

# Geologiske brag

## - meteornedslag og atombomber

af geologerne Steen Laursen og Carsten Rabæk Kjaer

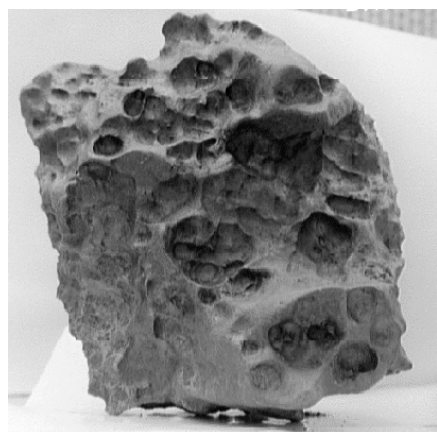
Jordskælv og vulkanudbrud er gode eksempler på geologiske begivenheder, som nærmest er øjeblikkelige. En anden kategori af hastige, katastrofale begivenheder er meteornedslag, og i historisk tid er endnu en type dukket op: atombombesprængninger.

Geologiske processer er ikke altid noget, der forløber over et ufatteligt tidsperspektiv. Når naturkræfterne virkelig slipper løs i form af jordskælv og vulkanudbrud, kan der ske store ændringer på kort tid. Hvis man ser bort fra de begivenheder, Jorden selv står fadder til, findes der to udefra kommende fænomener, som øjeblikkeligt kan ændre på geologien: Meteornedslag og kernevåbensprængninger.

Da Frankrig under stor ståhej genoptog sine atomprøvesprængninger på den hårdt prøvede Mururoa-atol i Stillehavet, startede en gammel diskussion på ny: Slipper der noget farligt ud fra sådanne underjordiske sprængninger? Nu, hvor røgen har lagt sig, ser vi lidt på de geologiske sider af sagen.

### Meteornedslag og atomekspllosioner

Siden de første underjordiske atomprøvesprængninger har geologer interesseret sig meget for effekterne af disse. Det er der to grunde til. For det første sker der i forbindelse med sprængningerne ændringer i den



Jernmeteorit med forvittringsgruber. (Arkivfoto)



Et af Jordens yngste meteorkrater er Barringer Crater i Arizona i USA, som er omkring 40.000 år gammelt. I forrige årh. gravede man efter meteoritten i krateret for af udvinde nikkel af den. I dag ved vi, at den fordampede ved nedslaget. (Arkivfoto)

lokale geologi, som ligner dem, vi finder i et meteorkrater. Og da det er sjældent, der dannes meteoritkraterer – det er faktisk ikke sket i historisk tid – giver kernevåbnene os en kærkommen mulighed for at studere et fænomen, der “lugter lidt af fisk”. For det andet forårsager atomsprængninger så voldsomme rystelser, at man verden over kan måle på dem og derigennem få oplysninger om Jordens opbygning.

Sammenligningen mellem meteornedslag og kernevåbensprængninger er oplagt, og i meteorkraterforskningens historie har data fra kernevåbenforsøgene da også været meget vigtige, når man skulle afgøre, om en struktur stammede fra et meteornedslag.

### Meteornedslag

Himmellegemer forvilder sig til stadighed ind i Jordens atmosfære. Årligt indfanges omkring 1 mio. ton materiale, men det er kun en brøkdel af det, der når Jordens overflade, endsiges giver anledning til et krater.

Når mindre meteoritter rammer overfladen med en begrænset hastighed, laver de blot “huller”, der kan være op til 35 m i diameter. Bjergarterne i hullet er slået i stykker, hvilket ofte også gælder for meteoritten, der ligger i hullet. Større meteoritter nøjes ikke med at lave huller i landskabet – de danner kraterer. Her er der tale om himmellegemer på over 100 ton, som rammer Jorden med en hastighed på 15-20 km pr. sekund.

### Nördlinger Ries-krateret

Nördlinger Ries i Sydtyskland er et godt og velundersøgt eksempel på et meteorkrater. Det blev dannet for omkring 14,7 mio. år siden, da en meteorit på 3 - 4 km i diameter ramte området med en hastighed på omkring 20 km pr. sekund. Ved nedslaget blev der frigjort så store energimængder, at temperaturen kom op over 30.000°C. Meteoritten samt en del af de ramte bjergarter fordampede simpelthen, mens op mod 200 km<sup>3</sup> bjergart smeltede (det svarer til en terning på godt 6 x 6 x 6 km!). En del af denne enorme mængde smelte blev kastet op i luften og landede som afrundede glasstykker, tektitter, op til 400 km øst for krateret. Lige omkring krateret blev der dannet så tykke lag af sammensvejset glas og knuste bjergarter, at lokalbefolkningen siden har brudt materialet til byggeri, bl.a. til St. Georg Kirke i Nördlinger Ries.

Ved nedslaget, som tog brøkdelen af et sekund, forplantede en enorm trykbølge sig igennem de omkringliggende bjergarter, som knustes, mens sidebjergarterne blev presset ud til siden. Her dannede de en markant oppresset, ringformet rand med en diameter på omkring 25 km.

Mineralerne i de berørte bjergarter undergik desuden betydelige forandringer på den tid, det tog trykbølgen at passere dem (boks). Omdannelsen af bjergarterne har meget passende fået navnet chok-metamorfose. Navnet kommer fra trykbølgen, som også hedder en chokbølge.

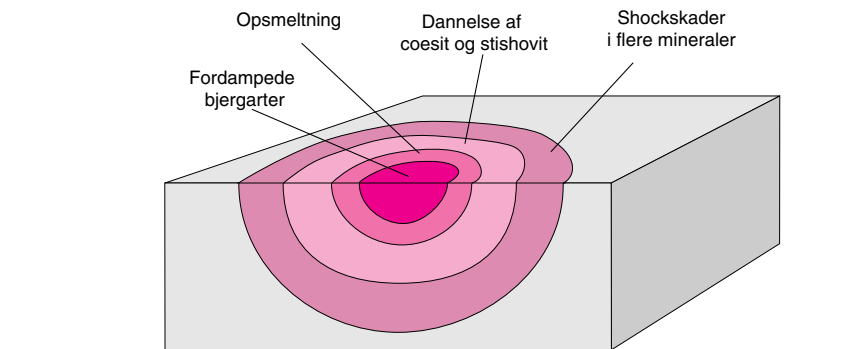
Forløbet ved Nördlinger Ries er almindeligt for et meteornedslag, omend det er noget større end de fleste. I visse tilfælde kan der forekomme en opskydning af stærkt omdannede bjergarter midt i krateret som reaktion på den voldsomme kompression lige under nedslagsstedet.

### Chok-metamorfose

Ved chok-metamorfose sker der store forandringer i bjergarternes mineraler, bl.a. i kvarts og alkali- og plagioklas-feldspat. Længst væk fra krateret, optræder kvarts med 6-7 spalteretninger, selv om kvarts normalt ikke har nogen spalteretning.

Lidt tættere på nedslagsstedet mister kvartsen og feldspaterne helt eller delvist deres dobbeltbrydning, et sikkert tegn på, at deres krystalstruktur er voldsomt beskadiget. Graden af beskadigelse afhænger af krystallens orientering i forhold til chokbølgens retning. Derfor kan man se plagioklaskrystaller, hvor det ene sæt tvillinger er dobbeltbrydende, mens det andet ikke er. Kvarts og feldspat kan være så beskadiget, at de reelt er omdannet til glas, men da de aldrig har været smeltede, består deres korngrænser stadig. I forbindelse med dette glas optræder for første gang højtryksmineralerne coesit og stishovit, der dannes af  $\text{SiO}_2$  fra kvarts ved meget høje tryk (boks).

Hvor temperaturen har været over smeltepunktet for kvarts og feldspat (ca.  $1700^\circ\text{C}$ ), er smelte fra dem løbet sammen og har dannet et mere eller mindre opblæret glas. Derfor er alle bjergartens



Skitse af de forskellige zoner, der optræder uden om et større meteorkrater. (Grafik: SL og CRK)

oprindelige strukturer væk her.

Aller inderst i krateret har den oprindelige bjergart været fuldstændig smeltet. Det resulterende materiale består af glas med coesit, stishovit og andre mineraler.

### Atomprøvesprængninger

Lad os nu rette blikket mod atombomberne, som i styrke fint kan måle sig med et meteornedslag.

I 1962 placerede man en atombombe, der i saft og kraft svarede til 5.000 ton TNT (sprængstof), i en skakt i basalten under Nevada Test Site i USA. Da bomben sprang, opstod der temperaturer på over en million grader og tryk på nogle tusind kilobar. Resultatet var, at atombombe, skaktfyld og omkringliggende basalt simpelthen øjeblikkeligt fordampede og efterlod et hulrum. Samtidig forplantede en kraftig trykbølge sig ud gennem basalten i alle

retninger, hvorved den sprak kraftigt op. Basalt-dampen blev presset ud i de dannede revner, samtidig med at den opvarmede og fordampede siderne i hulrummet omkring eksplosionen. Efterhånden som dampens temperatur faldt, nøjes hulrummets sider med at smelte og løbe ned i bunden. Da damptrykket blev tilstrækkeligt lavt, kollapsede rummets loft, og de ovenliggende opsprækkede bjergarter ramlede ned i hulrummet, hvorved der dannedes en såkaldt skorsten af løse brokker. Skorstenen nåede op til jordoverfladen, som derfor blev mærket med et krater. Da det hele langt senere var kølet af, var hulrummets vægge dækket af glas. Det dannede hulrum fik en endelig radius på 19 m, hvilket svarer til op imod 80.000 ton fordampet basalt.

Det beskrevne forløb er typisk for en atomprøvesprængning i basalt, og den min-

## Chok-metamorfose

De mest almindelige former for metamorfose forløber over tusinder af år. Chok-metamorfose er en undtagelse

I det øjeblik en meteorit kolliderer med Jorden, påvirkes bjergarterne i nedslagsområdet pludseligt af meget stort tryk og meget høj temperatur. En del af meteorittens energi bliver til en chokbølge, der bevæger sig gennem bjergarterne. Chokbølgen er kort og intens og sammen med den høje temperatur, bliver mineralerne i bjergarterne øjeblikkeligt ustabile. Mineralerne vil forsøge at opnå ligevægt under disse nye forhold. Her er kvarts valgt som et eksempel på, hvor kompleks denne tilpasning kommer til udtryk.

Rent  $\text{SiO}_2$  kan, afhængigt af atomernes arrangement, forekomme som mange forskellige mineraler. Ved lave temperatur og trykforhold danner det kvarts. Med tiltagende temperatur opstår højtemperatur-faserne tridymit og kristobalite, men ved eks-

tremt højt tryk dannes højtryksfaserne coesit og stishovit. Coesit kan dannes af Jordens egne kræfter. Der er f.eks. fundet coesit-inklusioner i diamanter dannet i Jordens kappe. Coesit er også fundet som produkt af atomprøvesprængninger, men er i øvrigt en glimrende meteornedslagsindikator. Stishovit, der er den mest kompakterede form for  $\text{SiO}_2$  (massefylde  $4,28 \text{ g/cm}^3$ ), er kun fundet i forbindelse med store meteorkrater.

Glas er en indikator på den manglende tilpasningstid bjergarten har haft, og det findes ofte i store mængder i chokpåvirkede bjergarter. Der er der to slags ren  $\text{SiO}_2$ -glas. Den ene er lechatelierit, som opstår ved underafkøling af smeltet kvarts, det har en mindre vægtfylde end kvarts'. Den anden er diaplektisk glas, som ikke er dannet af en smeltefase, men direkte ved trykbølgens ødelæggelse af kvarts' struktur. Diaplektisk glas har større massefylde end kvarts'.

Umiddelbart efter meteornedslaget for-

svinder trykpåvirkningen, mens varmen er længere tid om at blive ledt bort. Den høje temperatur gør de nyligt dannede mineraler ustabile, så en del af højtryks og højtemperatur mineralerne vil blive omdannet til lavtryksmineraler og glas.

Der opstår også mikrostrukturer i kvarts ved chokmetamorfose. Planare brud opstår ved relativt højt tryk og planare choklameller ved meget højt tryk. Choklamellerne dannes ved, at gitteret i kvartskrystallen giver efter for trykket langs nogle bestemte gitterplaner. En meget lille del af kvartsen langs disse planer bliver til glas, der i et mikroskop ses som smalle lameller. (Billedet på næste side)

Nogle forskere mener at choklameller kan opstå i forbindelse med meget eksplosive vulkanudbrud. De fleste, der beskæftiger sig med chokmetamorfose, mener dog, at choklameller er et utvetydigt meteornedslags fænomen. *Birgit Skånvad.*

der i mangt og meget om et meteornedslag. I begge tilfælde udlades en enorm energi på et øjeblik, store mængder bjergarter fordamper eller smelter, og en trykbølge forplanter sig ud i de omkringliggende bjergarter og sprækker dem op. Hertil kommer, at atomprøvesprængninger også giver anledning til de mineralogiske ændringer, der blev beskrevet for meteornedslag. Men der er forskelle. Det tryk trykbølgen fra en atombombe udsætter bjergarterne for er f.eks. af længere varighed end det, der kommer fra et meteornedslag. Dette har stor betydning for omdannelsen af forskellige mineraler, da det er tidskrævende processer.

### Jordskælv udløst af atomvåben

Der er efterhånden mange eksempler på, at atomvåben udløser jordskælv.

I Yucca Flat, som er en del af Nevada Test Site, ligger forkastningen Yucca Fault. Over en årrække har man detoneret et antal atombomber omkring forkastningen. Det viser sig, at alle størrelser atombomber kan sætte gang i forkastningen. To forskydninger afgav seismisk energi svarende til mere end 0,1% af energien fra de udløsende atombomber. Desuden opdagede man, at de første detonationer forårsagede de største forskydninger i forkastningen. Det skyldtes, at eksplosionerne blot udløste spændinger, som på forhånd var opsparet i forkastningen efter tektoniske bevægelser.

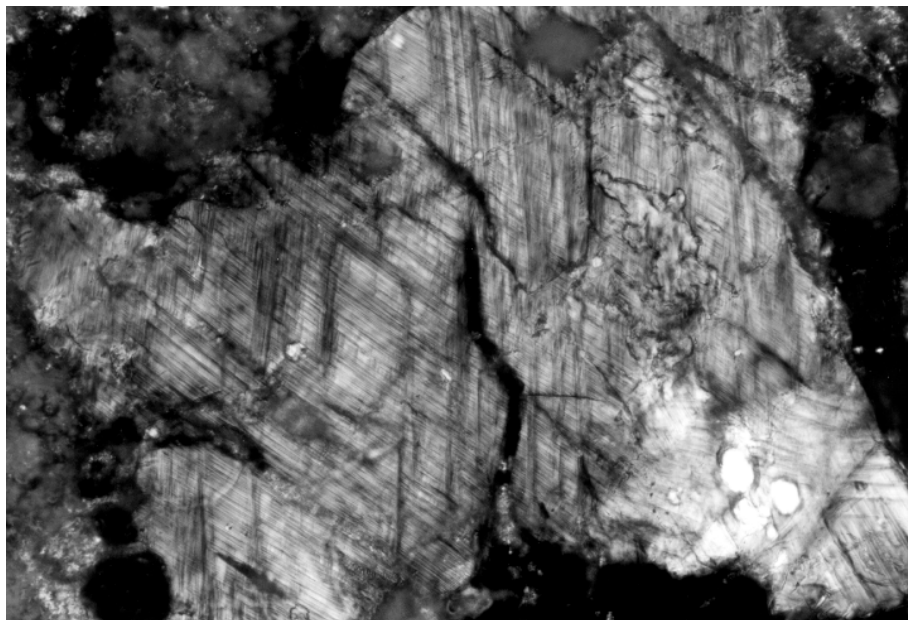
Der er forskellige meninger om, hvorledes eksplosionerne egentlig udløser et jordskælv. Man mener, at det enten sker ved, at de opsparede spændinger sammen med trykket fra detonationen bliver større, end modstanden i forkastningen kan holde tilbage, eller at rystelserne fra detonationen sænker modstanden i forkastningen.

### Atomvåben og miljøet

De åbenbare miljømæssige konsekvenser af kernevåbensprængninger i atmosfæren foranledigede, at man siden midten af 70'erne har udført alle forsøg under jorden. Tilbage står alligevel spørgsmålet: Udgør underjordiske sprængninger ikke også en risiko?

Dette spørgsmål er stadig aktuelt, selvom en række atommagter i 1996 underskrev en aftale, som skulle forbyde yderligere forsøg. For det første kan man jo aldrig vide, om en af underskriverne alligevel skulle få lyst til at genoptage deres forsøg. For det andet har Kina som en væsentlig atommagt ikke underskrevet aftalen, og for det tredje kan nye atommagter meget vel tænkes at dukke op i fremtiden.

Da Frankrig udførte deres forsøg, afviste de franske myndigheder al kritik af forsøgene. De beroligede kritikere med, at alle dele af de eksploderede atombomber på Mururoa vil være indkapslet i et tykt lag glas efter forsøgene. Derfor skulle intet



Mikroskopibillede af kvarts med deformationslameller og sprækker dannet ved meteornedslaget i Nördlinger Ries i Tyskland. Billedet dækker 0,2 x 0,3 mm og er optaget med krydsede polarisatorer (Foto: Birgit Skånvad)

trænge ud. Frankrig har dog igennem tiden været meget lukkede med hensyn til oplysninger om deres atomvåbenforsøg. Data om forsøgene bliver i allerhøjeste grad opfattet som militære hemmeligheder.

Heldigvis har amerikanerne ikke lidt af samme berøringsangst, og det skorter ikke på tilgængelige oplysninger om de miljømæssige konsekvenser af de mange forsøg

i Nevada Test Site.

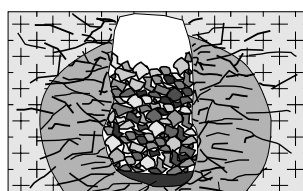
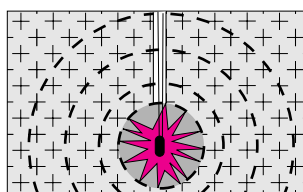
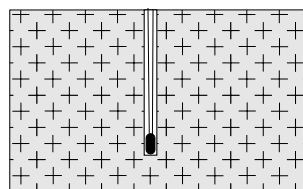
De franske forsøg blev i lighed med de amerikanske i Nevada udført i basalt, og som det amerikanske eksempel viste, trænger en blanding af fordampet basalt og atombombe ud lige efter sprængningen. Desuden opstår der et hul i toppen af det dannede hulrum, når skorstenen dannes – kun væggene og bunden er dækket af glas. Et tredje problem er, at glasset i hulrummet revner under størkningen og afkølingen – det er altså ikke tæt.

### Udslip

Kan man ikke direkte henvise til målte udslip fra de franske forsøg, er der dog glimrende indirekte beviser på, at underjordiske kernevåbenforsøg generelt giver anledning til udslip.

I forbindelse med det internationale forbud mod kernevåbenforsøg har man også et internationalt overvågningssystem, der skal afsløre syndere, der forbyder sig mod forbudet. Et af de redskaber, der knyttes store forhåbninger til, er scanning af atmosfæren for radioaktive gasser over sprængningsstedet – gasser, som så at sige suges ud fra sprængningsstedet via sprækker i bjergarterne. Specielt er de radioaktive isotoper xenon-133 og argon-37 velegnede.

Selvom de nævnte isotoper vides at have meget ringe effekt på mennesker, beviser de dog en ting: De underjordiske sprængninger er ikke fuldstændig tætte! Om de udgør en sundhedsrisiko er et spørgsmål, der minder om den hjemlige problemstilling om pesticider og drikkevand.



Glas Intens opsprækket zone

Princippet i en underjordisk atomprøvesprængning. Bomben bliver nedsenket i en skakt, og ved eksplosionen fordampes de nærmeste bjergarter, medens dem længere ude knuses af trykbølgen. Resultatet bliver et hulrum fyldt med nedfaldne brokker.