

Klimaændringer forårsaget af nedslag af asteroider eller kometer

Jørgen Bendtsen, Danmarks Miljøundersøgelser

I starten af juli måned i år opdagede astronomer en ca. 2 km stor asteroide, og de efterfølgende beregninger af asteroidens bane viste at der var en lille sandsynlighed for at den ville ramme Jorden den 1. februar 2019. Asteroiden, der fik betegnelsen 2002NT7, blev efterfølgende nøje observeret og efterhånden som dens bane blev bedre bestemt kunne sandsynligheden for et sammenstød reduceres, således at et nedslag på Jorden kunne udelukkes allerede i slutningen af juli måned. I de mellemliggende uger nåede historien dog at rydde forsiderne verden over, og herhjemme blev sommeridyllen forstyrret af pludselige dommedagsscenerier der ville følge et sådant nedslag. Opstandelsen lagde sig hurtigt, men truslen fra rummet er en faktor som vi ikke kan se bort fra, da den har påvirket livets udvikling igennem hele Jordens historie – men et faretruende nedslag kan heldigvis have lange udsigter.

For otte år siden observeredes for første gang en kollision mellem en planet og et større himmellegeme da fragmenter af kometen Shoemaker-Levy 9 ramte Jupiter i perioden 16.–22. juli 1994. To år forinden var kometen passeret tæt forbi Jupiter og den fragmenteredes på grund af tiltrækningskraften fra Jupiters store masse. Fragmenterne var op til 2 km i diameter og de havde en nedslagshastighed på omkring 60 km s^{-1} . Selve kollisionen kunne følges fra Jorden hvor udstrækningen af de støvskyer der fulgte nedslagene blev observeret til at være på størrelse med Jordens radius. Denne begivenhed gjorde det klart at kollisioner mellem planeter og asteroider/kometer ikke blot kunne henlægges til en fjern fortid tidligt i solsystemets historie, man at store nedslag på planeterne er en igangværende proces.

Idag er der observeret 467 objekter som krydser Jordens bane og som kommer indenfor en afstand af 0.05 AU af Jorden (1 AU er afstanden mellem Jorden og Solen) og som samtidigt er større end ca. 150 m i diameter. Disse objekter udgør en potentiel risiko for et fremtidigt nedslag og de ville afstedkomme alvorlige ændringer af forholdene på Jorden. Udover at kortlægge den potentielle risiko der er forbundet med disse nære objekter, kan studiet af kometer og asteroider give information om de tidligste stadier af solsystemets dannelse for ca. 4.6 milliarder år siden, så derfor bruges der idag mange ressourcer på observationer af disse relativt uanseelige himmellegemer.

Nedslag på Jorden

Det største nedslag på Jorden i nyere tid fandt sted i Tunguska den 30. juni 1908, hvor et himmellegeme,

formentlig et lille fragment af kometen Encke, eksploderede i 8–9 km højde og jævned et skovområde med en radius af ca. 30 km med jorden. De efterfølgende dage var der “ekstra” lyse nætter i Nordeuropa på grund af reflekteret lys fra støvpartikler i den øvre del af atmosfæren. Energien i eksplosionen modsvarede 10–20 Mt TNT, men det var kun ca. 1 % af energiudladningen der nåede jordoverfladen i form af en trykbølge. Dette er stadig en energiudladning der er ca. 10 gange større end atombomben over Hiroshima ($\approx 15 \text{ kt}$), og det viser hvor store kræfter der kan udløses ved et nedslag på Jorden.

Tabel 1. Nedslags-frekvens

Nedslags-energi [Mt]	Diameter [km]	Nedslags-interval [år]	Ventetid indenfor Månebanen [år]
10^{-2}	0.007	0.5	
10^{-1}	0.014	5	
10^0	0.03	30	
10^1	0.07	200	
10^2	0.14	2000	0.5
10^3	0.3	$1 \cdot 10^4$	3
10^4	0.7	$6 \cdot 10^4$	20
10^5	1.4	$3 \cdot 10^5$	90
10^6	3	$2 \cdot 10^6$	600
10^7	7	$1 \cdot 10^7$	4000
10^8	14	$9 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^4$

Nedslagsfrekvensen er den kumulative frekvens for objekter der har en energi der er større end den opgivne energi. Tabellen er efter [1].

Den estimerede nedslagsfrekvens af himmellegemer på Jorden er vist i tabel 1, som funktion af energien. Diameteren af objektet er beregnet ved at antage, at der er tale om et asteroidenedslag hvor massefylden af objektet er 2500 kg m^{-3} og nedslagshastigheden er 15 km s^{-1} . Af tabellen fremgår det, at nedslag med energier svarende til Hiroshima bomben ($\approx 10^{-2} \text{ Mt}$) rammer Jorden hvert år, men energien i disse relativt små objekter bliver udløst højt oppe i atmosfæren og forårsager ingen skade på jordoverfladen. Nedslag med en energi på 10 Mt, svarende til Tunguska begivenheden, kan forventes en gang for hvert hundrede år. Nedslagsenergier på 10^4 Mt , svarende til et objekt på 700 m i diameter, passerer inden for månebanen ca. en gang hvert tyvende år, og i ca. 1 ud af 3000 tilfælde rammer

den Jorden. Heldigvis er en "fuldtræffer" af så store objekter en sjældenhed, men tabellen illustrerer at "forbiere" af relativt store objekter kan komme faretruende nær ved Jorden – og at de gør det relativt ofte. En af de seneste "forbiere" fandt sted i 1937 da asteroiden Hermes, der er omkring en kilometer i diameter, susede forbi Jorden i en afstand af ca. 900 000 km, svarende til to gange afstanden til månen.

Et af de mest betydningsfulde nedslag fandt sted for ca. 65 millioner år siden, og denne begivenhed sættes i forbindelse med den samtidige masseuddøen af mange livsformer på Jorden i overgangen mellem Kridt og Tertiærtiden (K/T). Der er flere indicier der peger i retning af at et nedslag af en stor asteroide eller komet med en diameter på omkring 10 km slog ned på Jorden. Udfor Yucatan halvøen i den Mexikanske Golf er der fundet et stort krater, dybt begravet af sedimentet på havbunden, og tidsbestemmelser af sedimentet viser at krateret blev dannet ved K/T overgangen. Derudover er der forhøjede koncentrationer af irridium i de geologiske aflejringer ved K/T-grænsen og dette kunne skyldes en ekstraterrestrisk kilde. Disse irridium anomalier er fundet på så fjerne lokaliteter fra Yucatan halvøen som Italien og New Zealand samt på Stevns Klint her i Danmark. Muligheden er derfor tilstede for at et nedslag forårsagede den masseuddøen der afsluttede dinosaurenes dominans på Jorden.

Klimaændringer ved nedslag

Et stort nedslag vil umiddelbart generere en kraftig trykbølge i forbindelse med at objektet eksploderer i atmosfæren, som det skete i Tunguska, eller ved at det direkte rammer landjorden eller havet. Den direkte påvirkning på jordskorpen kan generere jordskælv og nedslaget i havet kan generere voldsomme tsunami. En tsunami er en meget lang bølge, der typisk forårsages ved forskydninger i havbunden som følge af undersøiske jordskælv. En tsunami har en "typisk" amplitude på op til 40 cm og den bevæger sig med flere hundrede meter i sekundet på det åbne hav, men når den når ind til kysten øges amplituden af bølgen væsentligt så den kan blive flere meter høj og forårsage alvorlige ødelæggelser i de omkringliggende områder. Den tsunami der fulgte K/T-nedslaget kan have været 50–100 meter høj, og det er uden sammenligning med hvad der observeres i dag som følge af seismiske forstyrrelser. Tilsammen vil trykbølgen, jordskælv og tsunami forårsage betydelige ødelæggelser efter et nedslag, men de vil formentlig ikke kunne medføre en global masseuddøen som den der ses ved K/T-grænsen.

Ved et nedslag kan ophvirvling af støv, vanddamp og dannelsen af sulfataerosoler i atmosfæren påvirke strålingsbalancen på Jorden og dermed forårsage langvarige klimaændringer. Lysdæmpningen fra det ophvirvlede materiale kan kvantificeres ved den optiske dybde τ , idet den del af fotonerne der bliver spredt

eller absorberet ved lysets passage ned gennem atmosfæren er givet ved $[1 - \exp(-\tau)]$. Vulkanudbruddet fra Pinatubo i 1991 medførte for eksempel en optisk dybde på 0.1 på grund af den øgede koncentration af sulfataerosoler i atmosfæren.

Aerosoler Store molekyler i atmosfæren der reflekterer lyset og dermed øger Jordens albedo.

Albedo Betegnelsen for den del af solindstrålingen der bliver reflekteret tilbage til det ydre rum. Jordens middelalbedo er for eksempel omkring 0.3, havet har et albedo på ca. 0.1 og sne og is har et albedo på 0.6–0.9.

Asteroide Legemer der typisk er sammensat af bjergarter, men nogle er af metal, som for eksempel nikkel eller jern. Næsten alle asteroider befinder sig i asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter. Nogle asteroider udgøres af resterne fra tidligere kometpassager. Den største asteroide kaldes Ceres, og den har en diameter på næsten 1000 km, men de fleste asteroider er mindre end 1 km i diameter.

Komet Legemer af is og bjergarter samt organisk materiale der formentlig stammer fra den yderste del af solsystemet der benævnes Oort skyen. Kometer kan være flere kilometer i diameter.

1 Mt TNT Energi der udløses ved sprængningen af 1 million ton TNT, og den bruges som ækvivalens til energien i et nedslag. $1 \text{ Mt TNT} = 4.2 \cdot 10^{15} \text{ J}$.

Beregninger af den strålingsmæssige påvirkning kan laves ved at benytte klimamodeller der beskriver den generelle cirkulation i atmosfæren og i havet. Modelberegninger af hvilke konsekvenser et nedslag med en energi på $6 \cdot 10^5 \text{ Mt}$ på den nordlige halvkugle i sommermånederne ville få, svarende til den energi der omtrent ville være i et nedslag af 2002NT7, viser at en støvsky med en optisk dybde på 3 umiddelbart ville få den globale middeltemperatur til at falde med 8°C i de første to uger efter nedslaget. Havtemperaturen vil ikke ændre sig særlig meget på grund af vandets store varmekapacitet, men til gengæld vil temperaturen over land falde med $10\text{--}20^\circ\text{C}$ i løbet af 20 dage. Områderne længst fra havet vil udsættes for den største afkøling, så f.eks. det centrale Afrika vil opleve temperaturer på 38°C under den normale middeltemperatur. Efter 30 dage ville støvskyen være tyndet ud og temperaturen ville vende tilbage til det normale niveau.

I tilfælde af et nedslag på størrelse med det der fandt sted ved K/T-grænsen, vil den optiske dybde p.g.a. af det store støvindhold i atmosfæren medføre at det praktisk talt vil blive fuldstændigt mørkt ved jordoverfladen i op til et år efter nedslaget. Det vil betyde at fotosyntesen ville gå i stå og det ville være vanskeligt for dyr, der orienterer sig ved synet, at finde føde.

Støvkonzentrationen vil dog hurtigt falde i den nedre del af atmosfæren, men beregninger af koncentrationen af sulfat-aerosoler i stratosfæren viser, at den vil kunne dæmpe lyset i op til 10 år efter nedslaget. Ved så langvarige ændringer i solindstrålingen vil havet blive kølet væsentligt ned og det vil medføre langvarige klimaforandringer. Det store temperaturfald ved landjorden vil i sidste ende blive reguleret af havets overfladetemperatur, da det vil virke som et termisk reservoir der kan tilføre energi til de kolde landområder.

Nedfrysning af verdenshavet

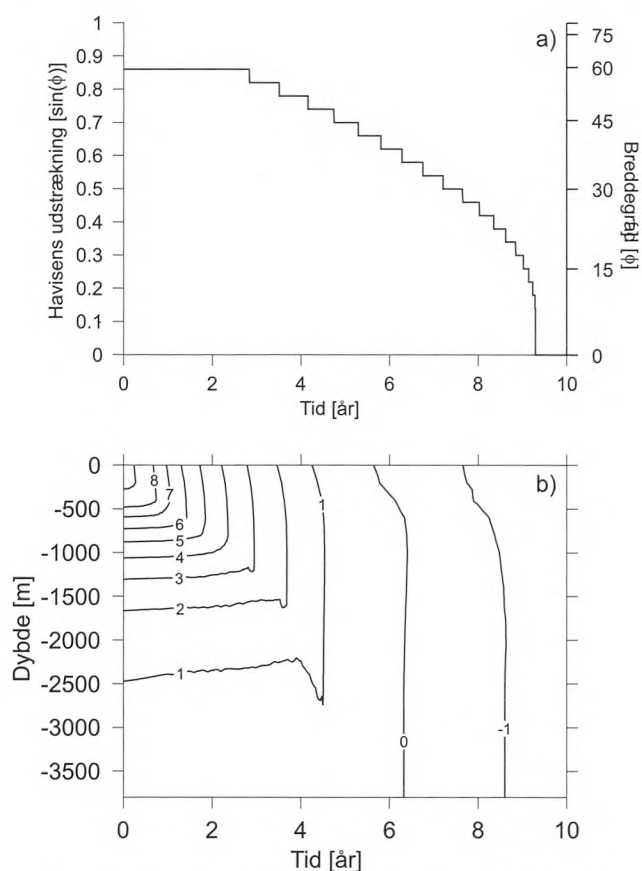
Varmekapaciteten i en luftsøjle fra overfladen til det ydre rum svarer til varmekapaciteten i ca. 2 m af vandsøjlen, og denne forskel betyder at havet med en middeldybde på 3.8 km får en afgørende betydning for de langvarige klimatiske ændringer der vil følge et stort nedslag. En overslagsberegning af hvor lang tid det tager at køle verdenshavet ned til frysepunktet, kan estimeres ved at betragte en vandsøjle der er $D = 3800$ m dyb og som har en middeltemperatur på $\theta_m = 3.5^\circ\text{C}$, svarende til middeltemperaturen i verdenshavet. Ved at antage at afkølingen ved overfladen foregår som Stefan-Boltzmann sortlegeme-stråling, kan afkølingstiden t beregnes ved at balancere energifluxen ved overfladen med energien i vandsøjlen:

$$\sigma T^4 t = \int_{-D}^0 \rho_w c_w \Delta\theta dz \quad (1)$$

hvor Stefan Boltzmann's konstant er $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, ρ_w er massefylden for havvand der typisk ligger på omkring 1028 kg m^{-3} og c_w er varmekapaciteten for havvand der er ca. $4000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Temperaturforskellen $\Delta\theta$ er forskellen mellem havets middeltemperatur og frysepunktet for havvand, der er omkring -2°C , og T er overfladetemperaturen af vandsøjlen der kan antages at være 273 K . Disse værdier giver en afkølingstid på omkring 9 år.

Ovenstående idealiserede tankeeksperiment er blevet udført med en simpel koblet klimamodel der beskriver de meridionale transport (dvs. i nord-syd retningen) af energi i havet og i atmosfæren samt udstrækningen af havis. Modellen simulerer de zonalt midlede overfladetemperaturer samt en realistisk vertikal fordeling af temperatur og salt i havet. Figur 1 viser udstrækningen af havis på den nordlige halvkugle i modellen samt den globale middeltemperatur af verdenshavet som funktion af dybden i 10 år efter at solindstrålingen er sat til nul – billedligt talt er solen blevet slukket i modeleksperimentet. Det medfører en kraftig afkøling af overfladelaget i havet og efterhånden som massefylden bliver større i overfladen end i den underliggende del af vandsøjlen, vil konvektion opblande hele vandsøjlen. Efter 9 år er havets temperatur på ca. -1.9°C og det vil være helt isdækket. Dette tidsinterval er i overensstemmelse med den enkle overslagsberegning ovenfor. I virkeligheden vil havet

aldrig kunne fryse helt til, på grund af den lille energiflue der kommer fra Jordens indre, men det er en anden historie.



Figur 1. Afkølingen af verdenshavet efter at solindstrålingen er hørt op. **a)** Udstrækningen af havis på den nordlige halvkugle viser hvordan den gradvist bevæger sig mod ækvator. Den trinvis udvikling afspejler den horisontale opløsning i modellen. **b)** Den globale middeltemperatur i verdenshavet viser den tilsvarende afkøling "efter solen er slukket". Figuren er efter [2].

Dette ekstreme scenarie giver dermed en tidsskala på omkring 10 år for afkølingen af verdenshavet med dens nuværende temperaturfordeling. Modelberegninger af den mulige ændring af strålingsniveauet på Jorden efter et K/T-nedslag viser at indstrålingen vender gradvist tilbage i løbet af en op til tiårig periode, og dermed nærmer ændringen i indstrålingen sig den kritiske tidsskala. Dertil kommer at havis kan forstærke afkølingen af Jorden yderligere ved den såkaldte is-albedo tilbagekobling. Denne indebærer at en afkøling af Jorden medfører en større udbredelse af havis, og på grund af isens store albedo (= større refleksion) vil temperaturen falde yderligere og dermed vil isen brede sig endnu mere. Faktisk er en totalt isdækket Jord en mulig tilstand for Jordens klima, da den indkommende absorberede solindstråling vil være meget lille p.g.a. isens store albedo og indstrålingen kan derved balanceres af en meget lav overfladetemperatur på is-overfladen på omkring -60°C – en såkaldt "snebold Jord".

Nedslag og livets udvikling på Jorden

En interessant egenskab ved havets "termiske inert" mod pludselige ændringer i Jordens strålingsbalance, er betydningen af havets dybde som det også fremgår af ligning 1. Hvis Jorden var dækket af et lavvandet verdenshav ville den ustandseligt have været udsat for at blive helt isdækket ved selv mindre meteornedslag. Derfor har den store havdybde og det relativt varme vand været en forsikring mod pludselige store klimatiske skift igennem Jordens historie. Det kan dog have været gået galt nogle gange for 1–0.55 milliarder år siden i den Neoproterozoiske æra, hvor glaciale aflejringer fundet i det område der dengang var troperne, indikerer at jorden var helt eller næsten helt isdækket. Hvorvidt et nedslag forvoldte disse kolde forhold er dog ikke klarlagt.

Nedslaget ved K/T-grænsen for 65 millioner år siden medførte ikke nogen betydelig langtidsændring af havisens udbredelse, og dette skyldes formentligt at havet var væsentligt varmere i den periode p.g.a. at koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren var 2–4 gange højere end det nuværende niveau. Til gengæld rensede nedslaget grundigt ud i økosystemet på Jorden

og gav plads til nye former for liv, blandt andet pattedyrene – og det har vi jo lov at glæde os over.

Referencer:

- [1] O. W. Toon, R. P. Turco og C. Covey (1997) "Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets", *Reviews of Geophysics*, bind 35, side 41–78.
- [2] J. Bendtsen og C. Bjerrum (2002) "Vulnerability of climate on Earth to sudden changes in insolation, *Geophysical Research Letters*, bind 15, side 29.



Jørgen Bendtsen arbejder som forsker ved Danmarks Miljøundersøgelser i Roskilde.

Betlehems stjärna var Jupiter¹

Lennart Samuelsson, Linköpings Universitet, och Åke Hjelm, Östgöta Correspondenten.

När Jesus hade fötts i Betlehem i Judeen på kung Herodes tid kom några österländska stjärntydare till Jerusalem och frågade: "Var finns judarnas nyfödde kung? Vi har sett hans stjärna gå upp och kommer för att hylla honom." (Matt. 2:1–2)

Vad var det för stjärna som styrde De tre vise männen till Betlehem? Det senaste svaret är att det inte var någon stjärna alls i modern mening. I stället var det planeten Jupiter. Alltså inget spektakulärt himlafenomen som en supernova eller en komet, bara gamla Jupiter, om än i en ovanlig konstellation.

Det är den amerikanske astronomen Michael R. Molnar som ligger bakom den nya teorin. I sin bok "The Star of Bethlehem – the Legacy of the Magi" (Betlehemsstjärnan – arvet efter de tre vise männen) berättar han historien om hur han kom förklaringen på spåren. En historia där ett romerskt mynt från Antiokia spelar en framträdande roll.

"Stjärnan" framträdde på morgonhimlen den 17 april år 6 f Kr. Den var inte särskilt iögonenfallande för allmänheten i Judeen, men för de stjärnkunniga astrologerna var den ett tydligt tecken på en kungafödsel

hos judarna.

Magi, vise män, hade en stark ställning i den tidens kulturländer i Främre Orienten. De var astrologer och läkare; vetenskapsmän mer än trollkarlar. De kände i detalj förändringarna på himlavalvet och upprättade almanackor för solen, månen och de då kända planeterna ("vandrande stjärnorna"). De hade dock ingen aning om vad himlakropparna bestod av eller varför vissa rörde sig i förhållande till andra. Att stjärnhimlen flyttade sig från öster till väster varje natt såg man förstås, men att orsaken var jordens rotation visste de inte.

Därför var det naturligt att de anade en osynlig hand därbakom, en hand som också borde kunna styra skeenden på jorden. När nu Jupiter en morgon steg upp i öster strax före solen, i Vädurens stjärnbild, var det något alldeles extra.

Omedelbart innan hade Saturnus och månen gått upp. Jupiter hade i flera dagar varit för nära solen för att alls synas. Just i denna gryning hade den fjärrmat sig en aning från solen och blev synlig vid horisonten. En sådan "heliakisk" uppgång sågs som ett tecken på stor kraft, en kraft som förebådade födelsen av en odödlig och allsmäktig person. Att den skulle ske i Det Heliga

¹ Artiklen har været bragt første gang i Östgöta Correspondenten juleaftensdag 2001.