

RAZISKAVE POTRESOV NA MARSU – MISIJA INSIGHT

INVESTIGATIONS OF EARTHQUAKES ON MARS – INSIGHT MISSION

Andrej Gosar

dr., Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

Povzetek

Raziskovanje potresov na Marsu bo skupaj z drugimi geofizikalnimi meritvami prispevalo k poznavanju njegove notranje sestave, ki je pomembna za razumevanje zgodnjega razvoja terestričnih planetov v notranjem delu osončja. V misiji InSight je Nasa leta 2018 na površje Marsa namestila dva seizmometra, sondo za meritve toplotnega toka, magnetometer, meteorološke instrumente in opremo za radijske meritve za določitev precesije in nutacije rotacijske osi. Interdisciplinarne meritve omogočajo bistveno boljšo oceno debeline in lastnosti Marsove skorje, plašča in jedra. V prvih desetih mesecih so zaznali 174 potresov, največji je imel magnitudo 4,0. Posneti seizmogrami presenetljivo kažejo na dve različni vrsti potresov. Ugotovljeno je bilo, da je Marsova skorja bolj podobna Lunini z značilnim visokim sipanjem in majhnim dušenjem potresnih valov, plašč pa je bolj podoben Zemljinemu z nizkim sipanjem in visokim dušenjem.

Abstract

Investigations of the seismicity of Mars, together with other geophysical measurements, contribute to the knowledge of its internal structure. This is important for better understanding of the early evolution of terrestrial planets in the inner Solar System. The NASA InSight mission of 2018 brought to the surface of Mars two seismometers, a heat-flow probe, a magnetometer, meteorological instruments, and radio equipment for the determination of precession and nutation of the rotation axis. Interdisciplinary measurements enabled much better estimations of the thickness and properties of Mars' crust, mantle and core. In the first ten months of observations 174 marsquakes were detected, with the largest having a magnitude of 4.0. Surprisingly, two different types of seismograms were recorded; they imply a Moon-like crust with high scattering and low attenuation of seismic waves, and an Earth-like mantle with low scattering and high attenuation.

Uvod

Seizmološke raziskave na drugih planetih ali Luni nam lahko povedo največ o njihovi notranji sestavi in s tem o zgodnjemu razvoju terestričnih planetov v notranjem delu Osončja. Po uspešnih raziskavah na Luni pred petdesetimi leti sta tudi sondi Viking že leta 1976 na Mars ponesli vsaka svoj seizmometer (Nakamura, 2020). Glede seizmologije misija ni bila uspešna, saj zaradi okvare enega seizmometra in prevelikih motenj zaradi vetra na drugem niso zaznali nobenega potresa, razen domnevno enega. Sonda InSight, ki je z dvema seizmometroma in drugimi instrumenti pristala na Marsu novembra 2018, ima za glavno nalogo prav raziskovanje notranjosti rdečega planeta. V času nastajanja članka (april 2021) Nasina misija še poteka, začetna opazovanja pa kažejo, da je Mars potresno dejaven planet in da je z analizo seizmogramov mogoče precej izvedeti o njegovi notranjosti.

Zakaj raziskovati potrese na Marsu

Na Zemlji proučujemo potrese predvsem zato, ker predstavljajo eno hujših naravnih nesreč, ki nas lahko doleti. Na Marsu so razlogi seveda povsem drugačni, seizmološke raziskave namreč lahko povedo največ o notranji sestavi planeta. Ta je zanimiva ne le za razumevanje Marsa, ampak tudi nastanka in zgodnjega razvoja vseh kamnitih planetov v notranjem delu osončja (Merkur, Venera, Zemlja, Mars) in tudi Zemljine Lune. Kamnitim notranjim planetom je skupno, da so nastali z akrecijo – zgostitvijo plinov, prahu, planetezimalov in meteoritov pred okoli 4,5 milijarde let. Ko so se planeti večali, se je njihova notranjost segrevala, kar je povzročilo diferenciacijo v jedro, plašč in skorjo, kar je značilnost vseh terestričnih planetov. Zaradi diferenciacije je jedro postalo bogato z železom, plašč je pretežno silikaten, v trdni skorji pa so pogosti lažji elementi. Čeprav notranjo zgradbo Zemlje dobro poznamo zaradi podrobnih seizmoloških opazovanj in številnih potresov, Zemlja zaradi tektonike litosferskih plošč in vulkanizma, kar je povezano s konvekcijskimi tokovi v plašču, ne omogoča študija zgodnjega razvoja kamnitega planeta.

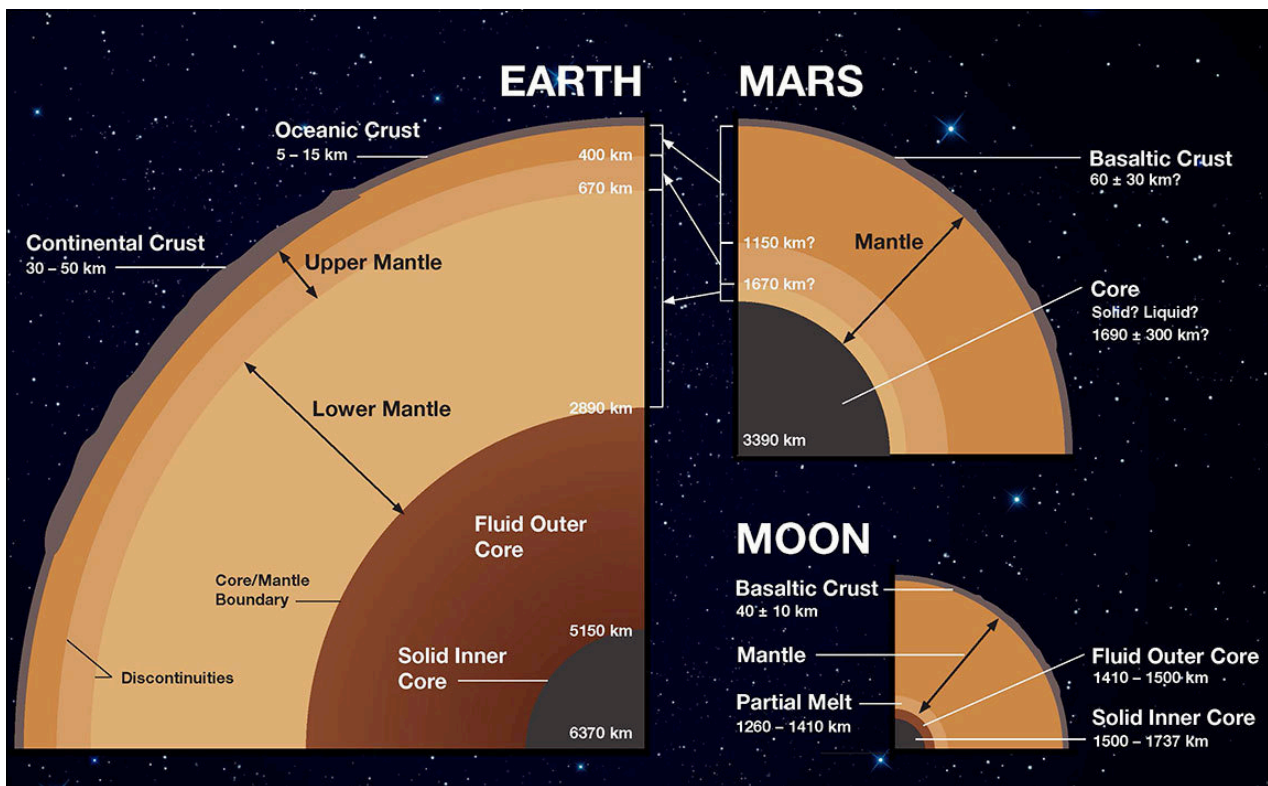
Predvideva se, da je Mars precej primernejši, saj je dovolj velik, da je prestopal vse faze akrecije in notranjega segrevanja, obenem pa dovolj majhen, da se je ohranila večina znakov teh procesov. Poleg tega na Marsu ni tektonike plošč in izrazitejšega recentnega vulkanizma, ki bi lahko zakrila te znake. Sedanje poznavanje notranje zgradbe Marsa (slika 1) je precej slabo in temelji na proučevanju njegove težnosti ter precesije in nutacije rotacijske osi iz radijskih Dopplerjevih meritev z misijama Viking in Mars Pathfinder (Nakamura, 2020).

Sedanje ocene debeline skorje skorje Marsa so od 30 km do več kot 100 km (slika 1). Njena debelina je zelo pomembna za razumevanje razvoja plašča in je neposredno povezana s stopnjo ohlajanja in načinom konvekcije v plašču v zgodnjem obdobju. Gravimetrija in topografija Marsa sicer omogočata dobro oceno relativnih sprememb debeline skorje, je pa nujna vsaj ena točka, na kateri bi se ta umerila z absolutno vrednostjo, kar lahko dajo le seizmološka opazovanja. Marsov plašč lahko ohranja plastovitost iz zgodnjega razvoja, ki je pomembna za razumevanje evolucije, na Zemlji pa je bila zaradi konvekcijskih tokov uničena. Ocene velikosti Marsovega jedra so negotove za vsaj $\pm 15\%$, kar je več kot ± 300 km, poleg tega pa ne vemo, ali je v celoti tekoče ali pa ima trdno notranje jedro, tako kot Zemlja. Velikost jedra je pomembna za razumevanje, ali so se v plašču razvili trajnejši stebri dvigovanja vroče

snovi (angl. *plumes*), s katerimi se razlaga Marsov pretekli vulkanizem. Sicer pa z mehanizmom v tekočem jedru, ki se imenuje geodinamo, pojasnjujejo Marsovo magnetno polje. Magnetizacija v najstarejših plasteh skorje je dokaz za nekdanji obstoj geodinama, pozneje pa je magnetno polje izginilo, kar še ni pojasnjeno. Seizmološke raziskave, ki temeljijo na odboju potresnih valov od meje plašč-jedro ali na obstoju senčnega območja za S-valovanja zaradi tekočega jedra, bodo zato prispevale k odgovoru na vprašanje, zakaj je magnetno polje planeta izginilo (Knapmeyer-Endrun in Kawamura, 2020).

Kaj povzročata potrese na Marsu

Na Marsu ni tektonike litosferskih plošč, ki se na Zemlji stalno premikajo in zato povzročajo velike napetosti, ki se sproščajo v obliki potresov predvsem na stikih plošč, pa tudi v njihovi notranjosti ob tektonskih prelomih (Knapmeyer-Endrun in Kawamura, 2020). Kljub temu je na Marsu veliko struktur, ki kažejo na precej burno geološko preteklost, ki ni zelo stara. Dokaz zanjo so veliki vulkani, med katerimi je Olympus Mons celo najvišja gora v osončju, saj se dviga kar 22 km nad površje Marsa. Ta ugasli stratovulkan je nedvomni



Slika 1: Prerezi notranjosti Zemlje, Marsa in Lune v enakem merilu (vir: www.planetary.org; prevodi napisov na sliki: *Earth* – Zemlja, *Mars* – Mars, *Moon* – Luna, *crust* – skorja, *basaltic crust* – bazaltna skorja, *continental crust* – celinska skorja, *oceanic crust* – oceanska skorja, *mantle* – plašč, *core* – jedro, *fluid outer core* – tekoče zunanje jedro, *solid inner core* – trdno notranje jedro)

Figure 1: Cross-sections of the Earth, Mars and Moon at the same scale (Source: www.planetary.org)

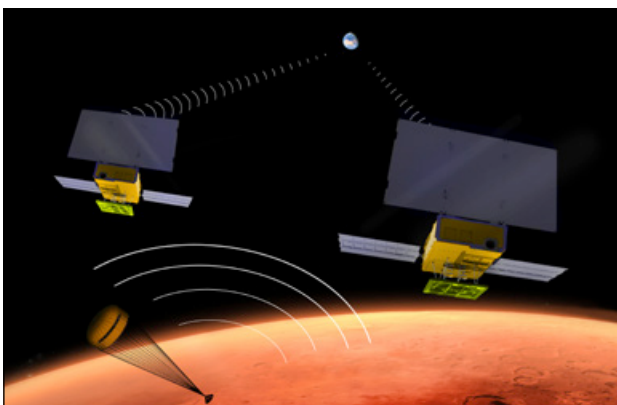


Slika 2:
Sestavljanje sonde InSight
v podjetju Lockheed
Martin Space Systems v
Denverju
(vir: Nasa)

Figure 2:
InSight lander assembly
in Lockheed Martin Space
Systems in Denver
(Source: NASA)

dokaz, da je bilo nekoč na tem mestu močno navpično dviganje bazaltne magme iz plašča in da je skorja nad njim mirovala. Če bi se tektonska plošča nad stebrom dviganja magme v plašču (vroča točka) premikala kot na Zemlji, bi namesto vulkana izjemne višine nastal niz vulkanov, kot je na primer havajsko otočje, ki leži nad vročo točko v Tihem oceanu. Nastanek velikih vulkanov je na Marsu povzročil, da je skorja razpokala in je razsekana s tektonskimi prelomi. Domnevamo, da potrese na Marsu še vedno povzročata ohlajanje notranjosti, ob tem se namreč ta krči in zunanje plasti razpokajo, ima pa tudi nekaj vulkansko aktivnih območij. Ker pa ni premikanja tektonskih plošč zaradi konvekcije v plašču, so mogoči vzrok premikanja kamninskih blokov tudi sile plimovanja zaradi sprememb v težnostnem polju,

ki jih povzročata Marsovi luni Fobos in Deimos. Zaradi privlačne sile Fobosa se površina Marsa med vsako oscilacijo deformira za približno 1 cm. Poleg tega je površje podvrženo zelo velikim dnevnim spremembam temperature, kar skupaj s plimskimi silami povzročata spremenljivo napetostno polje v Marsovi skorji in posledično potrese kot nenadne premike kamninskih blokov ob prelomih. Na površju Marsa nastajajo potresi tudi zaradi padcev meteoritov. Teh je tam razmeroma veliko, saj Mars nima atmosfere, ki na Zemlji povzroči, da večina meteorjev zgori in zato le zelo redki padejo na njeno površje kot meteoriti. Na podlagi statističnih podatkov ocenjujejo, da bo InSight v predvidenih dveh letih opazovanj zaznal med 20 in 30 udarcev meteoritov (Knapmeyer-Endrun in Kawamura, 2020).

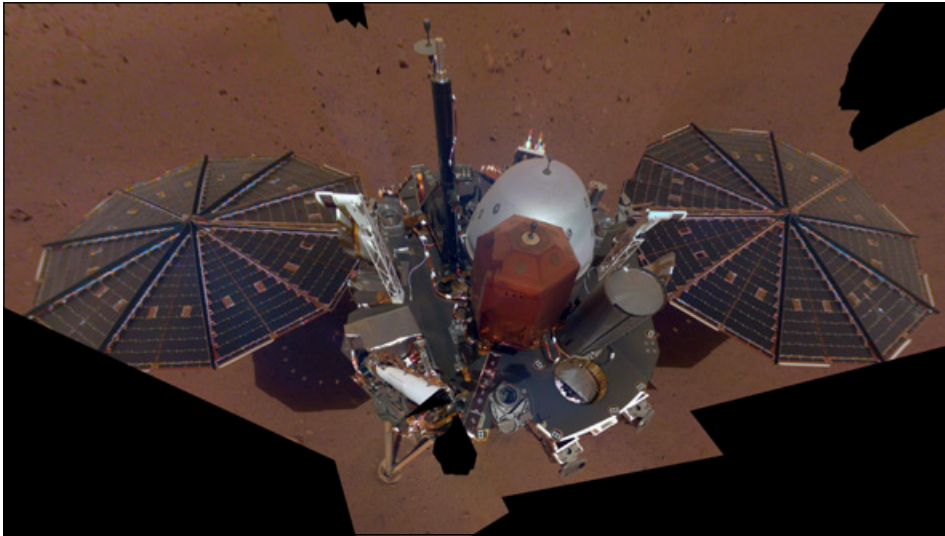


Slika 3: Relejni nano vesoljski plovili Mars Cube One med spuščanjem sonde InSight proti površju Marsa (vir: Nasa)

Figure 3: The relay nano-spacecraft Mars Cube One during the descent of the InSight lander towards the surface of Mars (Source: NASA)

Pogoji za opazovanje potresov na Marsu

InSightov seizmometer ni prvi tak instrument na Marsu. Nasa je že leta 1976 poslala na Mars dve sondi Viking, ki sta nosili vsaka svoj seizmometer, vendar je bila misija glede seizmičnih opazovanj precej neuspešna. Na Vikingu 1 seizmometra, ki mora biti med poletom zaklenjen, po pristanku ni bilo mogoče odkleniti in je zato ostal neuporaben. Tudi pri Vikingu 2 je bil seizmometer nameščen na trupu sonde in zato v preslabem stiku s površjem planeta. Ker je večino časa na Marsu močan veter, je seizmometer 19 mesecev registriral le motnje zaradi vetra, oscilacije v tlaku in temperaturi ter le en dogodek, ki bi lahko predstavljal potres. Na Luni so že leta 1968 s sondami Ranger opazovali seizmičnost ter prav tako tudi vse misije Apollo. V osmih letih



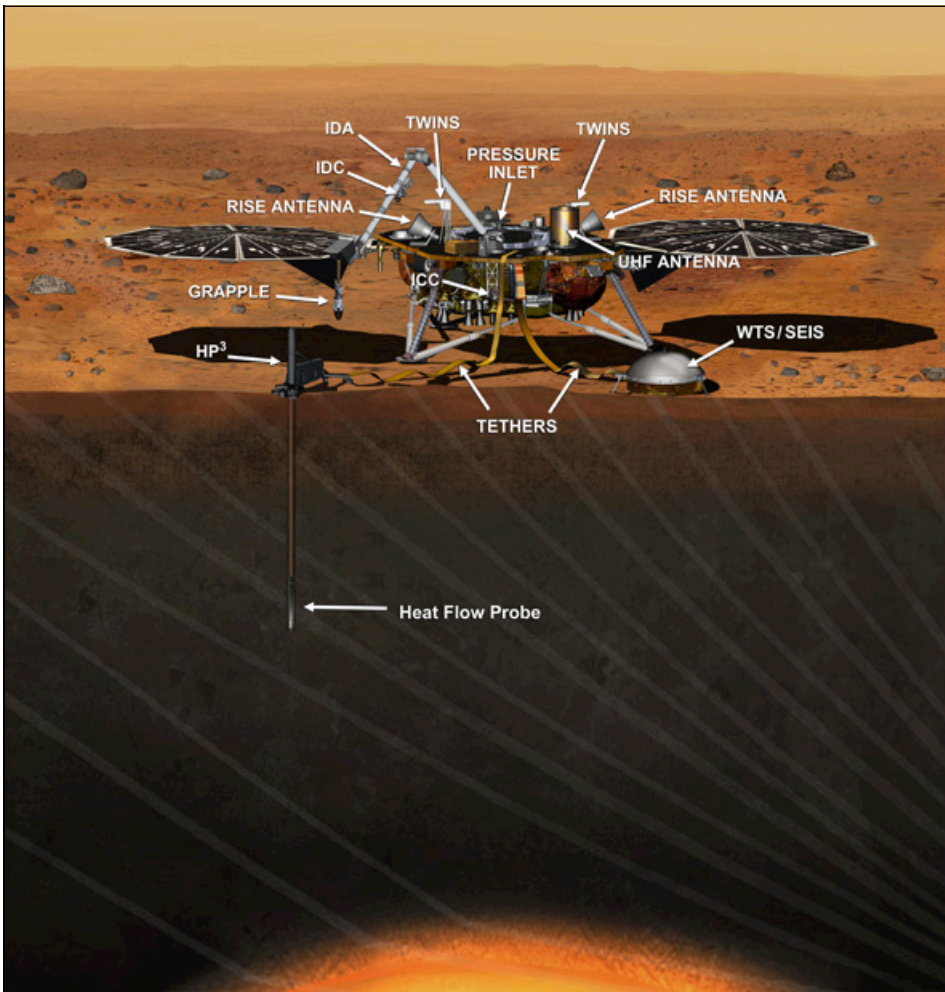
Slika 4:
Prvi lastni posnetek, ki ga je naredila sonda InSight po pristanku na Marsu (vir: Nasa)

Figure 4:
First self-picture taken by the InSight lander after landing on Mars (Source: NASA)

seizmičnih opazovanj so zaznali več tisoč potresov, zaradi česar je naše poznavanje njene notranje zgradbe (slika 1) precej dobro (Nakamura, 2020).

Izkušnje Vikinga so pokazale, da morata biti InSightova seizmometra SEIS (*Seismic Experiment for Interior Structure*) v trdnem stiku s tlemi in dobro izolirana od Marsove atmosfere. Mars ima redkejšo atmosfero od Zemljine in je sestavljena v glavnem iz ogljikovega

dioksida. Je pa vremensko dogajanje precej pestro, saj na Marsu divjajo peščeni viharji in celo peščene trombe, kar je močan vir seizmičnih motenj, zato so inženirji izdelali poseben pokrov, ki SEIS izolira od vplivov atmosfere. Sicer so pogoji za seizmično opazovanje na Marsu dobri, saj je razen vetra raven naravnih motenj precej nižja kot na Zemlji. To je predvsem posledica tega, da Mars nima oceanov, saj je na Zemlji prav medsebojni vpliv atmosfere, oceanov in celin glavni vir stalnih motenj v



Slika 5:
Sonda InSight z označenimi raziskovalnimi instrumenti (vir: Nasa; prevodi napisov na sliki: *heat flow probe* – sonda za meritev toplotnega toka, *tethers* – privezi, *grapple* – kopač, *antenna* – antena, *pressure inlet* – dovod tlaka; preostali napisi na sliki so kratice, ki so razložene v besedilu)

Figure 5:
The InSight lander with labelled scientific instruments (Source: NASA)

širokem frekvenčnem pasu, kar se imenuje mikroseizmični šum. Analize sedmih mesecev opazovanj so pokazale, da je mikroseizmični nemir trikrat manjši kot na Zemlji in najnižji do zdaj izmerjen v osončju v območju period med 5 in 20 s, kjer na Zemlji prevladuje šum oceanov. Poleg tega je InSight opremljen z vrsto meteoroloških instrumentov za merjenje hitrosti in smeri vetra, z barometrom in termometrom ter magnetometrom, kar vse omogoča prepoznavanje različnih vplivov na seizmometer. Mars je imel v geološki zgodovini magnetno polje, ki je nato izginilo, ker je domnevno prenehal delovati geodinamo v tekočem jedru. Posledično so sončni delci odnesli nekoč toplo in vlažno atmosfero in je danes Mars rdeča puščava.

Mars je precej manjši od Zemlje (njegov premer je približno polovico Zemljinega (slika 1) in ima 11 % njene mase), poleg tega pa je tudi dušenje seizmičnih valov v njegovih kamninah manjše. Zato bodo tudi relativno šibkejši potresi v primerjavi s tistimi na Zemlji predvidoma omogočali učinkovite raziskave njegove notranjosti, pa čeprav je na voljo le en seizmometer v primerjavi z več deset tisoč, ki so danes postavljeni na površju Zemlje. Če se bodo za dovolj plitev potres magnitude okoli 4,0 ali celo ob udarcu večjega meteorita razvila dovolj izrazita površinska valovanja, bi lahko ta obkrožila celoten Mars v obeh straneh in bi jih seizmometer zaznal dvakrat. To bi dalo zelo pomembne podatke o notranji strukturi.

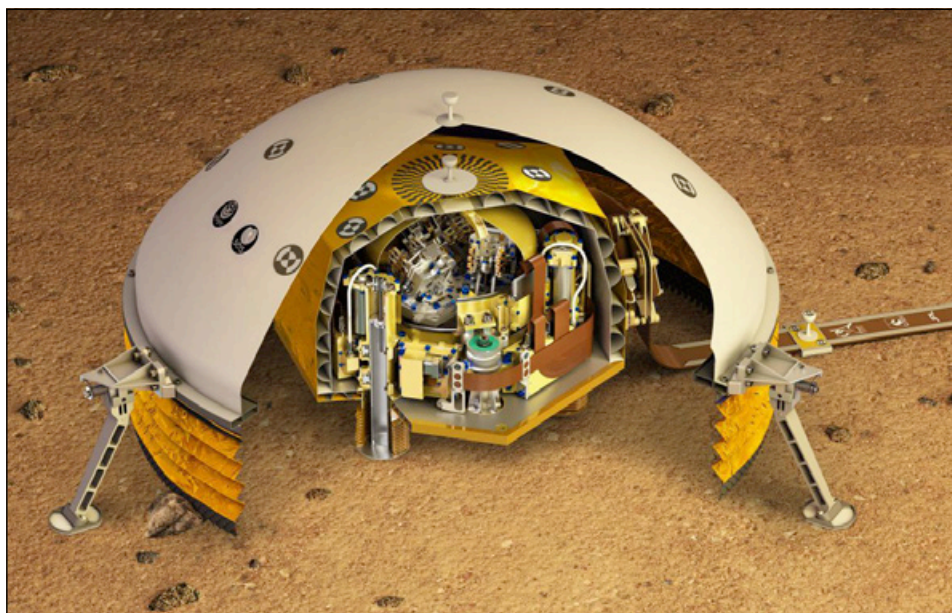
Misija InSight

V primerjavi z vsemi prejšnjimi robotskimi misijami na Mars, ki so raziskovale predvsem geologijo, kemizem in atmosfero, se InSight (Raziskovanje notranje sestave z uporabo seizmičnih in geodetskih raziskav ter raziskav toplotnega toka; *Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport*) osredotoča na notranjo zgradbo planeta (slika 2). Naše

poznavanje Marsove notranjosti je namreč slabše, kot je bilo poznavanje notranje zgradbe Zemlje pred sto leti, bilo bi pa pomembno za razumevanje zgodnjega razvoja terestičnih planetov v notranjem delu osončja, kar je eden glavnih ciljev misije. Projekt vodi NASA Jet Propulsion Laboratorij (JPL).

Sondo InSight so začeli graditi leta 2014 z namenom izstrelitve marca 2016. Zaradi težav pri zagotavljanju vakuumske tesnosti seizmometra so morali izstrelitev preložiti na naslednje izstrelitveno okno maja 2018. InSight in dve nano relejni plovili Mars Cube One (slika 3) so bili izstreljeni z raketo Atlas V. Sonda je po šestih mesecih in pol ter prepotovanih 484 milijonih kilometrov pristala 26. novembra 2018 v plitvem kraterju na ravnici Elysium Planitia blizu ekvatorja. Ker se napaja s sončnimi celicami, je tako zagotovljene največ energije za predviden čas delovanja dveh let (eno Marsovo leto). Pristajanje je obsegalo več faz. InSight je bil zavarovan z zračnim ščitom, ko je vstopil v atmosfero 80 km nad površjem s hitrostjo 19.800 km/h. Ščit se je med spuščanjem segrel na 1500 °C. Na višini 11 km se je pri hitrosti 385 m/s odprlo padalo (slika 3). Na višini 1100 m so se prižgale pristajalne rakete, ki so ga upočasnile na pristajalno hitrost 8 km/h (Knapmeyer-Endrun in Kawamura, 2020). InSight je pristal v manjšem kraterju premera okoli 25 m, zapolnjenim s sedimenti, ki so nastali ob udarcu meteorita in bili pozneje spremenjeni in preneseni z vetrom (slika 4). Na podlagi blokov kamnin je bilo ocenjeno, da je skalna podlaga iz strjene lave v globini 3–5 m (Golombek, 2020).

Na InSight je poleg seizmografa SEIS še več drugih instrumentov (slika 5): HP³ (Naprava za merjenje toplotnega toka in fizikalnih lastnosti; *Heat Flow and Physical Properties Package*) za meritev toplotnega toka v tleh in za radiometrijo, RISE (Raziskava rotacije in notranje sestave; *Rotation and Interior Structure Experiment*) za natančno določitev precesije in nutacije



Slika 6:
Prerez seizmometra SEIS
z zaščito proti vetru in
temperaturo
(vir: Nasa)

Figure 6:
Cross-section of the SEIS
seismometer with the
wind and thermal shield
(Source: NASA)

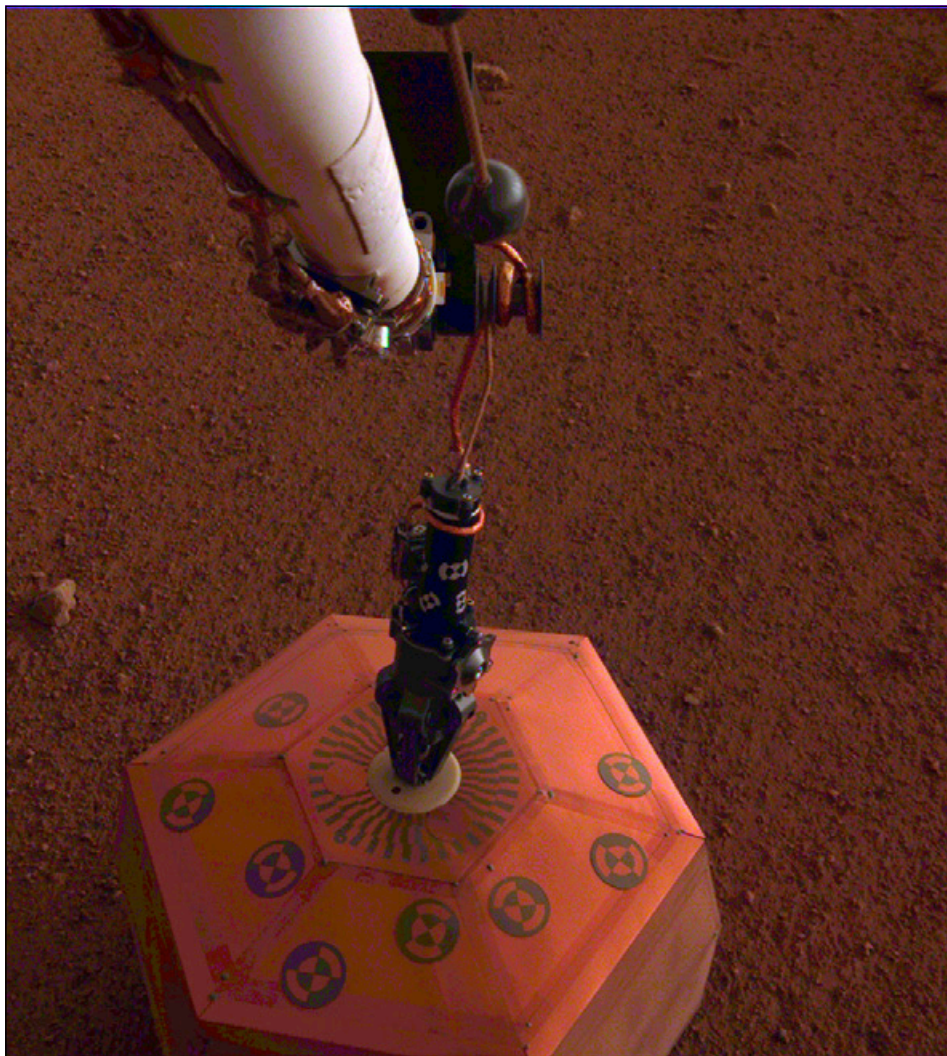
rotacijske osi Marsa ter TWINS (Meritev temperature in vetra za InSight; *Temperature and Winds for InSight*) za meteorološke meritve. Sonda ima tudi 1,8 m dolgo robotsko roko, s katero so na površje namestili SEIS in sondo HP³. Ta ima poseben sistem za lastno zabijanje do globine 5 m, kjer meri toplotno prevodnost in gradient temperature za izračun gostote toplotnega toka, ki je zelo pomemben podatek za razumevanje geološke zgodovine planeta. InSight so skonstruirali v podjetju Lockheed Martin (slika 2), večino znanstvenih instrumentov pa v vesoljskih agencijah evropskih držav. Instrument RISE deluje v radiofrekvenčnem območju X in bo omogočal natančnejšo določitev osi rotacije, precesijo in amplitudo nutacije od predhodnih s sondami Viking in Mars Pathfinder. To je pomembno za boljšo oceno velikosti in gostote Marsovega jedra in plašča ter posledično za boljše razumevanje nastanka vseh terestričnih planetov.

Sinergija različnih instrumentov in poskusov je omogočila nov način opredelitve značilnosti plitvega podpovršja. Na podlagi seizmičnih zapisov šibkih udarcev sonde HP³ s sistemom lastnega zabijanja ter zračnih vrtincev in sunkov, zaznanih s TWINS, so potrdili, da je površinska nekonsolidirana plast debela 3 m, pod njo

pa je toga kamnina. S sočasnim opazovanjem peščene vrtilca z meteorološkim instrumentom in kamero, barometrom in seizmometrom so lahko celo izračunali elastični Youngov modul površinskih sedimentov na 270 MPa (Lognonne in sod., 2020).

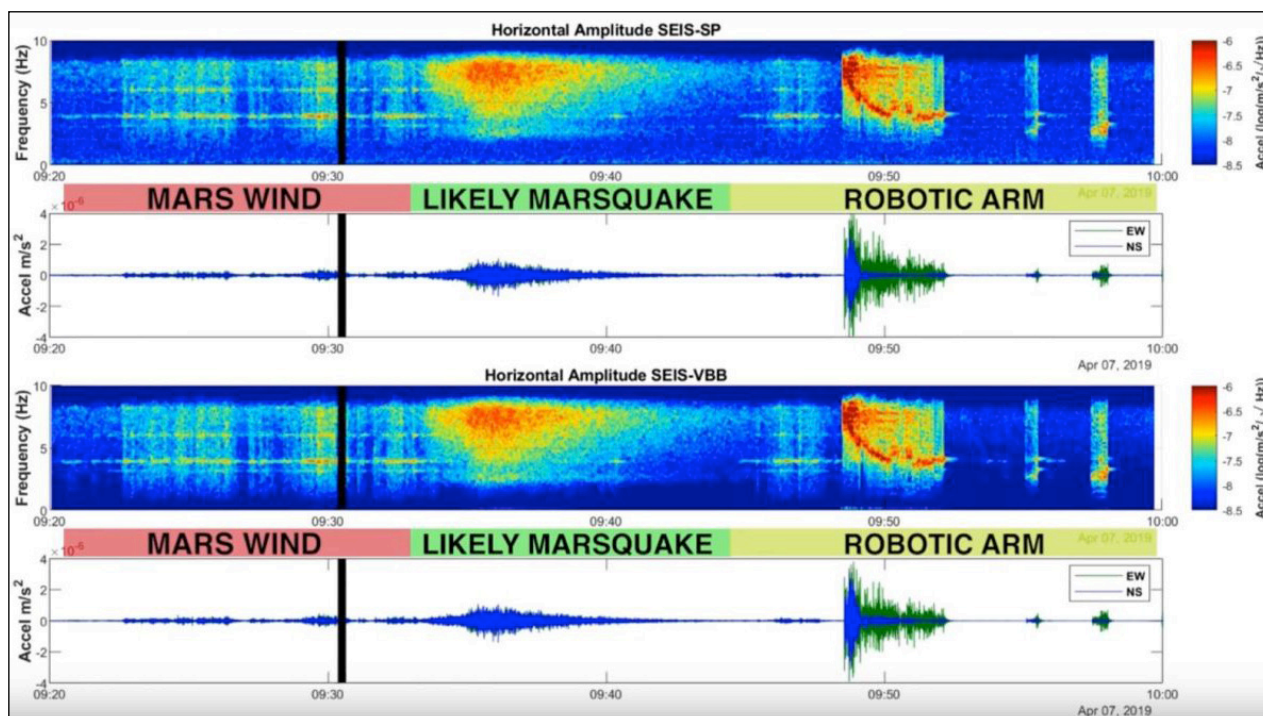
Seizmograf SEIS

Seizmograf SEIS (Seizmični poskus za notranjo sestavo; *Seismic Experiment for Interior Structure*) je najpomembnejši znanstveni instrument misije InSight. Sestavljata ga dva seizmometra: kratkoperiodni (SP), ki je občutljiv pri krajših periodah (višjih frekvencah), in zelo širokopasovni (VBB) seizmometer, ki je občutljiv v širokem intervalu period (sliki 6 in 7). Prvi je primeren za zaznavanje bližjih potresov, katerih signali vsebujejo predvsem višje frekvence, drugi pa tudi bolj oddaljenih. Oba seizmometra sta trikomponentna in merita potresno nihanje tal v treh med seboj pravokotnih smereh. SEIS so razvili pri Nacionalnem centru za vesoljske raziskave Francije ob sodelovanju drugih evropskih raziskovalnih ustanov (Lognonne in sod., 2019). Pri razvoju je bilo glavno vodilo čim bolj zmanjšati vpliv vibracij zaradi vetra, zato je seizmograf pod težkim večplastnim ščitom



Slika 7:
Postavitev seizmometra SEIS z robotsko roko na površje Marsa (vir: Nasa)

Figure 7:
Deployment of the SEIS seismometer with robotic arm on the Mars surface (Source: NASA)

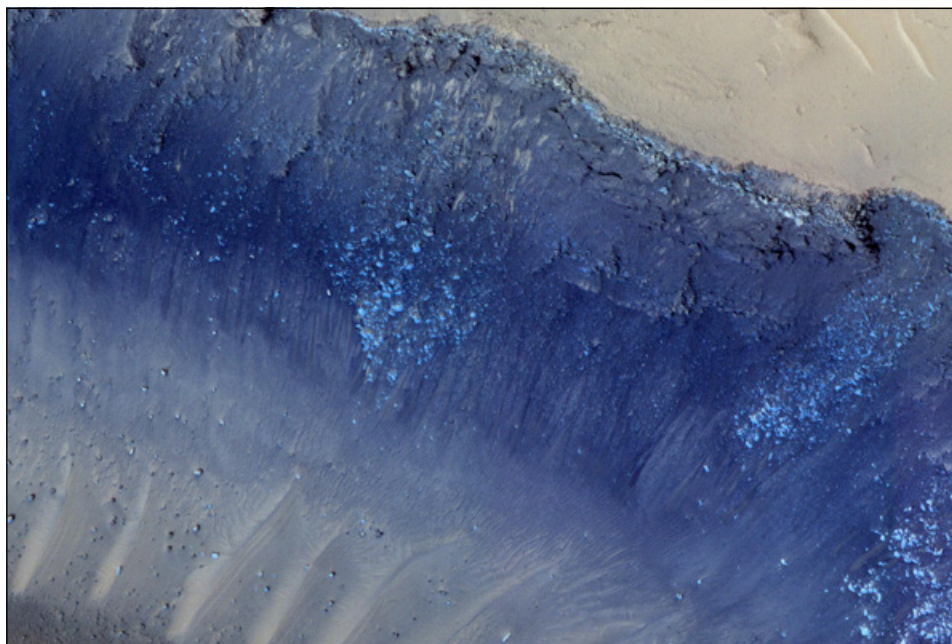


Slika 8: Prvi potres, ki ga je na Marsu zaznala sonda InSight. Na seizmogramu so pred potresom motnje zaradi vetra, za njim pa zaradi premikanja robotske roke. Zgoraj: kratkoperiodni (SP) in spodaj: širokopasovni (VBB) seizmometer (vir: Nasa; prevodi napisov na sliki: *Mars wind* – veter na Marsu, *likely Marsquake* – verjeten potres, *robotic arm* – robotska roka, *horizontal amplitude* – vodoravna amplituda)

Figure 8: The first marsquake detected by InSight. On the seismograms, Mars wind noise can be seen before the likely marsquake, and movements of the robotic arm after it. Above, the short period (SP), and below, the very broad band (VBB) seismometer. (Source: NASA)

(pokrovom), ki ga varuje pred sunki vetra in velikimi temperaturnimi spremembami na površju Marsa (slika 6). Poleg potresov zaznavata seizmometra tudi atmosferske valove in težnostne vplive oziroma plimske sile zaradi lune Fobos. Podatki seizmometrov se neprekinjeno vzorčijo s frekvenco 100 vzorcev na sekundo, vendar se zaradi omejenih zmogljivosti prenosa na Zemljo pošilja le

del teh podatkov. Visokofrekvenčno vzorčeni podatki se sicer shranjujejo lokalno za več kot en mesec, ustrezno prevzorčeni pa vsak dan pošiljajo na Zemljo v analizo. Če raziskovalci v teh seizmogramih zaznajo potres ali drug zanimiv atmosferski ali magnetni dogodek, pošljejo sondi zahtevo za prenos zanimivega odseka podatkov s polno vzorčenim signalom. Sestavni del SEIS je tudi vektorski



Slika 9: Plazovi in premiki velikih skal v sistemu razpok Cerberus Fossae, za katere se domneva, da so jih sprožili potresi (vir: Nasa)

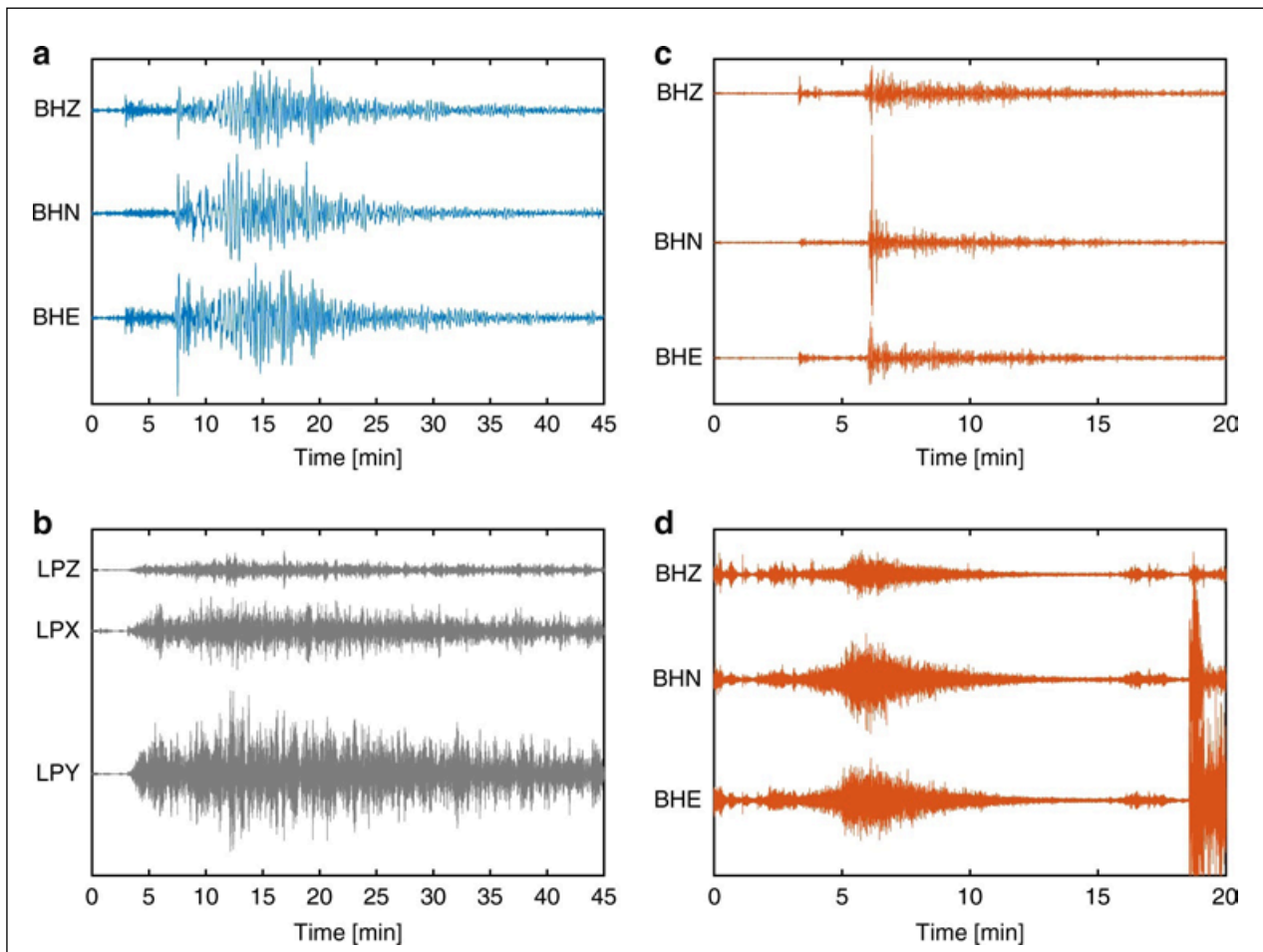
Figure 9: Landslides and movements of large blocks in the Cerberus Fossae system of fissures, supposedly triggered by marsquakes (Source: NASA)

magnetometer za meritve sprememb magnetnega polja. Pri testiranju vakuumske tesnitve seizmometra so zaznali šibko puščanje, ki pa bi v dve leti trajajočem opazovanju lahko ogrozilo uspešnost misije, zato so za marec 2016 predvideno izstrelitev morali prestavili na maj 2018. Po pristanku je InSight tri tedne opazoval okolico z vsemi razpoložljivimi instrumenti, na podlagi česar so izbrali najboljšo lokacijo za namestitev SEIS in HP³. Z robotsko roko so 19. decembra 2018 postavili SEIS na površje (slika 7) in nato prek njega namestili zaščitni pokrov (Lognonne in sod., 2019).

Prvi zaznani potresi na Marsu

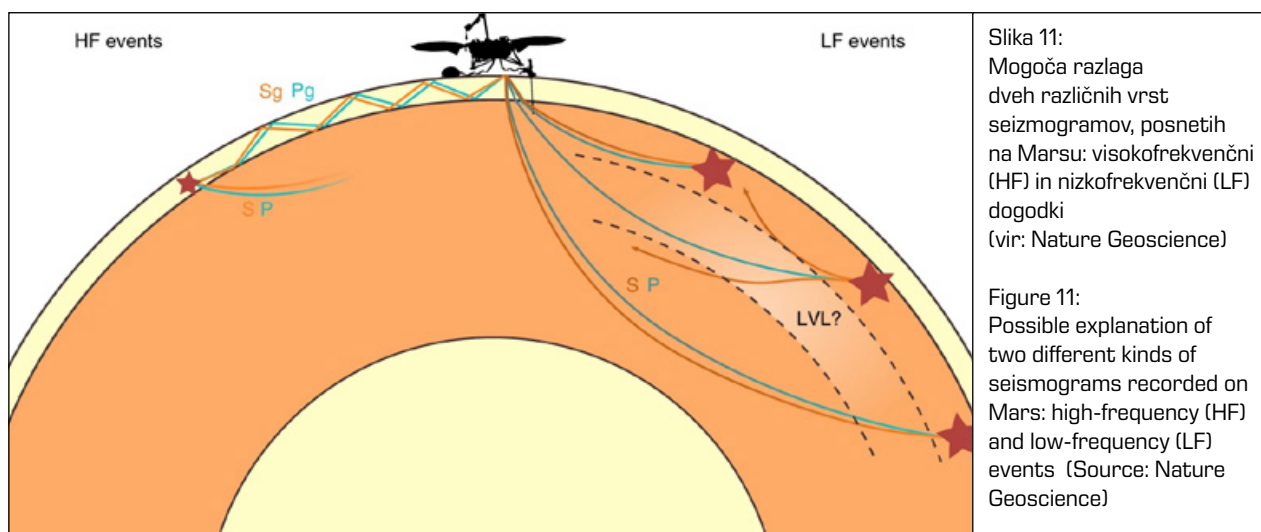
V prvih desetih mesecih opazovanja (do 30. septembra 2019) je InSight zaznal 174 potresov, kar dokazuje, da je Mars potresno dejaven planet (slika 8). Potresna dejavnost je manjša kot na Zemlji in večja kot na Luni. Potresov je na Marsu več, kot so pričakovali,

vendar niso zelo močni (Giardini in sod., 2020). Presemetljivo pa seizmogrami kažejo na dve različni skupini potresov, ki se med seboj razlikujeta. Najmočnejši potres je imel navorno magnitudo 4,0; tak potres bi čutili v večjem delu Slovenije, ne bi pa povzročil resnejših poškodb stavb. Dva najmočnejša potresa sta nastala blizu sistema razpok Cerberus Fossae, ki je od seizmometra oddaljen 1600 km in je zaradi mladega vulkanizma domnevno tektonsko dejaven. Na tem območju, kjer so dolge in globoke struge in jih je zalila lava, so znani premiki velikih skal, ki so se v preteklosti zvalile po pobočju, kar so domnevno povzročili potresi (slika 9). Tudi lava je ponekod prelomljena, kar kaže na mlado tektonsko aktivnost. Odgovor na vprašanje, zakaj je InSight pristal tako daleč od potresno domnevno najbolj dejavnega območja, je v tem, da je za raziskovanje globoke notranjosti to ugodnejše, saj potresni valovi iz oddaljenih žarišč potujejo globlje skozi plašč kot za bližje potrese. Za vse do zdaj zaznane potrese raziskovalci menijo, da so tektonskega izvora in da SEIS še



Slika 10: Primerjava seizmogramov, posnetih na Zemlji, Luni in Marsu a) potres magnitude 6,1 v Turčiji v globini 12 km, na razdalji 2730 km, b) potres magnitude 4,1 na Luni v globini 50 km, na razdalji 2690 km, c) potres magnitude 3,3 na Marsu na razdalji 1540 km, d) potres magnitude med 1,8 in 2,3 na Marsu, za katerega ni bilo mogoče natančneje opredeliti razdalje (vir: Nature Communications)

Figure 10: Comparison of seismograms recorded on Earth, Moon and Mars: a) Magnitude 6.1 event in Turkey at 12 km depth and 2730 km distance; b) Magnitude 4.1 event on Moon at 50 km depth and 2690 km distance; c) magnitude 3.3 event on Mars at 1540 km distance; d) magnitude from 1.8 to 2.3 event on Mars; the distance could not be determined. (Source: Nature Communications)



Slika 11: Mogoča razlaga dveh različnih vrst seizmogramov, posnetih na Marsu: visokofrekvenčni (HF) in nizkofrekvenčni (LF) dogodki (vir: Nature Geoscience)

Figure 11: Possible explanation of two different kinds of seismograms recorded on Mars: high-frequency (HF) and low-frequency (LF) events (Source: Nature Geoscience)

ni zaznal udarca zaradi padca meteorita (Banerds in sod., 2020).

V dveh letih in pol delovanja je do aprila 2021 SEIS skupno zaznal več kot 500 potresov, med njimi marca 2021 dva močnejša (magnituda 3,3 in 3,1). Tudi ta dva sta nastala na območju sistema razpok Cerberus Fossae, kar potrjuje domnevo, da je to potresno najbolj dejavno območje na Marsu. Sicer SEIS večino časa zaznava motnje zaradi vetra. Dodatno pa se je pokazalo, da nekaj motenj povzročata tudi krčenje in raztezanje kabela, ki povezuje seizmometer z InSight, saj so temperaturne spremembe od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ponoči do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ podnevi. Zato so leta 2021 z robotsko roko kabel delno prekrili s sipko kamnino (<https://mars.nasa.gov/insight/>).

Primerjava seizmogramov, posnetih na Zemlji, Luni in Marsu (slika 10), kaže predvsem na razlike v sipanju in dušenju potresnih valov znotraj treh nebesnih teles. Dve že omenjeni različni vrsti potresov na Marsu sta podobni seizmogramom potresov na Zemlji (sliki 10a in c) in na Luni (sliki 10b in d). Seizmogram potresa na Luni (slika 10b) je sicer podoben tistemu na Zemlji (slika 10a), vendar sipanje v suhi, porozni skorji otežuje prepoznavanje počasnejših faz S-valovanja, manjše dušenje pa se kaže v daljši valovni obliki. Na seizmogramu potresa na Marsu (slika 10c) se jasno vidijo prihodi P- in S-valovanj, manjkajo pa površinska valovanja, kar je lahko povezano z globino žarišča, ki zaradi samo enega seizmografa ni znana, ali pa sipanja valovanj. Za seizmogram drugega potresa na Marsu (slika 10d) so značilne visoke frekvence, vretenasta oblika in odsotnost jasnih seizmoloških faz, ki bi ustrezale prihodom P- in S-valovanj. Visoke amplitude, ki se začnejo pri 18. minuti seizmograma, je povzročilo premikanje robotske ročice. Seizmogrami z Marsa kažejo daljši čas potresnega nihanja, kot ga poznamo na Zemlji, in krajši od tistega na Luni. To pomeni, da je dušenje valovanj močnejše kot na Zemlji in šibkejše kot na Luni. Dušenje pa je zelo odvisno od termičnih lastnosti in prisotnosti plinov ali vode v kamnini. Opazovane razlike zato jasno kažejo na različno geološko sestavo vseh treh

nebesnih teles. Analize torej kažejo, da je v skorji Marsa nekaj vlage, ni pa mogoče ugotoviti, ali so pod površjem večje količine vode (Banerds in sod., 2020).

Spremenljivost zapisov potresov kaže, da sta v Marsovi notranjosti vsaj dve različni plasti (slika 11). Skorja je bolj podobna Lunini z značilno visokim sipanjem in majhnim dušenjem, plašč pa je bolj podoben Zemljinemu z nizkim sipanjem in visokim dušenjem. Ker se je za Mars pričakovalo, da je po notranji zgradbi nekje med Zemljo in Luno glede sipanja in dušenja, je obstoj dveh različnih skupin potresov na Marsu presenetljiv. Analize seizmogramov so pokazale, da je za vrhnjo, od 8 do 11 km debelo plast skorje značilna nepričakovano nizka seizmična hitrost, kar kaže na močno razpokano ali drugače spremenjeno kamnino. Majhne amplitude S-valovanj za bolj oddaljene potrese nakazujejo na nizkohitrostno plast znotraj plašča (slika 11), kar so nekateri predvidevali in bo koristilo pri oceni mineralne sestave.

Nadaljnje analize do zdaj zbranih zapisov potresov bodo usmerjene v prepoznavanje seizmoloških faz, ki bodo omogočale določitev debeline skorje Marsa na mestu pristanka InSight in opredelitev seizmičnih hitrosti in dušenja v zgornjem delu plašča. Da bi lahko opredelili globlje strukture, bo treba počakati na kakšen večji potres, za katerega bo mogoče zaznati tudi odboje od meje plašč-jedro.

Sklepne misli

Do zdaj zbrani podatki misije InSight so pokazali, da so seizmološka opazovanja najpomembnejša za raziskave notranje strukture Marsa. Po dveh letih in pol je delovanje seizmografa SEIS dobro in stabilno ter bo lahko zato znatno podaljšano. Nasa je misijo tudi uradno podaljšala do decembra 2022. Veliko se pričakuje od novega seizmografa SEM, ki ga na ExoMars 2020 sondi pošilja na Mars Evropska vesoljska agencija. Predviden je njegov pristonek na točki, ki bo 150° oddaljena od InSight in

bliže nekaterim območjem, ki so domnevno potresno dejavna (Tharsis in Valles Marineris). Potrese, zaznane hkrati na dveh seizmografih, bo mogoče bistveno natančneje locirati in na njihovi podlagi izvesti številne

dodatne analize notranje strukture Marsa. Žal pa je bila za leto 2020 načrtovana izstrelitev ExoMars pred kratkim preložena na leto 2022, zato se še ne ve, ali bosta oba seizmografa sploh delovala nekaj časa sočasno.

Viri in literatura

1. Banerds, W. B., in sod., 2020: Initial results from the InSight mission on Mars. *Nature Geoscience*, 1-14.
2. Giardini, D., in sod., 2020: The seismicity of Mars. *Nature Geoscience*, 24 February 2020, 1-17.
3. Golombek, M., 2020: Geology of the InSight landing site on Mars. *Nature Communications*, 24 February 2020, 1-11.
4. Heavens, N., 2020: InSight searches high to see below. *Nature Geoscience*, 24 February 2020, 1-2.
5. Knapmeyer-Endrun, B., Kawamura, T., 2020: NASA's InSight mission on Mars—first glimpses of the planet's interior from seismology. *Nature Communications* 11, 1451.
6. Lognonne, P., in sod., 2019: SEIS: Insight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars. *Space Science Reviews*, 215/12, 1-170.
7. Lognonne, P., in sod., 2020: Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. *Nature Geoscience*, 24 February 2020, 1-10.
8. Nakamura, Y., 2020: Rebirth of extraterrestrial seismology. *Nature Geoscience*, 24 February 2020, 1-2.
9. NASA Mars InSight Mission. <https://mars.nasa.gov/insight/>, 9. 5. 2021.
10. Wikipedia: InSight. <https://en.wikipedia.org/wiki/InSight>, 9. 5. 2021.
11. Wikipedia: Marsquake. <https://en.wikipedia.org/wiki/Marsquake>, 9. 5. 2021.
12. Earth-Mars-Moon interior structures. <https://www.planetary.org>, 9. 5. 2021.