

# At genskabe andre planeter i et laboratorium

*Jonathan P. Merrison, Jens Jacob Iversen og Keld Rømer Rasmussen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet*

Ved Institut for Fysik og Astronomi har vi opbygget et laboratorium med en planetsimulator, hvor vi kan genskabe de ekstreme fysiske og kemiske forhold, som findes andre steder i vores solsystem. Man kan blandt andet studere vulkanudbrud på Saturns ismåner, støvstorme på Mars, men også Jordens mest ekstreme miljøer – fra den mest ugæstfri ørken og til forhold højt oppe i stratosfæren. Udover ekstremt høje/lave temperaturer og lavt tryk kan der skabes vinde, der er i stand til at transportere is, støv- eller sandpartikler på en kontrolleret og ufarlig måde. Simulatoren er unik, og en tilsvarende facilitet findes ikke andre steder. I de seneste 13 år har en bred videnskabelig fagkreds anvendt den i en lang række projekter, bl.a. i forbindelse med de ambitiøse programmer til udforskningen af Mars og Månen med robotter og bemandede missioner.<sup>1</sup>

Planetforskningen ved Institut for Fysik og Astronomi (IFA) i Aarhus blev i 2007 udvidet med en avanceret planetsimulator, og formålet var dengang at etablere en europæisk testfacilitet til ESA's Marsudforskningsprogram [1]. Med finansiering fra ESA har den nu været udnyttet af 24 forskellige aerospace-industripartnere, lige fra de helt store som Airbus og til små nationale firmaer, og der er nu udført omfattende test- og udviklingsprojekter for bl.a. ESA's "Exomars Lander"-missioner samt adskillige af NASA's Marsmissioner, bl.a. Phoenix og Perserverence. Udover disse industriaktiviteter har simulatoren været anvendt i adskillige internationale forskningsprogrammer. Mere end 300 gæster fra 30 forskellige institutter har benyttet den og publiceret over 70 artikler herom.

Mange af disse aktiviteter har været støttet af en række EU-forskningsnetværker, som laboratoriet har deltaget i. Eksempelvis har Europlanetnetværket støttet planetprojekter i over 14 år [2]. Andre forskningsnetværker inkluderer et, som studerer vulkanisme på Jorden (VERTIGO), et meteorologinetwork (METEOMET) samt et om støv på Mars (ROADMAP). Selvom disse forskningsområder er vidt forskellige, åbner planetsimulatoren for unikke forskningsmuligheder for dem alle. At kunne kontrollere fysiske parametre som tryk, gassammensætning, temperatur, vind og koncentration af atmosfæriske partikler åbner nye muligheder for at studere ekstreme miljøer.

Planetsimulatoren består af et 10 m langt, isoleret vakuumkammer med et volumen på 35 m<sup>3</sup>. Heri er indbygget en recirkulerende vindtunnel. I kammeret kan der opvarmes til over 100°C, og med flydende kvælstof i specialbyggede kølelementer kan det afkøles til temperaturer på under -170°C [3]. Med en Marsatmosfære i kammeret skabes i vindtunnelen en cirkulerende vindstrømning med hastighed på op til 40 m/s. Dette gøres med 2 sæt 1,8 m store turbineblade, der roterer op til 1000 omgange/min. De fysiske/kemiske forhold i simulatoren måles med en række sensorer/målesystemer, der er specielt udviklet hertil. Det er fx lasersystemer til studier af atmosfæriske partikler, vind-/gashastigheds-sensorer og optisk-elektroniske systemer til studier af

støvdeponering og elektrisk opladning.

IFA har opbygget flere internationalt anerkendte forskningsfaciliteter, bl.a. Institute for Storage Ring Facilities og <sup>14</sup>C-Dateringslaboratoriet. Det har kun været muligt med teknisk avancerede værksteder med en stab, der er eksperter inden for især mekanik og elektronik. Det gør det muligt hele tiden at være på forkant med de nyeste teknikker og videreudvikle koncepter. Når det gælder internationalt samarbejde inden for rumforsknings- og aerospace-sektorerne, er det afgørende at have og bevare en ekspertstatus. Det har vi gjort ved konstant at fokusere på at udvikle og inddrage nye anvendelsesområder for simulatorfaciliteten. Således har vores institut været en attraktiv partner for forsknings- og udviklingsprojekter og herunder udføre unikke eksperimenter. Senest har vi med finansiering fra Europlanet 2024RI udvidet vores facilitet med et nyt pumpe-system, et nyt kølesystem og en 2 m sektion, der kan placeres flere steder i simulatoren afhængig af formålet. Herefter kan vi lave forsøg/simuleringer under forhold, som ligner ismåner eller Jordens egen måne.

I al forskning og teknologisk udvikling er test og kalibrering vitale elementer. Adgang til faciliteter, som kan genskabe relevante miljøer under kontrollerede laboratorieforhold, er derfor et vitalt element i al forskning i ekstreme miljøer på Mars, andre planeter og på Månen. Det er et basalt argument for vores fortsatte aktiviteter. Der er planlagt såvel robot- som bemandede missioner til Mars og Månen. Forud for disse vil der være stort behov for testfaciliteter. Specielt vil der være behov for endnu større og mere avancerede faciliteter, end der pt. findes. Et samarbejde herom er indledt med og finansieret af ESA.

Når konventionelle (terrestriske) modeller anvendes i forbindelse med undersøgelse af ekstreme miljøer, er det nødvendigt at basere dem på fundamentale fysiske parametre og derved gøre dem så lidt empiriske som mulig. Det kan gøre studier af planeter og observationer i laboratoriebaserede simulatorer til et vigtigt element til at udfordre og teste de nuværende modellers pålidelighed, at identificere væsentlige problemer og i nogle tilfælde endog observere helt nye fænomener.

<sup>1</sup>Laboratoriet er medlem af Europlanet 2024 RI, som har modtaget støtte fra EU's Horizon 2020 forsknings- og innovationsprogram under tilskudsafale nr. 871149. Laboratoriet er også medlem af ROADMAP-projektet, som har modtaget støtte fra EU's Horizon 2020-forskning og innovationsprogram under tilskudsafale nr. 101004052.



**Figur 1.** Forskellige billeder af Aarhus planetsimulatorfaciliteten, som er bygget i samarbejde med LM-Stål (Randers). Fra venstre mod højre ses: kammer under lukningsproces, måling med kryokøling med flydende kvælstof og laser Doppler-velocimeter- (LDV-) målinger samt LDV-stråler set indefra i simulatoren (som oplyser vindbårne støv-aerosoler).

I vores forsøg på at forstå Mars' atmosfære kan vi fx ende med at få en dybere og mere fundamental forståelse af Jordens atmosfære og klima. I denne artikel vil vi kortlægge den rum-teknologiske udvikling og forskning i planetologi, som vores facilitet har været og fortsat er involveret i, og endvidere diskutere fremtiden for disse aktiviteter.

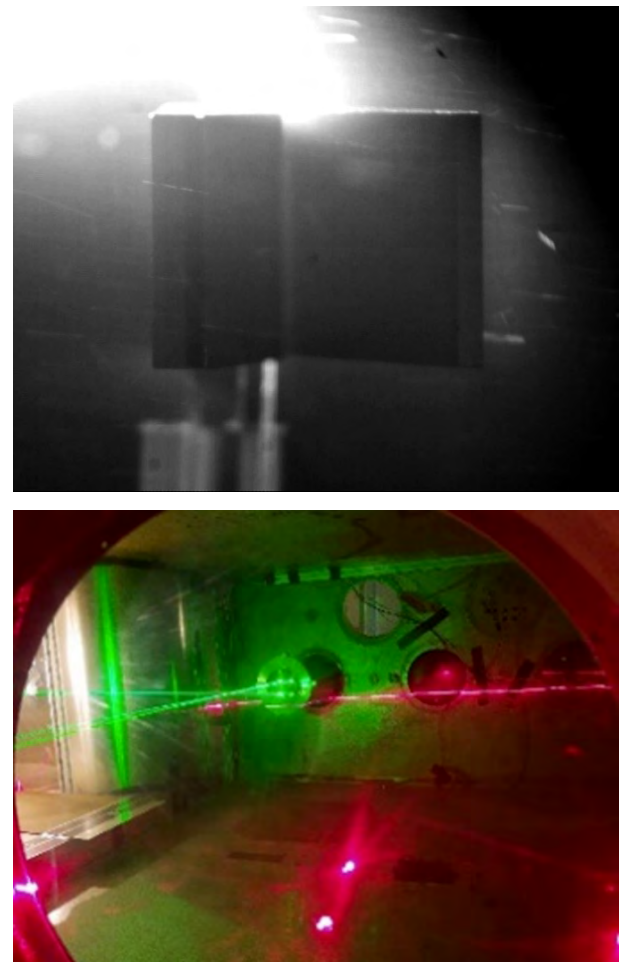
### Vulkanøer i solsystemet

Vulkanske udbrud kan udsende kolossale mængder materiale (tefra), der omfatter alt fra store, kompakte klumper til meget finkornet aske. Aske kan nå højt op i atmosfæren – i nogle tilfælde helt op i stratosfæren – og derved spredes over store dele af Jorden. Spredning af enorme mængder tefra er en af de værste naturkatastrofer, som kan ramme et område på Jorden eller sågar hele Jorden. Den kan ødelægge eller forvolde skade på helbred, infrastruktur og transport – især lufttransport. Efter et udbrud er tefra fortsat en stor miljøtrussel, idet partikler kan genmobiliseres (resuspenderes) af vinden. På Island transporterer og omlejrer vinden fx 30 millioner tons aske hvert år.

I vores simulator kan vi studere processer, der dels resuspenderer og dels transporterer finkornet aske højt i atmosfæren (over 50 km), hvor luftens densitet er lav. Vi kan foretage disse studier på en kontrolleret og ufarlig måde. I samarbejde med vulkanologer (fra bl.a. Geneve og Rom) kan vi dermed bidrage til viden om disse risici – et arbejde, der især er foregået efter udbruddet af Eyjafjallajökull på Island i 2010. EU støtter denne forskning/undervisning via netværket VERTIGO [4], og dette samarbejde fortsætter stadig [5].

### Is i Solsystemet

Vulkaner og vulkanisme er ikke begrænset til Jorden, fx er en eksotisk form for vulkansk aktivitet set på Saturns og Jupiters ismåner. Her bliver flydende vand fra oceaner dybt under overfladen sprøjtet direkte ud i vakuum, hvor de danner mere end 100 km høje jets, som består af mikrometersmå ispartikler. De er et aktivt forskningsområde for især astrobiologer, som søger efter miljøer, hvor liv kan eksistere. Isjets, som er observeret på Saturns måne Enceladus, har været reproduceret og studeret i vores simulator i samarbejde med SETI. De er komplekse at modellere og en stor udfordring at genskabe i laboratoriet – de kræver såvel ekspertise i cryogenese (dvs ekstrem lav temperatur), som i vakuumforhold og fluidodynamik.



**Figur 2.** Øverst: højhastighedsfotografi af en isjet inde i simulatoren. Vandis-partikler (ned til mikrometerskala) rammer med høj hastighed (over 100 m/s) en sensor (prototype) udviklet af SETI (en simulation af en mulig mission til Enceladus). Nederst: støvpartikler (aerosoler) suspenderet af vinden under Mars-forhold fotograferet inde i simulatoren. Partiklerne belyses med et rød-grønt 2D-lasersystem.

Forskellige ambitiøse missioner er planlagt/igangsat til disse ismåner – herunder den europæiske (ESA) JUICE-mission, som er på vej til Jupiter efter en vellykket opsendelse i april 2023.

Endnu mere eksotiske former for is findes i vores solsystem bl.a. isformer, som ikke findes på Jorden. Kolossale sæsonbetingede iskapper af CO<sub>2</sub>-is (tusind km brede og flere m tykke), dannes hvert efterår på Mars og sublimerer (fordamper) igen hvert forår. Omkring 1/3 af Mars' atmosfære bliver fanget i disse iskapper.

Vigtige opdagelser om disse isformer er sket i de sidste 10 år i samarbejde med universiteter i Bern og Colorado, JPL i Pasadena samt DLR i Berlin). Til forskning i planetsimulatoren har vi udviklet systemer til gaskontrol og nye sensorsystemer, der muliggør ny og avanceret forskning om CO<sub>2</sub>-is [6].

Forskellige former for is er udbredt i vores solsystem. Til fortolkning af observationer fra missioner og som input til cryomodeller har vi brug for detaljerede og grundige laboriestudier af isformer. Med de nyeste forbedringer af vores faciliteter kan vi bidrage til denne forskning bl.a. via et nydannet netværk af eksperter og laboratorier, som studerer planetar is. En særlig mulighed i vores simulator er at kunne studere vindens transport af ispartikler under fx lavt atmosfærisk tryk og på en relativt stor skala.

### Komparativ planetologi og Jordens klima

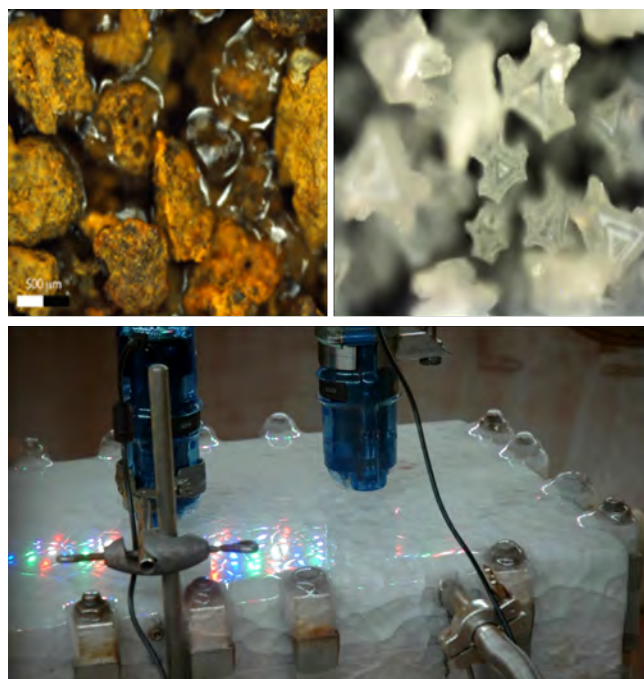
Komparativ planetologi er et fag, hvor vi kan lære mere om Jorden ved at studere andre planeter, deres måner samt kometer, asteroider osv. På andre planeter kan deres miljø være langt mere ekstremt end på Jorden, og de grundlæggende fysiske parametre kan variere udover det område, hvor konventionelle (terrestriske) modeller kan anvendes. Det gælder fx temperatur, tryk, viskositet, tyngdekraft m.fl. samt atmosfære- og overfladesammensætning. På den måde kan andre planeter (fx Mars, Titan og Venus) betragtes som "globale laboratorier".

I en laboratoriesimulator kan relevante ekstreme miljøer genskabes med mulighed for at teste konventionelle modeller ved systematisk at variere én (eller få) parametre, mens andre fastholdes. Herved kan i nogle tilfælde helt nye fænomener observeres – fx vinddrevet sandtransport, støvaerosoler, isdannelse og dynamik samt vulkanisme. Vores facilitet har – først og fremmest støttet af EU-netværk – været involveret i klimarelevant forskning inden for meteorologi, atmosfære- og overfladeprocesser.

I atmosfære- og klimaforskning er meteorologiske sensorer vigtige for global monitorering. Sådanne sensorer skal valideres og kalibreres – også under ekstreme betingelser. Her kan en atmosfærisk laboratoriesimulator være særdeles anvendelig for at studere og kalibrere tryk-, temperatur-, vindhastighed- og fugtighedsrespons. Vores facilitet har her været en del af det EU-støttede internationale netværk/program Meteomet [7].

Aerosoler er små suspendede partikler i atmosfæren, dvs. de bæres oppe af luftens turbulens. Deres størrelse varierer ca. fra 10 nm til flere µm. I Jordens atmosfære består de af vand/is, salt, jord/støv, mineraler, samt partikler fra industriel aktivitet, herunder sod fra udstødning og forbrænding. Aerosoler fra såvel naturlige kilder som industri deponeres både lokalt og globalt. Fra Afrika hvirvles fx hvert år en milliard tons mineralsk støv op i atmosfæren og højt i troposfæren [8]. Her transporteres de med den globale cirkulation rundt på hele Jorden. Fx lander ca. 200 millioner tons i Sydamerika. Effekten af disse aerosoler på Jordens klima er kompleks og kan både bidrage til opvarmning og afkøling. På alle planeter, der har en atmosfære, findes der aerosoler af forskellig art. Desværre er vores nuværende forståelse

af, hvordan mineralske aerosoler dannes, transporteres og deponeres ufuldstændig [9]. Ligeledes er vores modeller empiriske og i mange tilfælde baseret på meget begrænsede eksperimentelle data. Derfor er vi ikke i stand til at modellere aerosolprocesser på en effektiv måde.



**Figur 3.** Nederst: CO<sub>2</sub>-is under Marsforhold (i simulatoren) som er i en "gennemsigtig" fase. Øverst til venstre: "gennemsigtig" CO<sub>2</sub>-is deponeret på (og omsluttende) sandkorn under Marsforhold. Øverst til højre; CO<sub>2</sub>-is deponeret i krystalform under lavere temperatur (ikke gennemsigtig). Disse forsøg fortsættes i fremtiden [7].

Udover at transportere aerosoler er vinden også en aktiv støv-/aerosoldanner gennem erosion af Jordens overflade. Desertifikation finder især sted som en kombineret effekt af langvarig tørke og vindens erosion, der fjerner de fineste partikler og derved forarmer jorden. Dette finder sted på ca. 25% af Jordens overflade og påvirker ca. to milliarder mennesker. Hvert år "tabes" ca. 12 millioner hektar landbrugsland pga. desertifikation [10]. En naturvidenskabelig udfordring er at forstå, forudse og om muligt begrænse desertifikation. I vores facilitet kan vi kontrollere vind, atmosfæren og partikler (aerosoler), og det gør den egnet til at belyse samspillet mellem atmosfære, jordoverflade og partikler og herigennem bidrage til bedre forståelse af sand- og støvtransport. Også på dette felt kan studier af andre planeter have betydning. Fx er mængden af vand i atmosfæren ubetydelig på Mars, og her er hyppig vinddrevet transport af støv og sand en udmærket platform til studier af sådanne (ørken-)processer. Sammen med grupper fra Belgien, Spanien og Tyskland er vores facilitet en del af et EU-støttet forskningsprojekt, som hedder ROADMAP [11]. Formålet er at studere partikler i Mars' atmosfære gennem kombinerede laborieforsøg, satellitobservationer og global modellering. Det overordnede formål er (kvantitativt) at forstå sammenhængen mellem vindflux, sand-/støvpartikeltransport, abrasion og støvdannelse. Dermed kan der laves prognoser

for erosionsrater og emission af støvaerosoler. Dette er et aktivt forskningsområde med nye opdagelser i både laboratoriet, observationer fra Mars/Jorden og i modelleringer heraf både på mikro- (fluid dynamik) og global skala (globale cirkulationsmodeller). Det er på mikroskala, at de innovative teknologier og teknikker, som er udviklet i vores faciliteter, kan bidrage med den nyeste viden og belyse det komplekse samspil mellem fluidstrømning, partikelbevægelse samt partikel-partikelinteraktion [12,13].

### Bemandede missioner til Mars og Månen

Den største del af planetsimulator-faciliteten ved AU (AWTSII) blev i 2006 finansieret af ESA som del af udforskningen af Mars både med robotter og bemandede. Det var forventet, at vores simulator kunne muliggøre omfattende afprøvning og udvikling af instrumenter og udstyr, der kunne anvendes på overfladen af Mars, og siden 2009 har det været en kernefunktion. Herunder testes teknologier for at optimere deres pålidelighed og robusthed, og nye instrumenter kalibreres. Vores facilitet er den pt. mest avancerede Marssimulator, fordi den ikke alene kan genskabe de lave tryk og temperaturer (såkaldt termal-vakuumsystemer), men også vindstrømninger og transport af støv/sandpartikler. Faktisk er støveksplosioner en af de meste undersøgte (og farlige) miljøeffekter på Mars.

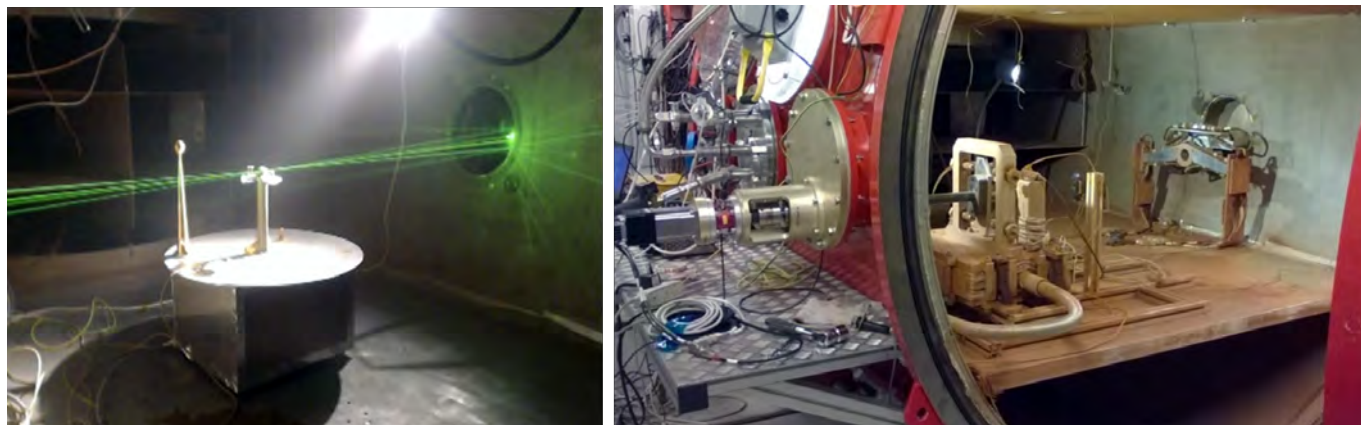
For industripartnere har vi udført over 30 forskellige testaktiviteter med forbindelse til de to ESA-missioner ExoMars2016, ExoMars2026 samt NASA-missioner som fx MER, Phoenix, Mars Curiosity- og Perseverance-roverne [fx 15]. NASA's og ESA's robotudforskning af Mars er fortsat en del af et omfattende internationalt samarbejde med det formål at foretage en bemandede mission til Mars (pt. forventes missionen udført efter 2040). Stort set alle rumrejsende nationer i verden tager del heri og samarbejder gennem en forening (ISECG 2022). Der er opstillet en fælles plan for at udvikle nødvendige teknologier og gennemføre missioner undervejs. Dette program involverer begge robotmissioner til og fra Mars (Mars sample return) og bemandede missioner til Månen. For ESA er denne

ambitiøse plan fastlagt under et program, som hedder "Terrae Novae" (eller E3P). Det består af et sæt missioner, som inkluderer robotmissioner til Mars, Månen og lav Jordorbit – alle desuden i samarbejde med NASA, CSA og JAXA. Vores laboratorie forventer (og håber på) at kunne bidrage væsentligt til "Terrae Novae"-programmet med test af Mars "Sample Return"-missionen og Månemissioner.

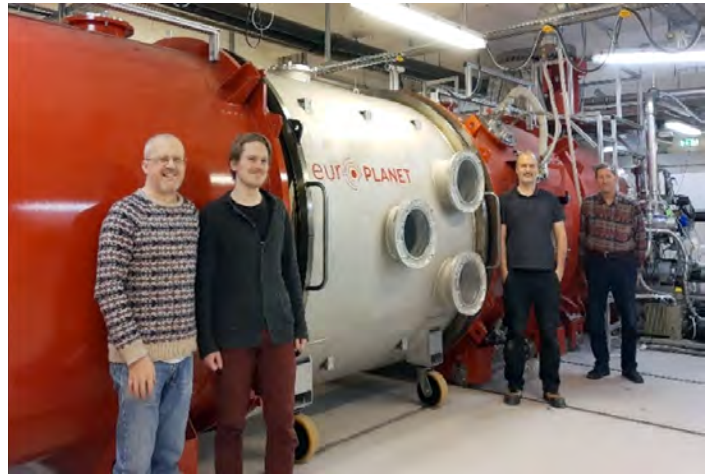


**Figur 4.** Vindribber dannet under Marsforhold i vores simulator (sammenlignelige med observationer fra NASA's Marsrover). Trods det lave tryk og den høje vindhastighed på Mars ligner de overraskende nok de ribber, der dannes på Jorden [14].

En væsentlig del af "Terrae Novae"-programmet er en omfattende bemandede udforskning af Månen, der involverer en rumstation og et habitat til langtidsophold på Månen. Med de nyeste vakuum- og cryoforbedringer af vores simulator forventer vi, at vi kan udføre simuleringer/tests under Måneforhold. Månen har endnu mere ekstreme fysiske forhold end fx Mars med temperaturer fra +127°C (i solen) til -173°C (skyggesiden). Selvom der ikke er en (mærkbar) atmosfære på Månen, kan (mineralske) støvpartikler godt mobiliseres og transporteres – fx ved meteornedslag og elektrostatisk levitation. Derudover kan menneske/robotskabte processer hæve og transportere støv.



**Figur 5.** Venstre: ExoMars 2016- (DREAMS-) sensorsystemet, til registrering af vind, temperatur, fugtighed, tryk og det elektriske felt [16]. Her vist mens det testes og kalibreres under Marsforhold med vindstrømning og støv, der gør laserstrålerne fra vores LDV synlige. Højre: Test af ExoMarsroveren (2026) med begge aksel- og hjullejesystemer. Denne test foretog firmaet MDA med det længste testprogram, som er udført i vores simulator. Det varede flere måneder og simulerede over 500.000 marsdøgn med lav temperatur, vind og støv.



**Figur 6.** De nyeste forbedringer, som i løbet af 2022 er implementeret i vores simulator. Venstre: det nye pumpesystem, som gør det muligt at simulere forhold på måner, der ikke har en atmosfære (inkl. Jordens måne). Højre: en ny 2 m sektion til vores simulator, hvormed det bl.a. er muligt at lave eksperimenter på ismåner (sektionen er finansieret af Europlanet).

## Litteratur

- [1] <https://phys.au.dk/en/forskning/forskningsomraader/planetology>.
- [2] <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri/>
- [3] C. Holstein-Rathlou m.fl. (2014) “An Environmental Wind Tunnel Facility for Testing Meteorological Sensor Systems”, *American Meteorological Society*, bind **31**, side 447.
- [4] <https://www.vertigo-itn.eu/>
- [5] P.A. Jarvis m.fl. (2020) “Aeolian Remobilisation of Volcanic Ash: Outcomes of a Workshop in the Argentinian Patagonia.” *Front. Earth Sci.*, 8:575184. doi: 10.3389/feart.2020.575184.
- [6] G. Portyankina m.fl. (2019) “Laboratory investigations of the physical state of CO<sub>2</sub> ice in a simulated Martian environment”, *Icarus*, bind **322**, side 210–220,
- [7] <https://www.meteomet.org/>.
- [8] O. Alizadeh Choobari, P. Zawar-Reza og A. Sturman (2014) “The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review”, *Atmospheric Research*, bind **138**, side 152–165.
- [9] J.P. Merrison (2012) “Sand Transport, Erosion and Granular Electrification”, *Aeolian Research*, bind **4**, side 1–16.
- [10] L. Ofori og R. Showstack (2010) “Desertification awareness decade”, *EOS Transactions AGU*, bind **91**, side 327.
- [11] <https://aeronomie.be/>.
- [12] A. Waza m.fl. (2023) “Aeolian dust resuspension on Mars studied using a recirculating environmental wind tunnel”, *Planetary and Space Science*, bind **227**, side 105638, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105638>.
- [13] K.R. Rasmussen, A. Valance og J. Merrison (2015) “Laboratory studies of aeolian sediment transport processes on planetary surfaces”, *Geomorphology*, bind **244**, side 74–94.
- [14] B. Andreotti m.fl. (2021) “A lower-than-expected saltation threshold at Martian pressure and below”, *PNAS*, bind **118**, side e2012386118, doi.org/10.1073/pnas.2012386118.
- [15] N. Murdoch m.fl. (2021) “Laser-Induced Breakdown Spectroscopy acoustic testing of the Mars 2020 Microphone”, *Planetary and Space Science*, bind **165**, side 260–271.
- [16] G. Colombatti m.fl. (2018) “MarsTEM sensor simulations in Martian dust environment”, *Measurement*, bind **122**, side 2453–458.



Jonathan P. Merrison er seniorforsker på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Han har været videnskabeligt ansvarlig for planetsimulatorlaboratoriet siden år 2000.



Jens Jacob Iversen er finmekaniker på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet og tekniker ved planetsimulatorlaboratoriet.



Keld Rømer Rasmussen er lektor emeritus på Institut for Geoscience, Aarhus Universitet. Han har arbejdet med vand- og luftstrømninger især i flyvesand, og har deltaget i opbygning/udvikling af planetsimulatorlaboratoriet.