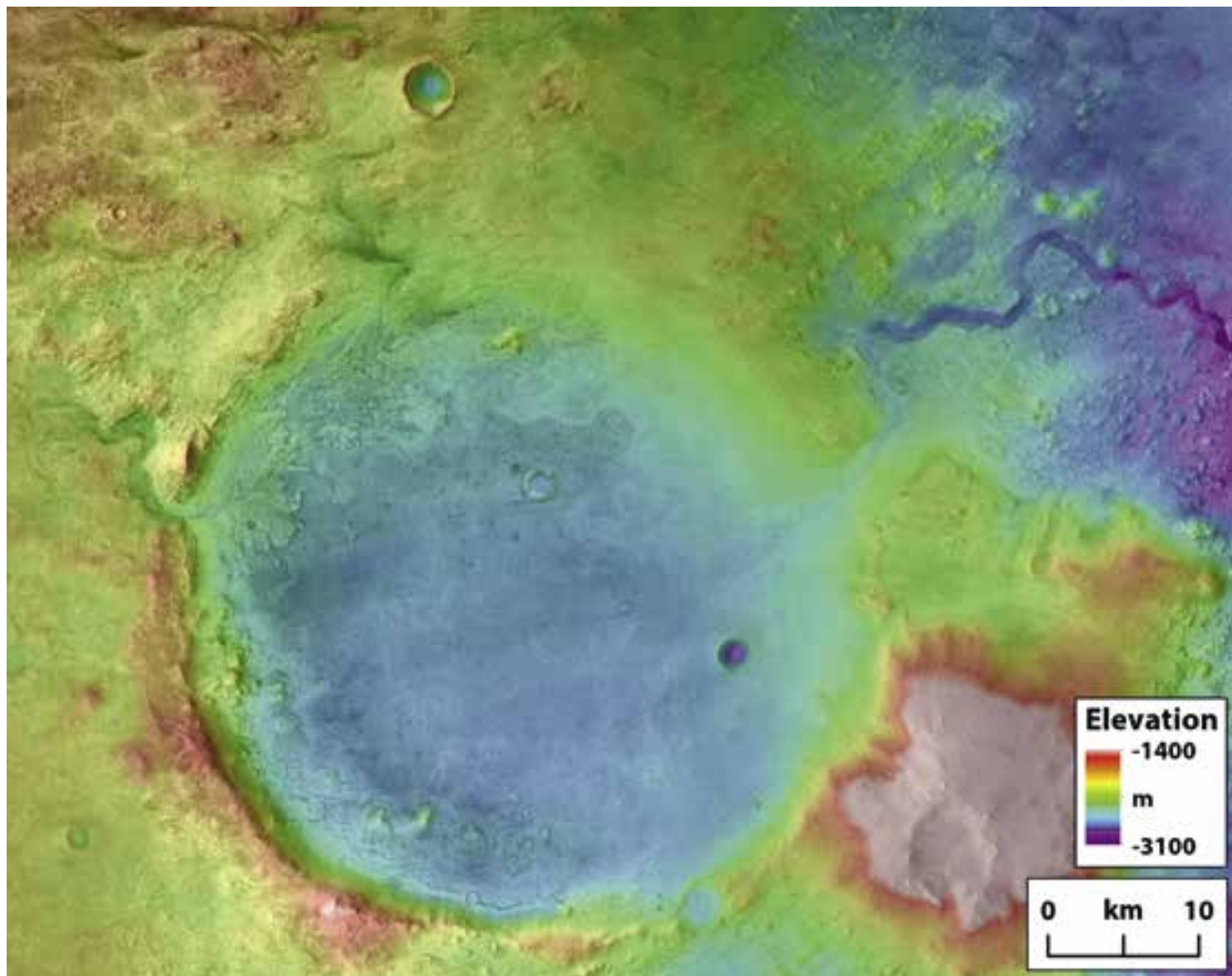

5

JAGTEN PÅ SPOR EFTER LIV PÅ MARS INTENSIVERES

Af
MORTEN BO MADSEN
LEKTOR, PH.D.
NIELS BOHR INSTITUTET,
KØBENHAVNS UNIVERSITET

MODTAGET STØTTE TIL
PROJEKTERNE *A FIELD TRIP*
250 MILLION KM FROM HOME
OG
RESEARCH INFRASTRUCTURE
IN SUPPORT OF DANISH
ACTIVITIES ON NASA'S MARS
2020 ROVER

Lige siden udforskningen af Mars ved hjælp af robotter for alvor blev sat i gang med NASAs Vikingmissioner i 1970'erne, har der blandt Marsforskere været et stort ønske om dedikerede missioner til to formål: at undersøge det indre af planeten, og at bringe udvalgte prøver tilbage fra Mars til grundige studier i laboratorier på Jorden. En almindelig accept af et eventuelt fund af spor af tidlig biologisk aktivitet, altså liv, på Mars vil nok kræve en utvetydig verifikation i laboratorier på Jorden.



Mars-forskeres ønske om at returnere udvalgte prøver til Jorden i form af "Mars Sample Return" (MSR) kan måske undre nogen fordi vi allerede har en enestående samling af mere end hundrede prøver fra Mars. Prøver som "selv har fundet vej" til Jorden. Disse prøver findes i form af meteoritter; stykker af Mars' overflade som ved voldsomme kraterdannende nedslag har slynget klippestykker fra Mars ud i rummet. Måske overraskende nok vil så meget som cirka 25 procent af disse udslyngede klippestykker have ramt Jorden. Nogle af disse når at brænde op i atmosfæren, mens andre har nået helt ned til Jordens overflade, hvor de så kan findes i form af meteoritter. Disse små stykker af Mars' overflade er meget værdifulde fordi de fortæller en del af Mars' udviklingshistorie. Men, Mars er et sted med meget store variationer imellem forskellige lo-

kaliteter. Og vi ved desværre ikke præcis hvor på Mars disse meteoritter er dannet. Og blandt dem vi kender, savnes for eksempel sedimentære klipper, klipper med højt indhold af sulfater eller lermineraler eller andre af de typer af mineralsammensætninger som vi ved findes, og som ville kunne give os vigtig information om tidlige "beboelige" miljøer på Mars.¹ Det vil derfor være meget værdifuldt herudover at indsamle prøver hvorom man ved indsamlingen samtidig får information om den præcise kontekst som disse prøver er udtaget fra. Det aller mest tiltrækkende ved returnerede prøver fra Mars er at det - ligesom for Mars-meteoritterne - vil være muligt at analysere prøverne igen og igen efterhånden som nye analysemetoder udvikles, og nye videnskabelige spørgsmål opstår. Det vil også være muligt at studere prøverne med metoder som ingen endnu har tænkt på.

Billedet viser et højdekort der dækker Jezerokrateret på Mars. Jezerokrateret er en gammel kratersø, som er blevet udvalgt som landingssted for NASAs Mars 2020 Rover mission. I øverste højre hjørne ses en kløft, som er udskåret af vand, som er brudt gemmen kraterrenden mod østnord-øst. Jezerokrateret har to indløb med hver sin deltaaflejrings, et nordnord-vest og et vestnordvest. Den 18. februar 2021 vil NASAs rover lande øst for dette sidste delta, hvorfra den vil køre mod øst op gennem deltaet mod kraterrenden. Højdekortet, hvor bunden af krateret ligger lavere end udløbet viser at dybden af kratersøen må have været mindst 250 meter for mere end 3,6 milliarder år siden. NASA/JPL-Caltech



NASAs Mars 2020 Rover. Roveren har tre værktøjer i instrumenthovedet for enden af den mere end to meter lange robotarm; et Ramanspektrometer SHERLOC med et tilhørende mikroskopkamera WATSON og en røntgen-fluorescensgrundstofanalytator PIXL med et indbygget kontekstkamera bygget på DTU. Det tredje værktøj er en borekerneudtager som på illustrationen er ved at blive anbragt på en sedimentær klippe. Det er i den slags klippe man håber at finde organiske forbindelser – måske helt tilbage fra en tid, hvor livet kunne være opstået på Mars. Foto: NASA

Gammel, udtørret søbund fundet

Marsforskere fra Niels Bohr Institutet har tidligere været involveret i noget som af NASA oprindeligt var tænkt og planlagt som de første led i en Mars Sample Return-mission. Athena-projektet, som udmøntede sig i de meget succesfulde Mars Exploration Rovers, Spirit og Opportunity, var planlagt til opsendelse i hhv. 2003 og 2005 med det formål at indsamle prøver som i hver sin appelsin-store beholder skulle sendes i kredsløb om Mars og med en fælles NASA/CNES-ESA-mission afhentes fra kredsløb om Mars og returneres til Jorden i 2008! Disse planer blev dog opgivet da de blev vurderet til at være for risikable og for komplekse med den tilgængelige teknologi.

I august 2012 landede Curiosity i Gale-krateret på Mars.² Her var opgaven at undersøge sedimentære lag nederst i det 5 km høje bjerg, Mount Sharp, et bjerg af aflejringer midt i Gale-krateret, som var vurderet til at være mellem 3,5 og 3,8 milliarder år gammelt. I disse nederste, ældste lag havde man vha. spektrometre om bord på kredsløbssonder fundet sulfater, hematit og lermineraller – alle mineraler

som kan udfældes eller dannes i flydende vand. Da sedimentet i bunden af en 5 km tyk aflejringsmåtte være omtrent lige så gamle som krateret, så NASA her mulighed for at undersøge "habitabilitet" (beboelighed – dog kun for mikroorganismer) i et fortidigt miljø som var blevet tilgængeligt for detaljerede undersøgelser vha. en stor rover som Curiosity med de mange analytiske instrumenter om bord. Et område som fik navnet Yellowknife Bay, var det lavestliggende område der var let tilgængeligt for Curiosity, og med tilladelse fra NASA Headquarters kørtes Curiosity derfor til at begynde med mod øst mod Yellowknife Bay i stedet for at køre mod Mount Sharp i sydvest.

Boringer i Yellowknife Bay og analyser af borestøvet viste at området var en gammel udtørret søbund hvori der var blevet udfældet sulfater og dannet lermineraller. Den fundne sammensætning af mineraler viste at området i Yellowknife Bay repræsenterede et fortidigt miljø hvor atmosfæretrykket havde været så højt at der – i det mindste periodevis – har været flydende vand med en nær neutral pH



Samlet viser resultaterne at hvis der havde været mikroorganismer til stede dengang der var søer i Gale-krateret, ville disse fint have kunnet leve der



som ikke var hverken stærkt surt eller basisk. Desuden fandt man mineraler med en bred fordeling af tilstande mellem kemisk reducerede og oxyderede forbindelser sådan at f.eks. flere metaller findes i flere oxidationstrin samtidig. Der findes på Jorden mikroorganismer som kan udnytte disse forskelle i kemiske tilstande både til energiproduktion - og samtidig udnytte blandt andet carbon i CO₂ til produktion af organiske forbindelser (vækst). Hvis den slags såkaldte kemoautotrofe mikroorganismer havde været til stede dengang hvor Mars havde søer af flydende vand, ville de have kunnet trives og formere sig³. I en anden boring næved fandt Curiosity klorobenzen, et stof som man formoder er blevet dannet med vekselvirkning mellem organiske forbindelser og oxyderende perklorater, som findes i de fineste partikler og kosmisk stråling. Samlet viser resultaterne at hvis der havde været mikroorganismer til stede dengang der var søer i Gale-krateret, ville disse fint have kunnet leve der.

Siden undersøgelserne af Yellowknife Bay har Curiosity bevæget sig over sletten i bunden af Gale-

krateret, og her har man fundet adskillige rester af fortidige aflejringer i form af genkendelige dele af udløbsdeltaer i krateret. Desuden har bl.a. Jens Frydenvang, som er medlem af ChemCam-holdet på Curiosity, været primus motor i undersøgelser af nogle usædvanlige silica-forekomster.⁴ Curiosity har de seneste år arbejdet sig længere og længere op i aflejringerne i Mount Sharp, hvor Jens Frydenvang gennem støtte fra Carlsbergfondet for øjeblikket som den eneste i Danmark aktivt deltager i Curiosity-missionen og undersøgelserne af det fortidige miljø i Gale-krateret. Jens Frydenvang har været med til at vise at Gale-krateret har været hjemsted for et sø-miljø som har været "beboeligt" (habitable) gennem mange tusinde og måske op til adskillige millioner af år.⁵

Ny rover med borekerne-udtager på robotarm

Nu er en ny og mere realistisk planlagt MSR-mission imidlertid under forberedelse. Hovedformålet med NASAs Mars 2020 rover er at finde, indsamle og deponere udvalgte prøver som vil skulle hentes i en senere mission. Både for at udvikle den nødvendige teknologi til fremtidige missioner med en menneskelig besætning om bord, for at kunne foretage *in-situ* videnskabelige undersøgelser af indsamlede prøver og for senere at kunne udvælge, indsamle, forsegle og oplagre de indsamlede prøver har NASA udviklet en meget stor rover som har krævet udviklingen af et helt nyt landingssystem. Dette nye landingssystem blev for første gang afprøvet med Mars Science Laboratory, eller Curiosity, som blev dens mere mundrette navn.

NASAs Mars 2020 rover bygges på NASAs Jet Propulsion Laboratory med basis i den gennemtestede Curiosity-rover.⁶ 2020 roveren er udstyret med en borekerne-udtager monteret på en lang robotarm og et komplekst prøvehåndteringssystem hvor de udvalgte borekerner vil blive indført i små rørformede beholdere som kan forsegles og opbevares i roveren eller (som det nu er planen) efterlades i grupper på overfladen for senere afhentning. Der er store krav til præcisionen og sikkerheden i landingen af Mars 2020 roveren. Planen er denne gang at udnytte et intelligent system, "terrain relative navigation", som baseret på billeder optaget under landingen vil kunne tage beslutninger og finjustere den sidste del af landingsproceduren så man kan undgå for eksempel store klippestykker, skrånninger eller andre landskabslementer som vil kunne udgøre en fare for missionens sikkerhed.

For så vigtig en mission har der naturligvis været omfattende diskussion af mulige landingssteder inden det i efteråret 2018 blev endelig besluttet hvor denne rover skal lande. Blandt de kandidater som



For at kunne udvælge de mest interessante prøver til indsamling er det vigtigt at have effektive rekognosceringsværktøjer og analyseinstrumenter til rådighed. I den forbindelse spiller Danmark en særlig rolle idet danske forskere er involveret i udviklingen af tre af disse instrumenter



Billedet til venstre viser SuperCam kalibreringstarget under samling i et sterilt flowkammer i de rene rum ved National Institute for Aerospace Technology lige nord for Madrid, hvor integrationen af elementerne til disse kalibreringstargets finder sted. Alle kalibreringsreferencer er monteret – inklusive de 5 elementer øverst til venstre, en hvid, sort, rød, grøn og en cyan-farvet, som leveres fra Niels Bohr Institutet. Endnu mangler en geometrisk reference foroven, en titaniumreference i midten til højre og en plade med reservedelsnummeret og andre data på forkanten.

Billedet til højre viser kalibreringstargets til Mastcam-Z under vibrations-tests hos Force Technology i Hørsholm. Vibrationstesten skal verificere at instrumenterne vil kunne holde til de kraftige vibrationer de vil blive udsat for under opsendelsen. Når NASAs Mars 2020 Rover lander i februar 2021 vil hjulophænget frigives vha. sprængbolte umiddelbart inden roveren når overfladen. I den forbindelse er det blevet verificeret at instrumenterne kan tåle at blive udsat for et shock på 2000g.

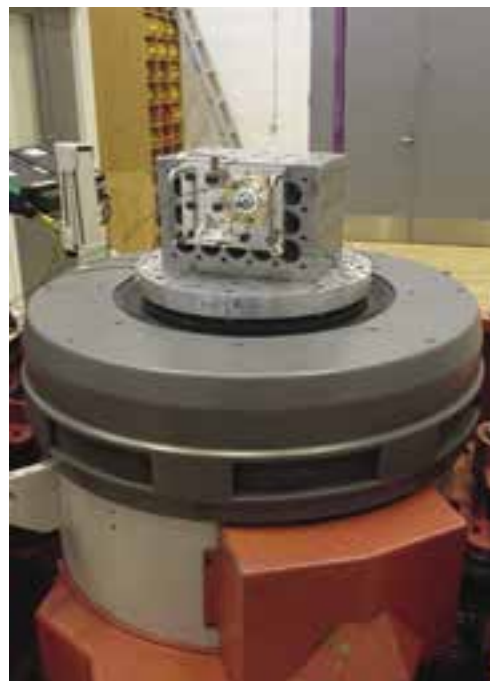
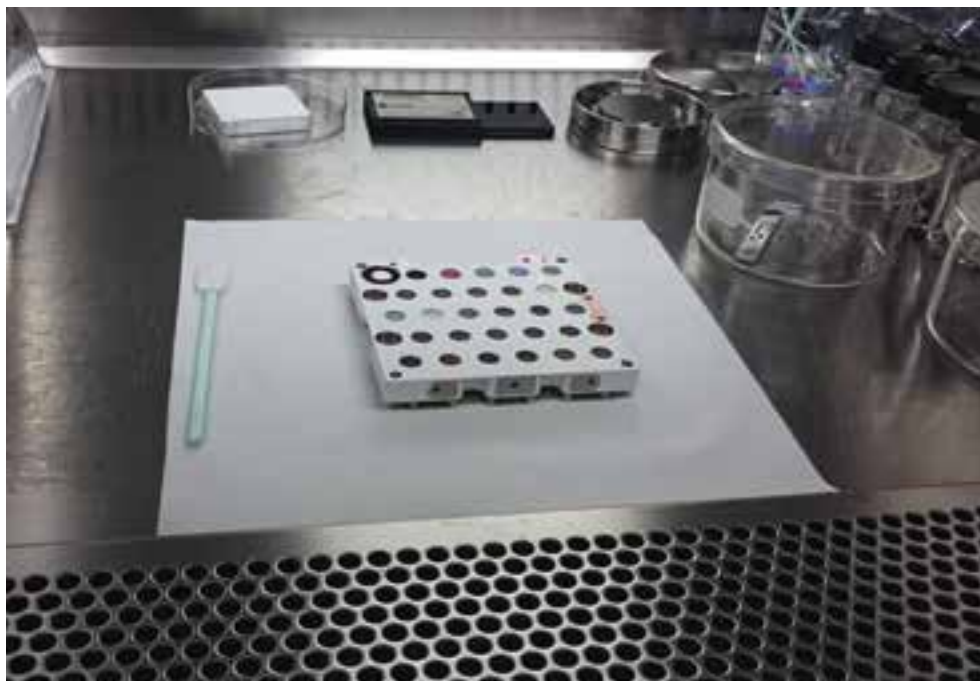
Foto: Morten Bo Madsen

formåede at forblive på listen til det sidste, var fire lokaliteter som hver især bød på særligt interessante mål: Columbia Hills i Gusev-krateret, hvor man har fundet materiale som kan være udfældet fra varme kilder, og som *måske* vil kunne sættes i forbindelse med fortidig biologisk aktivitet. En lokalitet i det nordøstlige Syrtis som rummer meget gamle landskabsformer med signaturer fra tidligere vulkansk aktivitet, hydrerede mineraler som kan have været hjemsted for eventuel fortidig biologisk aktivitet på Mars. Det tredje kandidatsted, Jezero-krateret rummer deltaaflejringer i hvad der engang var en åben kratersø. Et sted omtrent midtvejs mellem det nordøstlige Syrtis og Jezero findes det fjerde kandidatsted, som har fået navnet "Midway". Dette sted deler mange træk med lokaliteten i det nordøstlige Syrtis samtidig med at stedet vil være muligt at nå i løbet af en forlænget mission hvis man landede i Jezero-krateret. Allerede da der stadig var 8 mulige landingssteder tilbage på kandidatlisten præsenterede Mastcam-Z Co-Investigator Kjartan Kinch sammen med en af sine specialestuderende, Stephanie Shahrzad, et arbejde de havde udført med en ny datering af et basalt-lag i netop Jezero-krateret. Carlsbergfondet har støttet deres deltagelse i "landing site workshops", hvor de to har præsenteret deres resultater, som ser ud til at være den hidtil bedste datering af dette lag. Nu har NASA valgt Jezero-krateret som landingsstedet – og arbejdet med datering af basallaget har fået endnu større relevans idet Mars 2020 roveren forventes at

lande netop på det undersøgte basalt-lag. Vi forventer derfor at netop dette arbejde vil blive ofte anvendt af andre forskere.

Forberedelser til Mars-mission med mennesker

Ud over at indsamle prøver til senere returnering har missionen også et eksperiment om bord som er led i forberedelserne til ekspeditioner til Mars med mennesker. Det viser sig at et af de tungeste elementer i en sådan ekspedition er den mængde oxygen som skal oxydere medbragt brændstof til retur-raketten fra Mars' overflade. Når Mars 2020 roveren er landet, skal et eksperiment om bord, "Mars Oxygen In situ resource utilization Experiment", kort kaldt MOXIE, producere oxygen direkte fra Mars-atmosfærens CO₂ i en mængde på 10 g i timen. Den faststofelektrolysecelle hvori processen foregår, er yderst følsom for støv og specielt indholdet af svovl, hvorfor den ind sugede luft filtreres i et HE-PA-filter. Et af de vigtige formål med MOXIE er at lære hvordan eksperimentet vil kunne skaleres så det vil kunne producere den mængde oxygen som vil være nødvendig for at besætningen i en kommende ekspedition til Mars vil kunne returnere fra overfladen til kredsløb om Mars hvor de vil møde deres retur-raket. Vurderingen for øjeblikket er at en produktions hastighed på 3 kg i timen over en periode på 14 måneder vil være nødvendig hertil. Danske forskere deltager i arbejdet med forberedelserne af MOXIE-eksperimentet, og Carlsbergfondet har





støttet en række eksperimenter med MOXIE HEPA filtre i vindtunnelanlæggene ved Aarhus Universitet. Disse eksperimenter har givet gode resultater vedrørende dimensioneringen af sådanne filtre til en fremtidig mission med mennesker som skal bringes tilbage til Jorden.

For at kunne udvælge de mest interessante prøver til indsamling er det vigtigt at have effektive rekognosceringsværktøjer og analyseinstrumenter til rådighed. I den forbindelse spiller Danmark en særlig rolle idet danske forskere er involveret i udviklingen af tre af disse instrumenter. Afdelingen for måling og instrumentering ved DTU-Space har under ledelse af professor John Leif Jørgensen udviklet et kontekst-kamera og dertil hørende software til præcis positionskontrol af instrumentet PIXL. PIXL står for "Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry", og det er et instrument som ved hjælp af sin egen røntgenkilde kan lave røntgenfluorescens-analyse, grundstofanalyse med stor følsomhed og høj rumlig opløsning.

Med ekspertise fra Niels Bohr Institutet

SuperCam er Mars 2020 roverens "Schweitzerkniv" – et multimodalt spektrometer med en række analytiske teknikker som alle er vigtige for rekognoscering og udvælgelse af prøver til returnering. Laser-induceret nedbrydningspektroskopi (LIBS) er en metode til "berøringsfri" grundstofanalyse fra afstande op til syv meter ved hjælp af en meget kraftig laserpuls som danner et delvis plasma hvis lys gennem en række spektrometre danner basis for en detaljeret grundstofanalyse. Denne grundstofanalyse vil blive understøttet af Infrarød spektroskopi til identifikation af de mineraler som er dannet af de pågældende grundstoffer, og Raman-spektroskopi bl.a. til identifikation af organiske forbindelser. Herudover vil et fjernmikroskop (Remote Microscopic Imager, RMI) med farvefølsomhed levere billeder af omgivelserne (konteksten) for hver enkelt måling, og en mikrofon på masthovedet vil kunne optage lydene fra vekselvirkningen mellem laserpulsene og det materiale der skydes på. Mulig-

Billedet viser et tilbageblik på en klit mellem to klippefremspring. Det var nødvendigt for Curiosity at forcere denne klit for at komme igennem. Klitten er ca. 7 meter bred.
Foto: NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems

gjort af støtte fra Carlsbergfondet leverer Niels Bohr Institutet fem ud af 30 elementer som skal være referencer til kalibrering af data fra det infrarøde (IR) spektrometer og fjernmikroskopet. De resterende referencer er mineralreferencer for LIBS-instrumentet, hvor støvet vil blive fjernet når man skyder med laseren på referenceprøverne. Men specielt for de fem referencer til spektroskopi i det synlige og IR-området som ikke tåler beskydning, er det vigtigt at minimere mulig kontamination fra luftbåret støv. Netop på dette felt har forskere ved Niels Bohr Institutet særlig ekspertise som er opnået gennem deltagelse i alle NASAs landede missioner på Mars fra og med Mars Pathfinder i 1997 til og med NASAs Curiosity-mission, som landede i 2012.

Billeder optaget af Mastcam-Z, missionens vigtigste videnskabelige kamera, vil ofte være blandt de første videnskabelige data som returneres til Jorden hver dag. Og disse billeder vil være udgangspunktet for planlægning af mere detaljerede undersøgelser med roverens øvrige instrumenter. Mastcam-Z er et stereokamera med zoomlinser, og ud over at være i stand til at optage almindelige farvebilleder kan kameraet optage spektre af en hel scene i omgivelserne i det synlige og nær-infrarøde bølglængdeområde. Ud over at give visse oplysninger om den mineralogiske diversitet vil den slags multispektrale billeder være egnede til at detektere objekter som ikke har samme mineralsammensætning som noget der før er set. Dermed bliver Mastcam-Z et meget vigtigt redskab for rekognoscering. Marsatmosfæren indeholder imidlertid altid luftbåret støv, som forvrænger spektralfordelingen af det lys som når overfladen. Det betyder at overfladen får et rødtligt skær.

For at kunne udføre kvantitativ spektroskopi med Mastcam-Z medbringes derfor et kalibreringstarget – en referenceplade med et sæt af reflektivtetsreferencer – som alle spektroskopiske målinger på overfladen af Mars vil blive sammenlignet med. Ved inden for et kort tidsrum fra en måling på overfladen at udføre en tilhørende måling af det medbragte kalibreringstarget er det muligt at kalibrere de data som returneres fra Mars så man ud fra den fundamentale størrelse (radians) som måles af kameraets lysfølsomme CCD, kan finde den materialeegenskab (reflektans) som er karakteristisk for den overflade man analyserer i billedet. Dette kalibreringstarget er derfor et nødvendigt led i optagelsen af videnskabeligt kvantificerbare data vha. kameraet.

Det kalibreringstarget som NASAs Mars 2020 Rover vil anvende til kalibrering af data fra Mastcam-Z, er designet og fremstillet af forskere på Niels Bohr Institutet under ledelse af Kjartan Kinch. Li-

gesom de fem danskleverede elementer i SuperCams kalibreringstarget indeholder dette kalibreringstarget permanente magneter som medvirker til at holde områder på dette target så frit for luftbåret støv som det er muligt. En vis deponering af støv vil dog ikke kunne undgås, og til korrektioner herfor har Kjartan Kinch udviklet koder som vil indgå i de kalibreringsrutiner som vil blive brugt på de returnerede data.⁷

Analyser af hjembragte prøver planlagt til at starte i 2030'erne

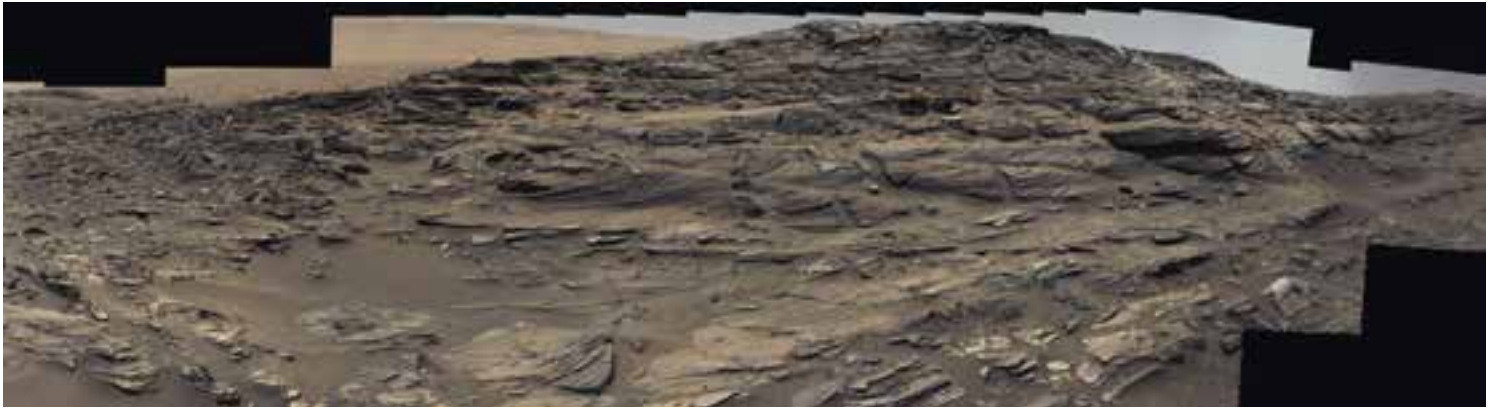
De tre instrumenter, Mastcam-Z, SuperCam og PIXL vil være blandt de vigtigste rekognoscerings- og analyseværktøjer i forbindelse med udvælgelse af prøver og en grundig karakterisering af den sammenhæng hvorfra prøverne udtages. Jezero-krateret var tidligt i Mars' udviklingshistorie en åben kratersø, ca. 250 meter dyb med yderst velbevarede deltaaflejringer. Det materiale som findes i disse aflejringer stammer fra et meget stort afvandingsområde som rummer stor geologisk diversitet. Blandt andet har dette resulteret i at der i disse deltaaflejringer findes finkornede lerminerale, typer af lerminerale som på Jorden har vist sig at kunne samle høje koncentrationer af organiske forbindelser og er gode til at bevare biosignaturer. Umiddelbart under disse deltaaflejringer og tillige i randen af Jezero-krateret findes karbonatforbindelser, som set i lyset af atmosfærens sammensætning med dominerende CO₂ er relativt sjældne på Mars. Også karbonater vil være velegnede til at bevare eventuelle biosignaturer, og disse burde kunne detekteres med instrumenterne om bord på 2020 roveren. Undersøgelserne i Jezero-krateret ved hjælp af Mars 2020 roveren forventes derfor at kunne give helt nye oplysninger om klimaet på Mars tidligt i planetens historie. Og ikke mindst svare på hvordan flydende vands historie i dag reflekteres i Jezero-krateret, som engang var en kratersø med tilløbende floder fra højlandet.

Herudover vil de returnerede prøver sætte forskere på Jorden i stand til at karakterisere risici fra støv, potentielt toksiske mineraler og måske endda potentielt farlige rester af fortidig biologi for fremtidige besøgende forskere på Mars. Prøverne vil for eksempel gøre det muligt at datere dannelsen af Jezero-krateret og måske nogle af de større kraterer på Mars – samt datere de basaltlag, som findes i Jezero-krateret. Det vil være muligt at klarlægge detaljer i de processer som har dannet det løse materiale på Mars (Mars-jorden), og yderligere vil man kunne undersøge sammensætningen af den tidlige atmosfære på Mars og derigennem vurdere omfanget af tabet af atmosfære gennem det meste af pla-



Billeder optaget af Mastcam-Z, missionens vigtigste videnskabelige kamera, vil ofte være blandt de første videnskabelige data som returneres til Jorden hver dag





netens historie. Endelig vil de returnerede prøver give oplysninger om præbiotisk kemi og om muligheden for bevarelsen af de kemiske rester af eventuelt fortidigt liv på Mars.

David Parker, direktør for "Human and Robotic Exploration Programmes" hos ESA og Thomas Zurbuchen, der er Associate Administrator for Science hos NASA, har i april 2018 underskrevet en hensigts-erklæring om et samarbejde om at bringe de indsamlede prøver retur til Jorden i 2029/2030. Det forventes at en bindende aftale mellem NASA og ESA om i fællesskab at udvikle en mission til at hente prøverne vil blive underskrevet i løbet af 2019. Gennem en aktiv deltagelse i NASAs Mars 2020 rover-mission og medvirken til udvælgelsen af prøverne – og med den ekspertise der findes i Danmark vedrørende Mars-meteoritter – vil danske forskere stå stærkt når disse udvalgte prøver til sin tid skal analyseres i laboratorier på Jorden.

Noter

1 Ehlmann, B. L., et al., 2016, *J. Geophys. Res. Planets*, 121, 1927-1961, The sustainability of habitability on terrestrial planets: Insights, questions, and needed measurements from Mars for understanding the evolution of Earth-like worlds, (doi:10.1002/2016JE005134). **2** Grotzinger, J. P., 2013, *Science* 341, 1475, Analysis of Surface Materials by the Curiosity Mars Rover. **3** Grotzinger, J.P., et al., 2014, *Science*, 343 (6169), 1242777, A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. **4** Frydenvang, J., et al., 2017, *Geophysical Research Letters*, 44, 4716-4724, Discovery of Diagenetic Silica Enrichment in Lacustrine and Eolian Sedimentary Rocks in Gale Crater, Mars. **5** Hurowitz, J.A., et al. 2017, *Science*, 356, 922-931, Redox Stratification of a Martian Lake in Gale Crater, Mars. **6** <https://mars.nasa.gov/mars2020/> **7** Kinch, K.M., et al., 2015, *Earth and Space Science*, 2 (29 pgs), Dust deposition on the decks of the Mars Exploration Rovers: 10 years of dust dynamics on the Panoramic Camera calibration targets (doi:10.1002/2014EA000-073).

Billedet øverst viser et område kaldet Stimson Formation. Det var bl.a. her Jens Frydenvang ledte et studium af nogle forekomster af silika, som var lidt usædvanlige. Disse er omtalt i teksten. Billedet nederst viser udsigten op mod Mount Sharp, hvor Curiosity nu er på vej op mellem de flade strukturer i forgrunden. Fotos: NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems.