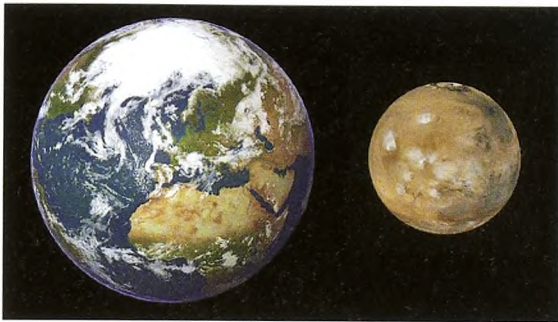


Vand og livsbetingelser på Mars

Af Christine S. Hvidberg, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Forekomst af flydende vand menes at være afgørende for at finde spor af liv udenfor Jorden. Mars er i dag kold og støvet, tilsyneladende uden spor af liv. Men der er spor af flydende vand og dramatiske klimaændringer gennem godt 4 mia. år i Mars' geologiske historie. Tilsyneladende var betingelserne for liv engang opfyldt på Mars' overflade.

Siden de første nærbilleder af Mars' overflade blev sendt tilbage til Jorden i 1965, har rummissioner afsløret en verden, der på mange måder ligner Jorden, men alligevel er helt afgørende forskellig. Mars har polare iskapper, en atmosfære med skyer, sne, vulkaner, årstider og døgnrytmer, der minder om Jorden. Men overfladen i dag er stenet og støvet, tilsyneladende uden spor af liv, globale støvstorme indhyller jævnligt planeten i støv, og om vinteren bliver det så koldt, at det sner med tøris (CO_2), se figur 1.



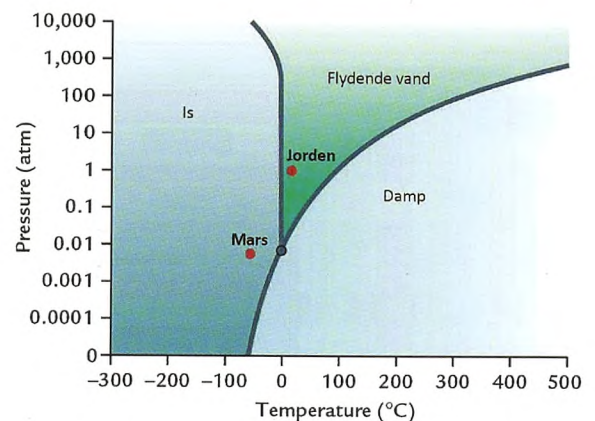
Figur 1. Jorden og Mars i korrekt størrelsesforhold (radius 6.371 km og 3.397 km, henholdsvis) [1]. To planeter, to verdener. Jorden har flydende vand og liv findes overalt. Mars er støvet og kold, men med spor efter flydende vand og dramatiske klimaændringer i planetens fortid.

Forekomst af flydende vand menes at være afgørende for at finde spor af liv udenfor Jorden, fordi liv på Jorden findes overalt, hvor der er flydende vand. Rummissioner til Mars har fundet udbredte spor i den geologiske historie efter flydende vand, der engang flød på Mars' overflade, og spor efter dramatiske klimaændringer gennem Mars' historie.

På Mars er året på 687 døgn, og døgnet er på 24,6 timer. Mars' rotationsakse hælder $25,5^\circ$ i forhold til baneplanet, næsten som på Jorden, hvor aksehældningen er $23,4^\circ$. Det betyder, at Mars i øjeblikket har årstider og døgnvariationer stort set som på Jorden. Atmosfæren består primært af CO_2 , og den er meget tynd med et gennemsnitligt overfladetryk på kun 6-8 mbar, dvs mindre end 1 % af overfladetrykket på Jorden. Drivhuseffekten er kun nogle få Kelvin, og der er derfor store variationer i overfladetemperaturen, som næsten udelukkende er bestemt af den lokale strålingsbalance. Om vinteren bliver det så koldt, at CO_2 udfældes af atmosfæren ved temperaturer ned til ca. 148 K (ca. -125°C) – det sner med tøris. Sæsonsneen kan blive flere meter tyk ved polen, og medfører op til

20 % årstidsvariation i overfladetrykket. Om sommeren fordamper CO_2 -sneen tilbage til atmosfæren igen, og temperaturen ved ækvator kan nå op på ca. 300 K (ca. 27°C) [2].

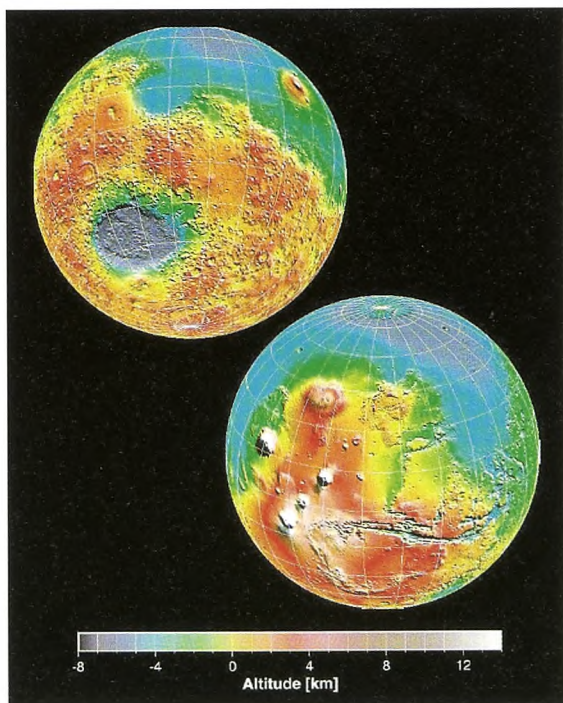
Udforskningen af Mars har fokuseret på at finde og kortlægge vand (H_2O) i alle faser på Mars. Det har vist sig, at der er masser af vand på Mars, men det findes i dag kun som is i de polare iskapper, som permafrost i undergrunden, og en lille smule som damp i atmosfæren [3]. De største kendte forekomster af is er de polare iskapper, der ligger ved polerne i både nord og syd. De er ca. 3 km tykke, og flere hundreder af km i diameter. De består mest af H_2O -is og har et volumen, der er omtrent som Grønlands Indlandsis. En anden vigtig forekomst af is er permafrost i undergrunden. Fra satellit har man kortlagt forekomst af hydrogen i den øverste meter under overfladen på Mars, og heraf konkluderet, at der er store mængder is i undergrunden. Permafrosten strækker sig fra polerne og kan detekteres helt ned til 50°N og S. Permafrosten er dækket af et støvlag, der er udtørret ved fordampning til atmosfæren.



Figur 2. Vands fasediagram [4]. De gennemsnitlige forhold ved overfladen på Jorden og Mars er vist med rødt. Den sorte cirkel angiver tripelpunktet for vand (273,16 K, 611,73 Pa). Det gennemsnitlige overfladetryk på Mars varierer omkring 6-800 Pa (på Jorden er det ca. 1 atm = 101 kPa).

Flydende vand er ikke stabilt på overfladen af Mars i dag på grund af det lave overfladetryk (figur 2), og flydende vand kan derfor kun forekomme kortvarigt på overfladen i de laveste beliggende områder. I dag er flydende vand kun stabilt dybt nede i undergrunden, hvor trykket er tilstrækkeligt højt. Hvis Mars nogensinde har haft flydende vand på overfladen, er det en

forudsætning, at atmosfæren var tykkere end i dag. En tykkere atmosfære ville både give højere tryk og formodentlig medføre øget drivhuseffekt, og dermed højere overfladetemperaturer.



Figur 3. Mars med højdekort [1]. Den øverste halvkugle er set lidt fra syd. Det store, dybe krater er Hellas Planitia kraterbassinet. Den nederste halvkugle er set lidt fra nord. Ved nordpolen kan man skimte den nordlige polare iskappe, og de tre store vulkaner danner sammen Tharsis, et vulkansk plateau. Olympus Mons ses længere mod vest, og er den største vulkan på Mars (og i Solsystemet). Den store kløft er Valles Marineris, der strækker sig over 4.000 km, og er op til 10 km dyb.

Mars' geologiske udvikling

Mars' overflade blev kortlagt med laser-altimeter i 1999 under Mars Global Surveyor-missionen (figur 3). Kortlægningen gav en helt ny viden om den geologiske historie, og blev en milepæl i udforskningen af Mars. Den geologiske datering af overfladen foregår dels ved optælling af krater-tætheder, og dels ved at geologiske strukturer sættes ind i en relativ kronologi for området. Jo ældre en overflade er, des større er krater-tætheden, og fra Månen har man en sammenhæng mellem krater-tætheder og alder kalibreret gennem datering af sten fra Månen. Den geologiske kortlægning afslørede udtørrede flodsystemer, søer, voldsomme vulkanudbrud med lavastrømme, og enorme flodbølger. Sidenhen er mineralogien i overfladen blevet kortlagt både fra satellit og fra Mars roverne, og der tegner sig et samlet billede af de dramatiske ændringer, Mars har gennemgået [3], [5].

Mars' geologiske historie inddeles i 3 perioder:

- *Noachian* (4,1-3,7 mia. år siden)
- *Hesperian* (3,7-3 mia. år siden)
- *Amazonian* (3 mia. år – i dag).

Fra den tidligste periode fra planetens dannelse ved 4,5 mia år og frem til 4,1 mia år er der ikke mange spor, men man ved, at Mars tidligt havde et magnetfelt, og at der blev dannet mange store nedslagskratere, herunder Hellas Planitia med en dybde på over 7 km og en diameter på 1.500 km, der markerer overgangen til den ældste periode, Noachian.

Noachian er karakteriseret ved mange kratere, høje erosionsrater, og det er i denne periode, man finder spor efter udbredte dal- og flodsystemer (figur 4). Vulkanisme var koncentreret omkring Tharsis, et vulkansk plateau med nogle af Solsystemets største vulkaner, der blev dannet i denne periode. Man finder lermaterialer overalt i denne periode. Lermaterialer dannes ved forvitring af klipper med flydende vand, som derfor jævnlige menes at have forekommet. Ved afslutningen på Noachian skete der en markant nedgang i erosions- og forvitringsprocesserne, bortset fra vulkanismen som fortsatte gennem Hesperian, hvor en tredjedel af overfladen efterhånden blev dækket af lavastrømme. Det er også i Hesperian, at man ser spor efter voldsomme flodbølger, der opstod episodisk, formodentlig ved udslip af vand og gasser i kølvandet på vulkanudbrud, og efterlod søer af stillestående vand, og sedimentære aflejringer af sulfatholdige mineraler (figur 4).



Figur 4. Venstre: Forgrenet dalsystem fra Mars. Forgrenede dalsystemer indikerer, at flydende vand har dannet flodsystemer og eroderet overfladen. Højre: Spor efter en flodbølge. Kraterne er 8-10 km i diameter [1].

I Amazonian skete der en yderligere nedgang i den geologiske aktivitet, og forekomst af flydende vand på overfladen blev reduceret til sjældne, mindre udløb af vand. Den vigtigste proces i denne periode er oxidering af de jernholdige mineraler på overfladen, som har givet Mars den kendte røde farve, den har i dag. De sidste 3 mia. år har været en periode karakteriseret af et koldt og tørt klima.

Tegn på flydende vand

Sporene efter flodsystemer og de udbredte forekomster af lermaterialer i Noachian indikerer, at perioden i det mindste engang imellem var varm og tillod flydende vand på overfladen. Det er i aflejringer fra denne periode, at man mener, der er bedst chance for at finde spor af fortidigt liv på Mars. På Jorden dannes forgrenede flodsystemer ved, at det regner i området, og at afløb af regnvandet foregår langs overfladen i større og større floder. De forgrenede flodsystemer på Mars adskiller sig imidlertid fra tilsvarende strukturer på Jorden ved, at

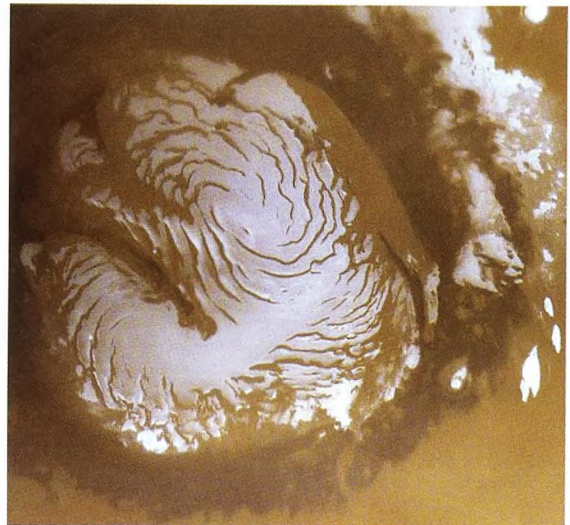
de mangler de fineste grene, altså de mindste bække i den øverste del af forgreningen, og ved at erosionen har været meget mindre end på Jorden. Det kan indikere, at andre processer end regn har dannet dem, og at overfladen ikke nødvendigvis har været varm hele tiden. Muligvis kan nedbøren have faldet som sne, der senere er smeltet, og afløb af smeltevandet har dannet flodsystemerne. Eller flodsystemerne kan være dannet ud fra underjordiske kilder med udspring af varmt, saltholdigt grundvand, som man kender eksempler på fra Jorden i det nordlige Canada. Det er muligt, at voldsomme vulkanudbrud eller sammenstød med kometer eller meteoriter har tilført varme og gasser, der midlertidigt har kunnet opretholde en tyk atmosfære og dermed højere tryk og varmere overfladetemperaturer end i dag.

Klimaskift som konsekvens af kæmpenedslag

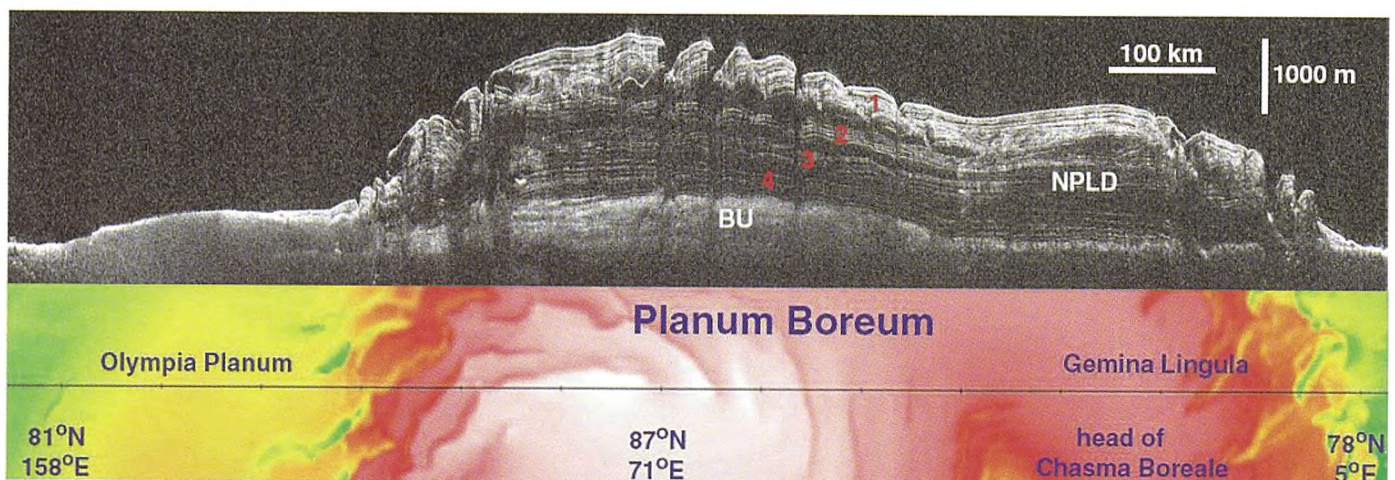
De mineralogiske og geomorfologiske indikationer af udbredt flydende vand i Noachian er overbevisende, men det er endnu ikke kendt, hvordan de varme forhold kunne opstå, eller hvorfor de så pludseligt ophørte med afslutningen af Noachian. I forhold til Jorden har Mars en mindre tyngdekraft til at holde på atmosfæren, og den mangler et magnetfelt, der beskytter atmosfæren. Måske mistede Mars sin atmosfære i denne periode, måske var atmosfæren blevet opretholdt gennem Noachian af vulkanisme og gasser, der blev frigivet i store mængder under opbygningen af Tharsis plateauet, og måske var hele den gunstige situation opstået som en eftervirkning af det kæmpe nedslag, der dannede Hellas krateret ved overgangen til Noachian. Tharsis ligger nemlig på den anden side af Mars lige modsat til Hellas krateret. Under alle omstændigheder markerer overgangen til Hesperian afslutningen på en periode med udbredte forekomster af flydende vand. Herefter frøs vandet til is, kun afbrudt af enkeltstående udbrud af flydende vand.

Den kolde Mars af i dag

Igennem de sidste tre mia. år har forholdene på Mars som nævnt været karakteriseret af et koldt, tørt og støvet klima. De mest markante processer i perioden involverer is og støv, og i de polare områder er der efterhånden opbygget kilometertykkede aflejringer af is og støv (figur 5). De polare iskapper, der hovedsageligt består af H_2O -is, har en lagdeling der strækker sig gennem iskappen over hundreder af kilometer [6]. Lagene dannes på grund af variationer i støvindholdet, og vidner om klimaændringer igennem tiden, på samme måde som Jordens klima kan aflæses af iskerner fra iskapperne på Jorden (figur 6).



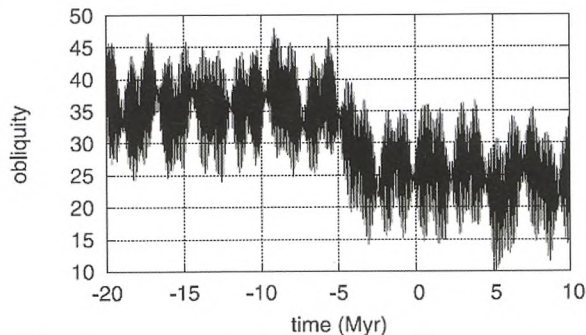
Figur 5. Den nordlige iskappe på Mars er ca. 3 km tyk og 900 km i diameter [1]. Billedet er taget om sommeren på den nordlige halvkugle, hvor CO_2 -sneen er fordampet, og den hvide H_2O -is er blotlagt på overfladen. Iskappen har en spiralformet struktur, der menes at opstå som følge af sublimation af is ved sydvendte skråninger og vekselvirkning med vindsystemer over iskappen.



Figur 6. Den nordlige iskappes indre struktur og lagdeling er opmålt med radar fra satellit [6]. Forskellige geologiske strukturer er markeret: den nordlige iskappe (NPLD), rester af en ældre iskappe og støvrige lag (BU), interne stratigrafiske strukturer i isen (1-4). Det nederste udsnit viser et højdekort af et udsnit af iskappen, og den sorte linie markerer satellitbanen.

Klimaskift og ændring af aksehældningen

På Mars ved man nu, at baneparametrene har varieret gennem tiden og givet anledning til store variationer i klimaet formodentlig gennem hele Mars' historie [7]. Aksehældningen er i dag tæt på Jordens, men beregninger har vist, at den har svinget mellem 15° og 35° med en periode på ca. 100.000 år igennem de sidste 5 millioner år. For 5 millioner siden skiftede svingningen fra et højere niveau, hvor den havde svinget mellem 25° og 45° (figur 7).



Figur 7. Beregning af variationen i aksehældning (obliquity) i grader fra 20 millioner år før nu til om 10 millioner år [7]. Aksehældningen varierer med en periode på ca. 100.000 år, og en periode på 2,4 millioner år. For 5 millioner år siden skete der et skift i niveau fra ca. 35° til de nuværende ca. 25° .

Klimamodeller har vist, at for aksehældninger højere end ca. 35° bliver det så varmt ved polen om sommeren, at H_2O -is ikke længere er stabilt på overfladen, men sublimerer op i atmosfæren [8]. Man mener derfor, at iskappen i nord først blev dannet for 5 millioner år siden, hvorefter aksehældning permanent har været under 35° , men man har endnu ikke kunnet påvise en entydig sammenhæng mellem solindstrålingen og iskappens lagdeling, der ville kunne bekræfte denne datering. Det er kun muligt at beregne variationerne i solindstråling sikkert tilbage til 20 millioner år før nu. Før 20 millioner år er beregningen ikke længere entydig, og man mener, at aksehældningen tidligere kan have svinget mellem 0° og 60° . Ved middelbreddegrader er der fundet isaflejringer og geologiske indikationer af gletscheraktiviteter, og det er muligt, at disse strukturer er dannet på et tidspunkt, hvor aksehældningen i en længere periode var meget høj, og isdannelse ved lave breddegrader var mest favorabel. Klimamodelberegninger har vist, hvordan isaflejringer kan flytte sig ved fordampningsprocesser som følge af ændringer i solindstråling, og de indikerer, at også de store forekomster af permafrost på høje breddegrader indgår i denne proces. Vi kan derfor ikke vide med sikkerhed om de permafrostholdige områder, der findes i Mars' undergrund i dag, har haft is igennem de sidste tre mia. år, eller om de måske har været udtørrede i perioder.

Liv på Mars?

Udforskningen af Mars viser, at der engang var flydende vand på planetens overfladen. De lerminerale og sedimentære klipper, som man har fundet på Mars,

er dannet ved processer med flydende vand for 3,5-4 milliarder år siden, og de viser at flydende vand engang må have eksisteret gennem tusinder, måske millioner af år på overfladen af Mars. En afgørende betingelse for liv er opfyldt, men det er endnu uafklaret, om der var liv i vandet på Mars. Indtil videre er det bedste spor efter liv på Mars meteoritten Allan Hills 84001 (ALH84001), som blev fundet på Antarktis af et hold amerikanske meteoritjægere i 1984. Den menes at stamme fra Mars, og er dateret til knap 4 milliarder år før nu, det vil sige i den periode, hvor Mars var varm og havde flydende vand. Man har fundet nogle strukturer i ALH84001, som muligvis er rester af fossile bakterier, men det er endnu uafklaret om strukturerne kunne være dannet ved ikke-biologiske, fysisk/kemiske processer, hvor der ikke indgik liv, eller om meteoritten kunne være forurenet af organisk materiale fra Jorden. Den næste mission til Mars er NASAs Mars Science Laboratory, som er en rover, der skal sendes afsted i slutningen af 2011. Formålet med denne mission er at analysere jordprøver og boreprøver fra sten for at afklare om Mars var, eller stadig er, beboelig for mikrobiologisk liv. Om livet engang fandtes på Mars, eller om det stadig eksisterer i Mars's undergrund, er åbne spørgsmål, der fortsat er målet for kommende missioner.

Litteratur

- [1] Billederne er fra NASA's Planetary Photojournal: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- [2] I. de Pater og J. J. Lissauer (2007). Planetary Sciences. Cambridge University Press.
- [3] M. H. Carr og J. W. Head III (2009). Geologic history of Mars. Earth and Planetary Science Letters, doi:10.1016/j.epsl.2009.06.042.
- [4] W. F. Ruddiman (2008). Earth's climate. Past and Future. W. H. Freeman and Company Publishers. Chapter 2 from 1st edition; <http://www.whfreeman.com/Catalog/static/whf/ruddiman/>
- [5] J.-P. Bibring og 7 andre, the OMEGA team (2006). Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. Science, 312, 400-404.
- [6] R. J. Phillips og 26 andre (2008). Mars North Polar Deposits: Stratigraphy, Age and Dynamical Response. Science, 320, doi:10.1126/science.1157546.
- [7] J. Laskar, A.C.M. Correia, M. Gastineau, F. Joutel, B. Levrard og P. Robutel (2004). Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities on Mars. Icarus, 170, 343-364.
- [8] B. Levrard, F. Forget, F. Montmessin og J. Laskar (2007). Recent formation and evolution of northern Martian polar layered deposits as inferred from a global climate model. Journal of Geophysical Research, 112, E06012, doi:10.1029/2006JE002772.



Christine S. Hvidberg er lektor ved Is og klima gruppen på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Hun arbejder med isflydning og massebalance af iskapper, især rettet mod studier af Grønlands Indlandsis, og med is og klima på Mars.