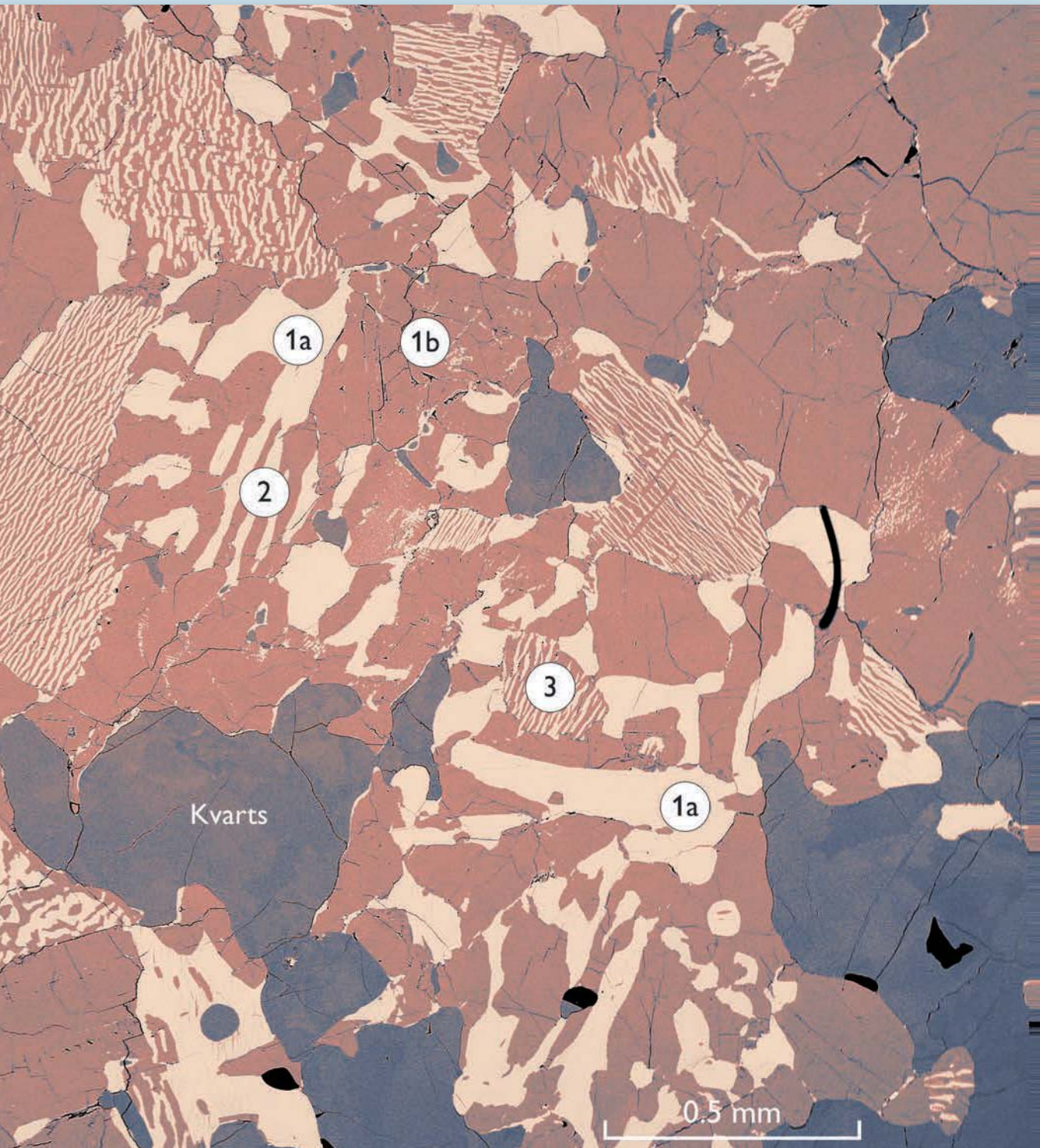
Hvad i alverden kan disse mærkelige mønstre fortælle os? Jo, idet chokbølgen passerede, overskred choktemperaturen smeltegrænsen for begge typer af feldspat, som derfor smeltede spontant. Vi ser resterne af processen i de rene klatter af henholdsvis lysebrun og brun feldspat (områder 1a og 1b). Samtidig begyndte hele jordskorpen at vibrere voldsomt på grund af det ekstremt kraftfulde nedslag, og de to feldspatsmelter begyndte at løbe ind i hinanden (områder 2). Svingningerne har formentlig haft en frekvens på langt under et sekund, så det har faktisk svaret lidt til at ryste en cocktail – med klumper af ikke-smeltet kvarts i stedet for isterninger eller oliven. Nogle steder blev blandingen af de to feldspatsmelter total, og de flød sammen til én. Det er områder 3. Men nu bliver det lidt mere kompliceret. På dette tidspunkt – vi er nu nået nogle minutter frem efter nedslaget – klingede vibrationerne af, choktemperaturen faldt, og de forskellige feldspatsmelter blev igen til faste krystaller. Under den fortsatte afkøling af de nye feldspatkrystaller foregik der en såkaldt *afblanding*, der hvor de to feldspatsmelter havde blandet sig helt med hinanden. Nu vandrede de to feldspatkomponenter hver til sit over afstande på tiendedele millimeter. Det er det, vi ser i områderne 3 med de ekstremt tynde, afvekslende lameller. Den slags feldspat kaldes mesoperthit.

Mesoperthit kendes udmærket fra almindelige bjergarter, der er omkrystalliseret – metamorfoseret – under normale geologiske processer ved relativt høje temperatur- og trykforhold. Men under normale, jordiske omstændigheder ville al feldspaten så bestå af mesoperthit, som ville danne

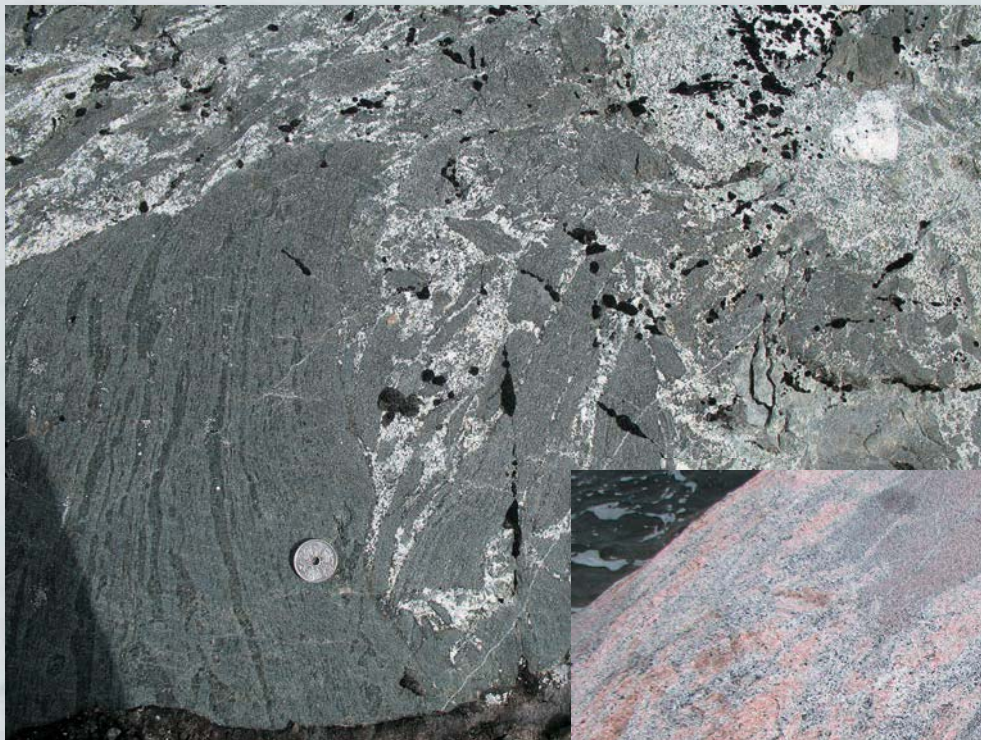


pæne, store, regelmæssige korn i direkte kontakt med pæne, store kvartskorn. I Maniitsoq kraterstrukturen kan vi med egne øjne se, at der fra starten var to slags feldspat, som først blev totalt smeltet, derefter blev blandet ganske

grundigt sammen, og til sidst, efter krystallisationen, blev afblandet i de områder, hvor blandingen forinden havde været total.



Skanning elektronmikroskop-billede af en choksmeltet granit. Der er lagt kunstige farver oven på billedets gråtoner for bedre at adskille de tre mineraler: kalifeldspat (gul), plagioklas feldspat (brun) og kvarts (mørk gråblå).
Billede: Nynke Keulen og Adam A. Garde.

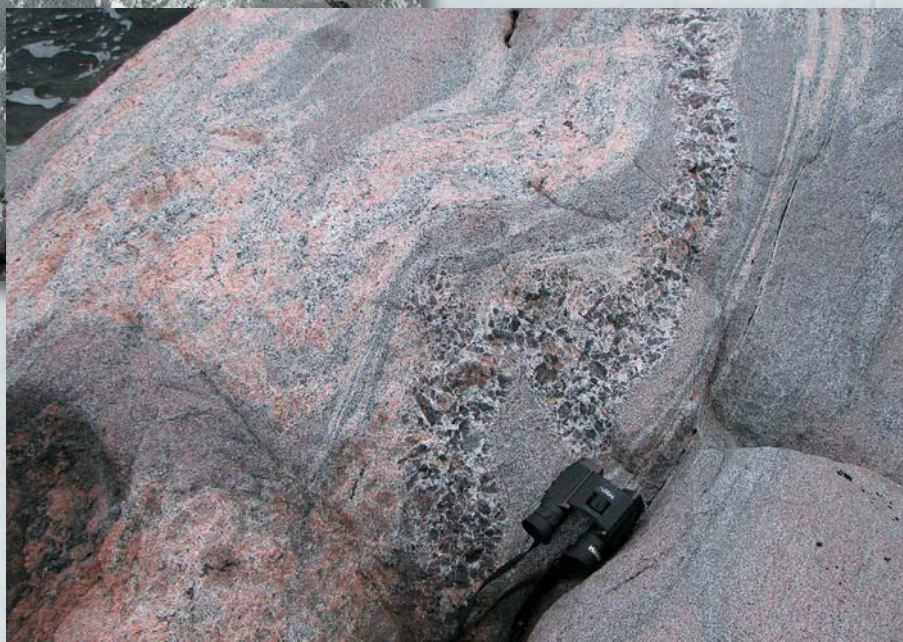


Breccie af amfibolit med lokal opsmeltning af granit. Man kan se, hvordan stumper af den mørke amfibolit er trukket væk fra moderklumpen, som er gennemsat af fine sprækker. Bemærk, at denne breccie er dannet dybt nede i jordskorpen, og ikke på overfladen som Bunte Breccie i Ries krateret.

Foto: Adam A. Garde.

Totalt opsmeltet grå gnejs på en lille ø nær bygden Napasoq med mobiliserede årer af to slags smelter. De lyserøde årer til venstre er kalifeldspat. Den mørkere åre i midten består af plagioklas og kvarts.

Foto: Adam A. Garde.



MINERALSKE RÅSTOFFER I MANIITSOQ KRATERSTRUKTUREN

Når magmaer fra kappen af den ene eller anden grund bliver blandet med materiale fra jordskorpen og bliver til norit, kan små mængder af en svovlholdig smelte blive udskilt. Denne smelte vil tiltrække og opfange tungmetaller som nikkel og kobber, samt ædelmetaller som guld, palladium og platin. Det er også sket i noritbæltet. Det canadiske mineralprospekteringsselskab *North American Nickel* har siden 2011 søgt efter nikkel og kobber, og man fortsætter i 2013. Det har faktisk været velkendt siden 1960'erne, at der er forekomster af nikkel og kobber i noritbæltet, og de har tidligere været undersøgt. Imidlertid har skattejægerne igen fået blod på tanden i kraft af den nyvundne forståelse af bæltets oprindelse kombineret med nye geofysiske metoder til påvisning af skjulte mineralforekomster. Denne udvikling har sat forekomsterne i et nyt og spændende perspektiv.

Tæt ved midten af Maniitsoq kraterstrukturen findes der også nogle langt yngre, diamantførende gange, som stammer fra en minimal grad af opsmeltning dybere nede i kappen for knap 600 millioner år siden. Lige ved siden af ligger der også et karbonatit-kompleks med økonomisk interessante metaller, så som tantal og niob, som også stammer fra kappen. Man kunne få den tanke, at Maniitsoq-nedslaget kan have sat sig permanente spor i den

øvre del af kappen, som senere kan have styret lokaliseringen af de diamantførende gange og karbonatit-komplekset. En sådan sammenhæng er dog svær at efterprøve.

HVORFOR ER METEORITTER OG KRATERSTRUKTURER SÅ INTERESSANTE?

Meteoritter og kraterstrukturer er udtryk for dramatiske og spændende hændelser, som appellerer til vores indre drengerøv. Men de indeholder også nøgler til en helt fundamental viden om Jordens og solsystemets udvikling. Rent intellektuelt er kraterstrukturer meget spændende at undersøge, fordi de alle er forskellige og sætter fantasien på prøve. De processer, som formede dem, foregik i løbet af sekunder og minutter i stedet for millioner og milliarder af år, men man kan stadig komme langt med simple observationer og ræsonnementer, som feltgeologer møjsommeligt har udviklet ved undersøgelser af de almindelige, meget langsomme geologiske processer.

Kraterstrukturer og meteoritter indeholder også vigtige oplysninger om de fysiske processer, der foregår i materialer, som udsættes for ekstrem tryk- og varmepåvirkning. Det er ingen tilfældighed, at forskere under udviklingen af atombomben var meget interesserede i både kraterstrukturer og planetforskning. Desuden har det vist sig, at flere af de største kraterstrukturer indeholder store mængder af værdifulde mineraler og råstoffer som guld, diamanter, nikkel eller olie. Verdens største guldforekomster i Sydafrika ligger således langs kanten af Vredefort krateret, der er Jordens næstældste og næststørste krater. Andre af Jordens store kraterer indeholder nikkelforekomster; industridiamanter, der er fremkommet ved chokbølgens møde med kulaflejringer; eller olieforekomster, se side 8. Søer i store kraterstrukturer kan også repræsentere vigtige lokale vandressourcer og give mulighed for fiskeri.

Det 1097 meter høje Finnefeld ligger i den centrale del af Maniitsoq kraterstrukturen. Placeringen kan også ses på kortet side 14 som en sort trekant.

Foto: Adam A. Garde.

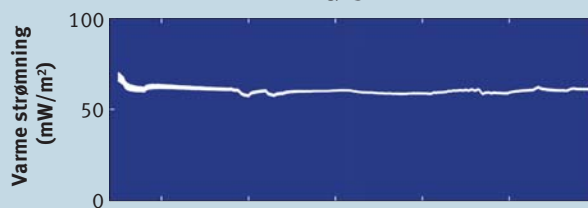


Den ene af forfatterne til artiklen, Adam Garde, har modtaget Danmarks Geologipris 2012 for sit enestående arbejde med at beskrive Maniitsoq kraterstrukturen.

Foto: Kim Esbensen.

RETTELSE TIL GEOVIDEN-1 2013 SIDE 5:

Aars-1



Grafen i figuren øverst på side 5 var faldet ud på vej til trykkeriet. Figuren er hér gengivet korrekt.

RETTELSE TIL GEOVIDEN-1 2013 SIDE 10:

Klimaet i Miocæn var varmt, men årsmiddeltemperaturen nåede dog 'kun' knap 20 grader og ikke de 200, som der fejlagtigt står.

Redaktionen



Foto: Peter Klaus / Wama Moors.



GeoTreat er en turist-portal, der er udviklet til at guide og introducere besøgende til geologiske seværdigheder. I dag er Sverige, Norge, Danmark, Finland og Australien tilsluttet. Med GeoTreat kan du finde geologiske seværdigheder på din mobiltelefon, hjemmefra eller ude i naturen. Antallet af lokaliteter i app'en vil jævnligt blive øget.

Foto: Merete Binderup.

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenkab og Geologisk Museum (Statens Naturhistoriske Museum) begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenkabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

REDAKTION

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Finn Preben Johansen, tlf.: 38 14 29 31, e-mail: fpj@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

ISSN 1604-6935 (papir)

ISSN 1604-8172 (elektronisk)



Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidefoto: Meteor-spor, Skotland, 21.09.2012.

Foto: Th. Heaton, Science Photo Library, SCANPIX.

Reprografisk arbejde: Benny Scharck, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

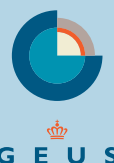
DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 38 14 20 00

E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG NATURFORVALTNING (IGN)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 35 32 25 00

E-mail: sl@life.ku.dk

GEOLOGISK MUSEUM (SNM)

Øster Voldgade 5-7

1350 København K

Tlf: 35 32 23 45

E-mail: rcp@snm.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE

Aarhus Universitet

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670

8000 Århus C

Tlf: 89 42 94 00

E-mail: geologi@au.dk

