



British
Geological Survey

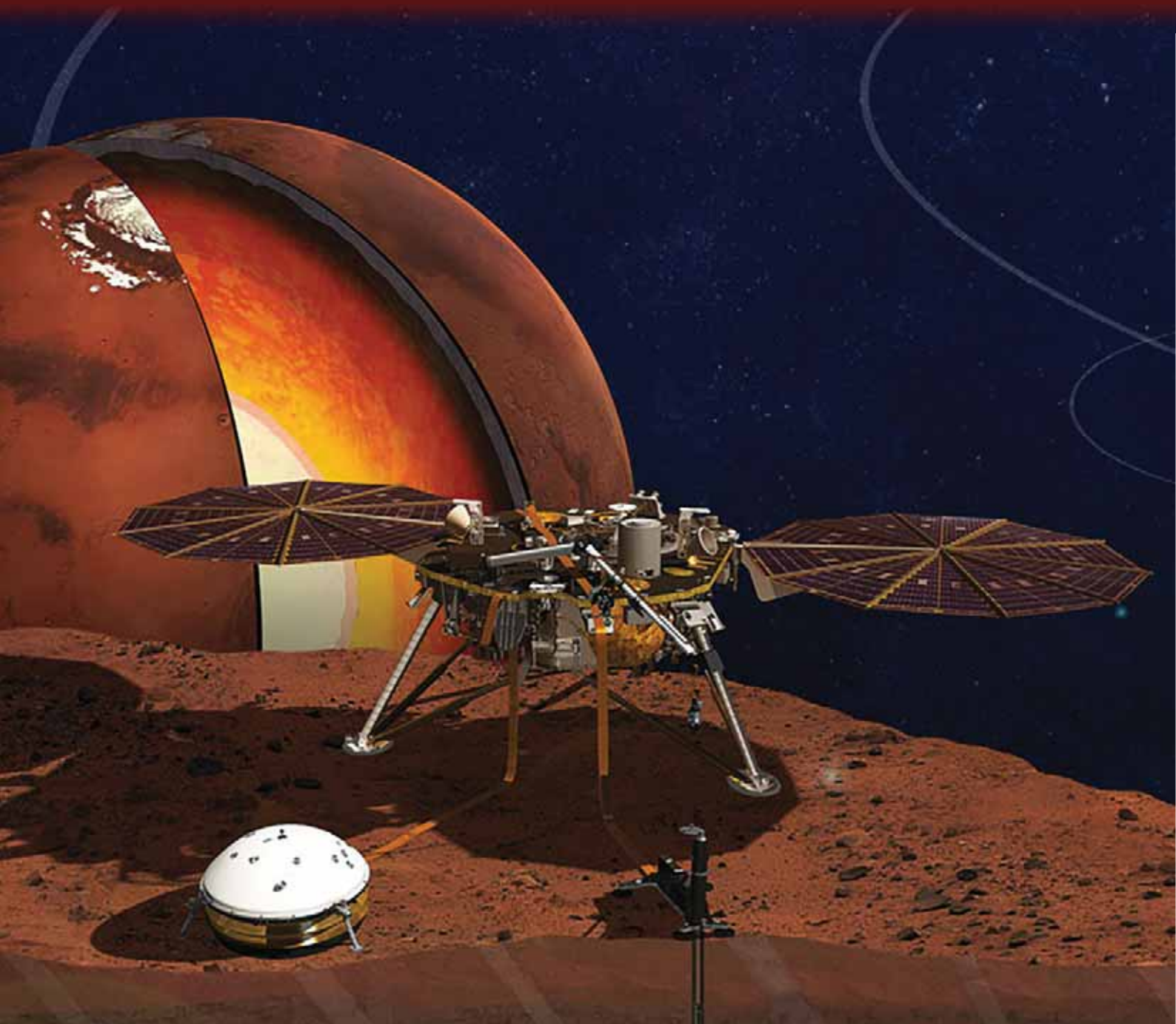
NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

MTA CSFK
Geodéziai és
Geofizikai
Intézet



MarsQuake

Marsrengések



www.bgs.ac.uk/marsquake

Szeizmológia más bolygókon



InSight

MARSQUAKE

MARSRENGÉSEK

Szeizmológia más bolygókon

A fordítás az alábbi kiadás alapján készült:
Paul Denton, John Stevenson, Andy McMurray:
MarsQuakes — Seismology on another planet. Nottingham: British Geological Survey.
További anyagok: Paula Martin, Robin Mobbs és Sophie Allan
Nottingham NG12 5GG
© 2017 British Geological Survey

Fordította: *Kiszely Márta*¹
Lektorálta: *Hudoba György*²

Felelős kiadó:

Szarka László Csaba, főigazgató
Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Geodéziai és Geofizikai Intézet

ISBN 978-963-8381-39-2

¹ MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, szeizmológus

² Óbudai Egyetem, főiskolai docens, fizikus

Hivatkozás:

Denton, P, Stevenson, J P, and McMurray, A. 2017. MarsQuakes — Seismology on another planet. Nottingham: British Geological Survey.

A kiadvány anyaga oktatási célokra lemásolható a Brit Geológiai Szolgálat, mint szerző és tulajdonos megnevezésével. Anyagi haszonnal nem forgalmazható.

Borítókép: NASA

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	3
1.1	MI A „MARSRENGÉSEK” ISKOLAI PROGRAM ÉS MIT TANULHATNAK MEG BELŐLE A DIÁKOK?	3
1.1.1	Órai programok	3
1.1.2	Kapcsolódó tantárgyak	3
1.1.3	Tények a Marsról	4
1.1.4	Az űr közeteinek osztályozása	5
1.1.5	Utazás a Mars felszínén (kiegészítés - KM)	7
2	AZ INSIGHT MISSZIÓ ÁTTEKINTÉSE	8
2.1	A KÜLDETÉS FELADATAI	8
2.2	AZ INSIGHT LESZÁLLÓ EGYSÉG FELÉPÍTÉSE	9
2.3	A SEIS REZGÉSÉRZÉKELŐ EGYSÉG	10
2.4	INSIGHT: A NASA FELFEDEZŐ KÜLDETÉSŰ ŪRHAJÓJA	11
10		11
2.5	A MARS FELÉPÍTÉSE	12
2.5.1	A lemeztektonika és a Mars	12
2.5.2	A Föld-típusú bolygók szerkezete	12
2.5.3	Hogyan hűlnek ki a Föld-típusú bolygók?	13
2.5.4	Milyen feltételek szükségesek a lemeztektonika létrejöttéhez?	13
2.5.5	Van-e bizonyíték a lemeztektonikára más bolygókon?	14
2.5.6	Van-e kapcsolat a lemeztektonika, a kontinensek és az élet között?	14
2.6	AZ ÁTMENETI ZÓNA ÉS A KÖPENY GEOKÉMIAJA	15
2.7	MILYEN SZEIZMIKUS FORRÁSOK LEHETNEK A MARSON?	16
2.8	VETŐK	16
2.8.1	Árapály erők okozta mozgások	16
2.8.2	Légköri hatások	17
2.8.3	Meteorit-becsapódások	17
2.8.4	Marsrengések	18
3	BECSAPÓDÁSOK ÉS SZEIZMIKUS HULLÁMOK: MATEMATIKAI ÉS FIZIKAI HÁTTÉR	19
3.1	A HULLÁMOK TÍPUSAI	19
3.1.1	Longitudinális hullámok	20
3.1.2	Transzverzális hullámok	21
3.2	A SZEIZMIKUS HULLÁMOK	21
3.2.1	Térhullámok	21
3.2.2	Felületi hullámok	23
3.3	MIT ÁRULNAK EL A SZEIZMIKUS HULLÁMOK EGY BOLYGÓ SZERKEZETÉRŐL?	24
3.3.1	A P-hullám refrakciója	25
3.3.2	Az S-hullám árnyékszónája	25
3.4	HOGYAN ÉS MIT FOGUNK TANULNI AZ INSIGHT KÜLDETÉS SORÁN A SZEIZMIKUS ESEMÉNYEKBŐL?	26
3.4.1	Részecskék mozgása	27
3.4.2	A marsrengések helyének meghatározása egyetlen állomás segítségével	29
4	EGY KRÁTER KELETKEZIK: HÁTTÉRTUDOMÁNY	31
4.1	A BECSAPÓDÁSI KRÁTEREK	31
4.2	MI TÖRTÉNIK EGY BECSAPÓDÁS UTÁN?	32
4.2.1	Egyszerű kráterképződés	32
4.2.2	Összetett kráterképződés	34
5	SZÓTÁR	36
6	IRODALOMJEGYZÉK	37
7	ÁBRAJEGYZÉK	38

8	FELADATOK ÉS KÍSÉRLETEK.....	39
8.1	A MARS KRÁTEREK MÉRETÉNEK A MEGHATÁROZÁSA.....	40
8.2	A KRÁTERKÉPZŐDÉS MODELLEZÉSE.....	47
8.3	A MARS KRÁTEREK HELYÉNEK MEGHATÁROZÁSA (TANÁRI SEGÉDLET).....	50
8.4	HULLÁMOK: METEORIT-BECAPÓDÁSOK KELTETTE SZEIZMIKUS HULLÁMOK AMPLITÚDÓJÁNAK VIZSGÁLATA....	53
8.5	HULLÁMOK: A HANGHULLÁMOK SZILÁRD ANYAGBAN ÉS LEVEGŐBEN VALÓ TERJEDÉSE	56
8.6	A P- ÉS S-HULLÁMOK MODELLEZÉSE SPIRÁLUGÓVAL.....	58
8.7	HULLÁMOK: HANGSEBESSÉG MEGHATÁROZÁSA LEVEGŐBEN	60
8.8	HULLÁMOK: A P ÉS S HULLÁMOK DEMONSTRÁCIÓJA EGY DOBOZBAN	64
8.9	A BECAPÓDÁS IRÁNYA	66
8.10	P- ÉS S-HULLÁMOK DEMONSTRÁCIÓJA DIÁKOKKAL.....	67
8.11	BBC MICRO:BIT SZEIZMOLÓGIA.....	69

1 Bevezetés

1.1 Mi a „Marsrengések” iskolai program és mit tanulhatnak meg belőle a diákok?

A British Geological Survey „MarsQuake” programjához kapcsolódó „Marsrengések” programban egy rövid tananyag, továbbá feladatok és kísérletek találhatóak, melyek során a NASA 2018-as InSight Mars expedíció által visszaküldött valós adatokat és képeket használhatják fel a diákok. Egyes feladatok és kísérletek akár otthon, egyénileg is megcsinálhatók.

A célközönség a 11-18 éves korosztály. A foglalkozások során a diákok modellezhetik a meteorit-bechapódásokat, és vizsgálhatják a bechapódások hatását. A mars-rengések elemzése pedig segít abban, hogy jobban megértsük a "vörös bolygó" belső szerkezetét.

Az InSight leszállóegység két szeizmométert telepít majd a Marsra, amelyek „élő” adatokat küldenek vissza a Földre. Az 1960-as és 1970-es években végrehajtott Hold-missziók óta ez lesz az első lehetőség arra, hogy földön kívüli talajrengés adatokat tanulmányozhassunk.

Az InSight szeizmométerek adatai az interneten szabadon hozzáférhetőek lesznek. A misszió várhatóan egy évig tart, amely során egy olyan egybefüggő adatfolyamot kapnak a tudósok - és a programba bekapcsolódó diákok is, amit önállóan elemezhetnek.

A MarsQuake program angol nyelvű honlapja:

<http://www.bgs.ac.uk/marsquake>

A programra való jelentkezés, a magyar nyelvű oktatóanyagok és a feldolgozandó adatok az alábbi honlapokon érhetőek el: **MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet:**

<http://marskutatas.suliszeizmo.hu>

és/vagy: **Terkán Lajos Bemutató Csillagvizsgáló:**

<http://telapo.datatrans.hu/mars>

1.1.1 Órai programok

Az órai tevékenységek a MarsQuake programhoz kapcsolódnak (www.bgs.ac.uk/marsquake) és részben a Marsról érkező valós adatok elemzéséből és egyszerű osztálytermi szimulációkból állnak. A **8. fejezet** 11 db. órai programot tartalmaz, melyek témájából néhányat felsorolunk ízelítőnek:

1. Meteorit-bechapódások keresése a HiRise Mars körül keringő műhold nagyfelbontású képei segítségével.
2. A meteorit-bechapódások szimulációja golyóejtési kísérletekkel.
3. A szeizmikus hullámok tanulmányozása.
4. A szeizmikus hullámok detektálása egyszerű érzékelők pl. táblagépek, okostelefonok házi szeizmométerek és egyszerű gyorsulásmérők segítségével.
5. Szeizmikus események elemzése egy állomás adatainak felhasználásával, amik lehetnek földrengések, robbanások, "holdrengések" és végül adatok a Marsról.

Eredmény: a diákok megtanulják, hogyan kell szeizmikus adatokat elemezni egyszerű táblázatok, félprofesszionális analízáló szoftverek és egyszerű számítógépes programok segítségével, melyek közül van olyan, amit akár maguk is megírhatnak.

1.1.2 Kapcsolódó tantárgyak

A Marsrengések program az ismeretek széles körét öleli fel, elsősorban a fizika tananyagát, beleértve a Naprendszer, a hullámtan, az energia, a távolság, a sebesség és időtartam számításokat, de a foglalkozások során számos más tantárgy is előkerül, mint a matematika, a geológia és a földrajz.



1.1.3 Tények a Marsról

A Mars átmérője körülbelül a fele, tömege mintegy 10%-a, sűrűsége pedig körülbelül 70%-a Földének. A Mars klímája sokkal hűvösebb. Az átlagos hőmérséklet körülbelül $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$, ami a Naptól való nagyobb távolságával és szén-dioxidban ugyan gazdag, de nagyon ritka légkörével magyarázható. A Mars időjárását porviharok uralják. Ezek a viharok képesek az egész bolygót beborítani és a hőmérsékletét befolyásolni.

A Föld felszínének mintegy kétharmadát óceánok borítják, a Mars felszínén viszont nincs folyékony víz. Azonban a tudósok úgy vélik, hogy a Mars éghajlata 3,5 milliárd évvel ezelőtt hasonló volt az ősi Földéhez, vagyis melegebb és nedvesebb lehetett a mostaninál. A Mars nedvesebb éghajlatának bizonyítékát láthatjuk folyómedrek, folyódelták és egykori tavak megmaradt nyomaiban.

Az évmilliók során mind a Föld, mind a Mars felszínét meteoritek bombázták, és bombázzák még ma is. Azonban a marsi kráterek sokkal jobban megőrződtek, mivel az időjárási hatások, főként a csapadék hiánya miatt ott az erózió lényegesen lassúbb. A kisebb meteoroidok elégnék a Föld légkörében és soha nem érik el a földfelszínt, de a Mars ritkább légkörén keresztül ezek is elérhetik a felszínt, és a becsapódással krátereket okoznak.

„Belelátni” a Marsba, azaz belső szerkezetének felderítése a szeizmológia módszereivel, vagyis a "marsrengések" és meteorit-becsapódások okozta talajrezgések tanulmányozása révén lehetséges. A tudományos kutatás receptje látható az 1. ábrán.



1. ábra. A tudományos kutatás receptje

1.1.4 Az űr kőzeteinek osztályzása

(2-3-4-5-6-7 ábrák.)



2. ábra. Az űrbéli kőzetek a Naprendszer részei



3. ábra. Meteoroid, meteor és meteorit



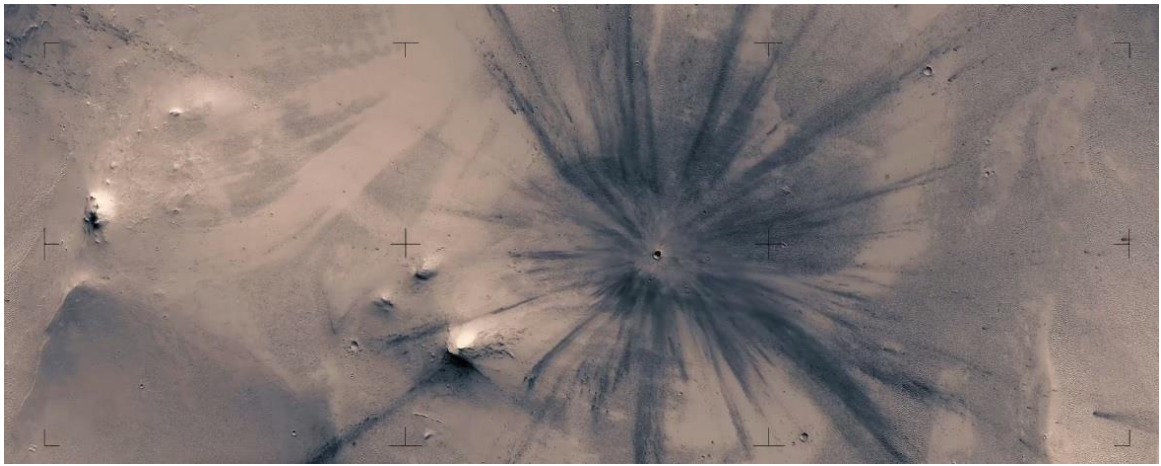
6. ábra. A Föld és a Mars összehasonlítása (3)



7. ábra. A marsi szeizmikus események néhány lehetséges forrása

1.1.5 Utazás a Mars felszínén (kiegészítés - KM)

A Mars felszínéről úgy 12 éve Jan Fröjdman egy finn származású filmes fantasztikus nagyfelbontású képeket készített. A HiRISE kamera felvételeit rakta össze és egy pár perces gyönyörű utazás lett az eredménye. Először kiszínezte a felvételeket ugyanis a HiRISE fekete-fehér képeket készít. Ezután azonosította a felvételeken látható fontosabb elemeket, majd a térbeli hatás érdekében különböző viszonyítási pontok szerint párba állította a felvételeket. „Nagyon lassú munka volt”, mondta Fröjdman, és igaza lehet, összesen 33 ezer viszonyítási pont meghatározása kellett a végeredményhez. A <https://vimeo.com/207076450> címen elérhető videó a Mars Phobos holdjával indul, majd a következő marsi felszíni elemeket látjuk: PSP_007769, ESP_018859, ESP_012435, ESP_034285, ESP_011648, ESP_045091, ESP_020878, ESP_045634, ESP_037704, ESP_046725, ESP_037705, ESP_018548, ESP_016641, ESP_027236, ESP_011729, ESP_045571, ESP_047503, ESP_023464, ESP_013049. (A HiRISE kamerája által készített képeket egy ingyenesen hozzáférhető online adatbázisban tárolják a <https://hirise.lpl.arizona.edu> címen. A fenti PSP és ESP megjelölések az adatbázisban használt felvételeket azonosítják. Ezekből mutat egyet a 8. ábra: ESP_034285.)



8. ábra. A HiRISE kamera nagy felbontású képeiből készült 3D hatású videó egy részlete

2 Az InSight misszió áttekintése

A NASA InSight (**I**nterior **E**xploration using **S**eismic **I**vestigations, **G**eodesy and **H**eat **T**ransport) kutatási programjának az a küldetése, hogy egy olyan geofizikai leszállóegységet helyezzen el a Marsra, ami a bolygó belsejét tanulmányozza. Az InSight elsődleges célja felderíteni, hogy egy kőzetbolygó miképpen alakul ki, és hogyan fejlődik.

Általában egy kőzetbolygó kialakulása az **akkréció**¹ elnevezésű folyamat során megy végbe, amikor porrészecskék és apró kőzetdarabok fokozatosan összeragadnak és a test egyre nagyobbá válva végül eléri egy bolygó méretét. Ahogy nő, úgy melegszik a belseje, megolvad és gömbölyű formát vesz fel. Anyaga ezután lehül és megszilárdul, ezáltal kifejlődik az az égitest, amit ma úgy nevezünk, hogy Föld-típusú bolygó. Belseje övekre válik szét: mag, köpeny és kívül a kéreg.

Az összes Föld-típusú bolygó hasonló szerkezetű, anyaguk nagy része nagyjából ugyanaz, mint a meteoritok anyaga, amiből kialakultak, de ez semmiképpen sem jelenti azt, hogy egyformák is lennének. Mindegyik Föld-típusú bolygó jelenlegi szerkezetét és formáját a **differenciálódás** nevű folyamat néven nyerte el. A különböző elemek és ásványok kikristályosodnak és eltérő mértékben süllyednek le a megolvadt bolygómasszába.

Az InSight elsődleges célja az lesz, hogy a bolygó kialakulása során történő differenciálódás folyamatának rejtélyét megoldja, megértsük az akkréció menetét és a Föld-típusú bolygók végleges kialakulását, azaz a mag, köpeny, és a kéreg létrejöttéhez vezető folyamatokat. A misszió másodlagos célja az, hogy alaposan tanulmányozza a „marsrengéseket” és a meteorit-becsapódásokat. Ezek mind értékes ismereteket adhatnak a Földön zajló folyamatokról is.

Az InSight e célkitűzések megvalósításához hatféle vizsgálatot végez el.

2.1 A küldetés feladatai

1. derítse fel, hogy a Mars magja mekkora, milyen összetételű és milyen a fizikai állapota (szilárd vagy folyékony)
2. határozza meg, a Mars kérgének vastagságát és milyen szerkezetű
3. határozza meg a Mars köpenyének az összetételét és a struktúráját
4. határozza meg a Mars belsejének hőmérsékletét

¹ akkréció – felhalmozódási folyamat

5. mérje meg a Mars szeizmikus aktivitását, meghatározni a marsrengések **magnitúdóját**², és földrajzi eloszlásukat
6. határozza meg a Mars felszínére becsapódó meteoritek számát

A MarsQuake oktatási projekt középpontjában az InSight szeizmológiai egység kísérletei állnak, és olyan erőforrásokat és eszközöket biztosít, amelyek segítenek a kutató diákoknak a szeizmikus kísérlet eredményeinek megértésében és értelmezésében.

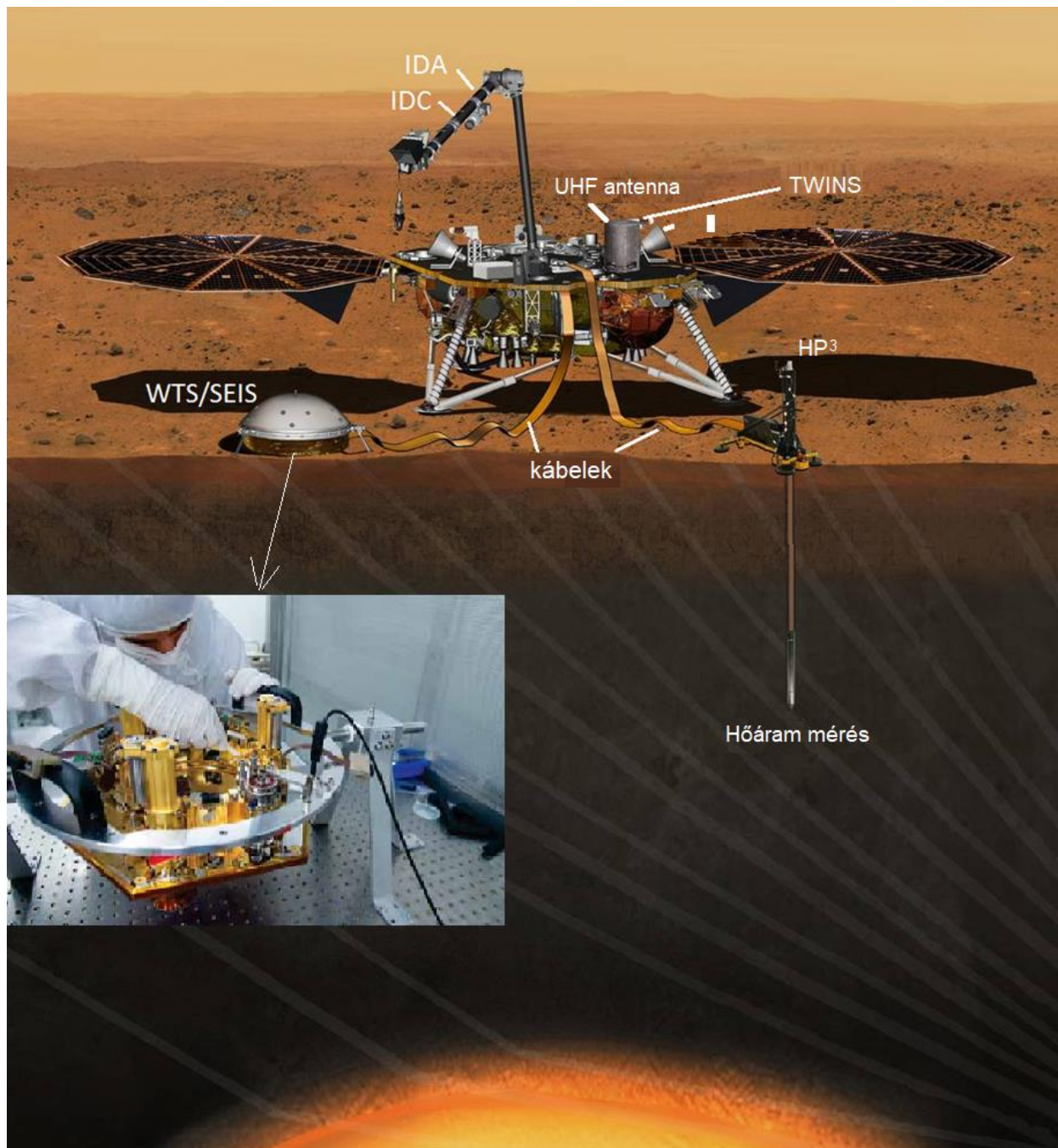
2.2 Az InSight leszálló egység felépítése

Az InSight egység egy hagyományos ejtőernyős-alapú helyben maradó leszállóegység, ami a NASA Phoenix Lander által kipróbált és bevált technológiája. A leszállóegységet napelem látja el energiával. Európai partnerek tervezték a hasznos terheket: Franciaországban a hosszú periódusidejű szeizmométert, az Egyesült Királyságban pedig egy egyszerűbb és robusztusabb rövid periódusú szeizmikus érzékelőt. Németországban egy hőmérsékletmérő egységet építettek, ami akár 5 m-re a föld alá tud majd fúrni és megméri a bolygó belsejéből másodpercenként kiáramló hő mennyiségét. A fedélzeti elektronikát és a nagy felbontású helyzeti információt adó egységet Svájcban fejlesztették ki. A 9. ábra a Mars felszínén levő InSight leszálló egységet ábrázolja, ahogy azt a művész elképzelte (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19811>). A rajz mutatja a szonda 2 méter hosszú robotkarját (IDC – Instrument Deployment Arm), amin a szonda egyik kamerája (IDA – Instrument Deployment Camera) is helyet kapott. Ez a kar telepíti a felszínre a 29,5 kg tömegű, naponta 38 megabit információt szolgáltató szélessávú szeizmikus érzékelőt (SEIS – Seismic Experiment for Interior Structure), melyet a kéreg lehetséges tektonikus aktivitásán túl a meteoritbecsapódások, a légköri viharok okozta talajrezgések detektálására és a Mars Phobos holdja által keltett árapály hatások felderítésére terveztek. A műszert egy fedél védi a szélsőséges hőmérsékletingadozásoktól és a szélről (WTS – Wind and Thermal Shield), mely nagymértékben csökkenti a háttérzajt, és növeli a talajrezgések detektálási érzékenységét.

A hőáram mérésére szolgáló műszert (HP³ – Heat Flow and Physical Properties Package) szintén a robotkar helyezi a talajra. A RISE (Rotation and Interior Structure Experiment) nagy pontossággal követi nyomon, hogy a Nap körüli keringés során hogyan ingadozik a Mars tengelye. A megfigyelésekből a magról kapunk részletes ismereteket, mekkora a mérete, szilárd, vagy folyékony, és a vason kívül még milyen elemeket tartalmazhat. A szonda a két UHF³ sávban dolgozó kürtantenna segítségével a vele együtt érkező, de Mars körüli pályán maradó két utazótáska méretű MarCO (Mars Cube One) és a még működő MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) műholdon keresztül tartja a Földdel a kapcsolatot. Az energiaellátását pedig napelemtáblák szolgáltatják.

² magnitúdó – nagyságrend

³ UHF – radar frekvenciasáv jelölése: deciméteres hullám (300-1000 MHz)



9. ábra. Az InSight leszálló egység fantáziaképe és a SEIS belseje

2.3 A SEIS rezgésérzékelő egység

A SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) egy hosszú periódusú rezgéseket érzékelő egység, amit a párizsi Földtani Fizikai Intézetben (IPGP) terveztek. Érzékenysége és a frekvencia-átvitele a legjobbak közé tartozik. Az eszközben három, egymástól független, vákuum kamrákba helyezett érzékelő található, ami lehetővé teszi a talajmozgás három irányban történő mérését (fel-le, és a vízszintes síkban két, egymásra merőleges irányban). E szenzor korai változata repült 1996-ban a sajnos sikertelen orosz Mars-küldetés során.

A SEIS tartalmaz egy MEMS gyorsulásmérő egységet (mikro-elektromechanikus rendszert) is, amit Londonban az Imperial College tervezett és épített. Ez a magas frekvenciájú szeizmikus jeleket érzékeli ugyanolyan elv alapján, ahogy az okostelefonok tudják, hogy merre van felfelé. Ez a szenzor kevésbé érzékeny a legalacsonyabb frekvenciákra, de cserébe könnyű és robusztus.

2.4 InSight: A NASA felfedező küldetésű űrhajója

- Eredeti kilövési ablak: 2016. március. 4. és 30. között volt
- Eredeti landolási időpont: 2016. szeptember. 28.
- A küldetés költségvetése 425000000 \$, a leszálló egység tömege 350 kg.

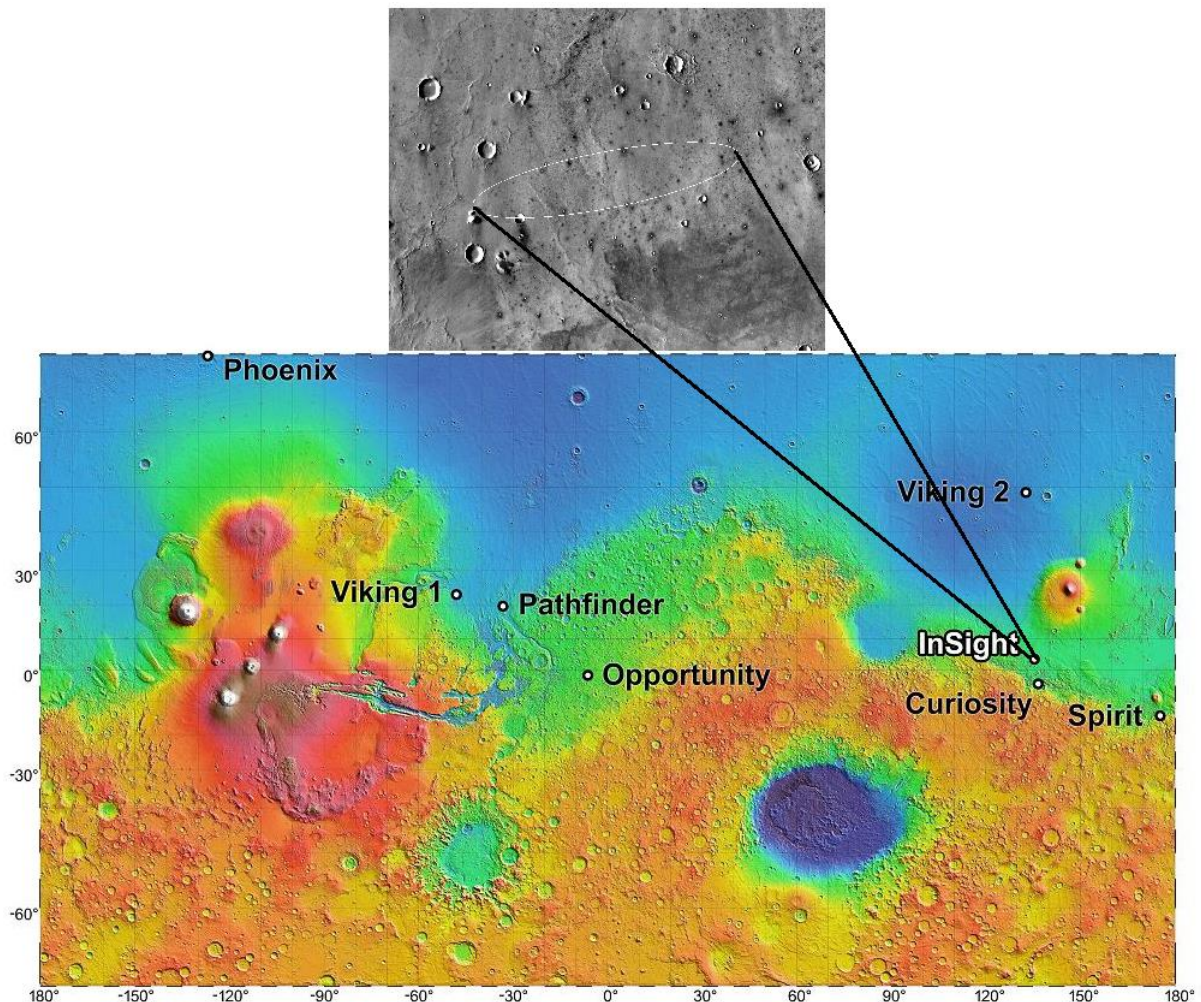
A kilövést 2016-ban műszaki hiba miatt törölték. Hibás volt a hajó vákuum védelme, ami érintette a SEIS hosszú periódusú érzékelőjét is. A Föld és a Mars pályája miatt a következő rendelkezésre álló kilövési ablak 2018-ban volt és május 5-én sikeresen el is indult a misszió.

A leszállási ellipszist, amelynek nagytengelye 130 km, kistengelye 27 km, egy viszonylag sík, nagy kráterek nélkül terepen jelölték ki, ahol a felszíni kőzet elég puha ahhoz, hogy a robotkar képes legyen a hőszondát a talajba beásni. Annak érdekében, hogy az ejtőernyők működjenek, a leszállóhelynek egy viszonylag alacsonyan fekvő területen, és hogy a napelemek elegendő energiát kapjanak, az egyenlítő közelében kell lennie.

A leszállás várhatóan az Elysium Planitia régió sík, északi részén történik, melyet a 10. ábrán a kinagyított részen látható ellipszis jelöl. Az ellipszis középpontja az északi szélesség 4° és keleti hosszúság 136° -án van. A térképen a korábbi Mars-expedíciók leszállási helyei is láthatók.

Képek forrása: <https://www.nasa.gov/jpl/insight/pia19143>

<https://spacenews.com/37139nasa-studying-4-landing-site-options-for-2016-mars-mission/>



10. ábra. Az egyenlítő mentén tervezik a leszállást, várhatóan 2018. november 26-án lesz

2.5 A Mars felépítése

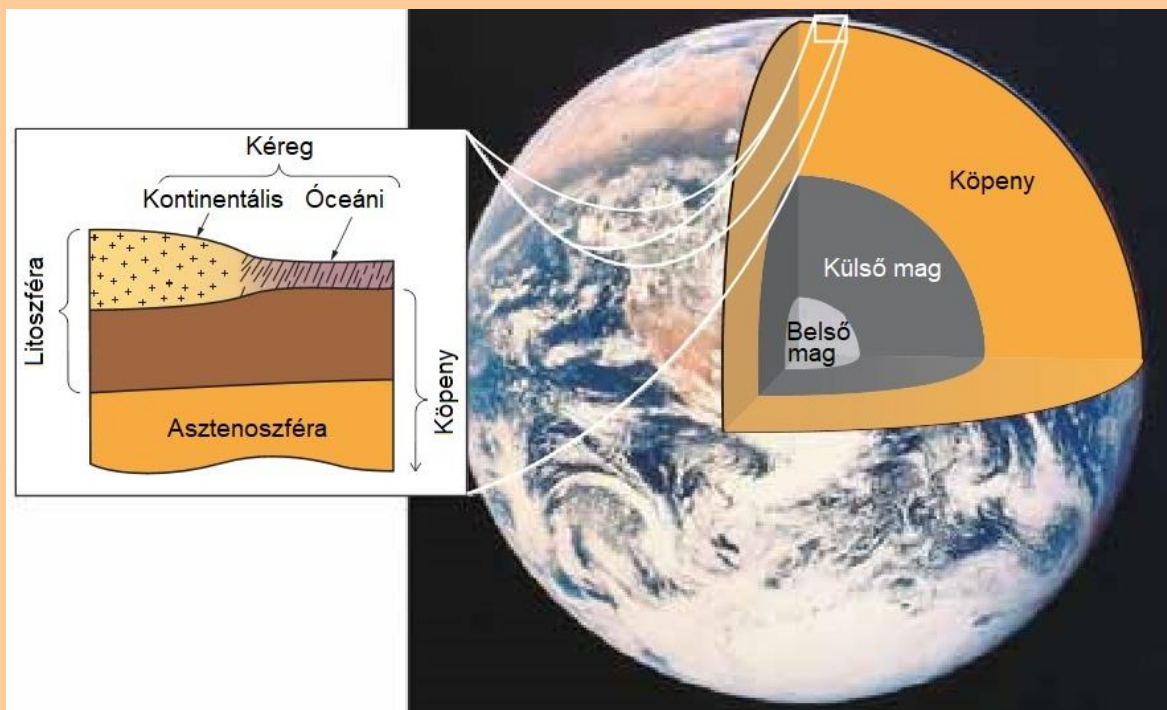
A tudósok még vitatkoznak azon, hogy miért nem tapasztalható a Marson lemeztectonika. Talán a folyékony víz jelenléte a felszínen lényeges feltétele a lemeztectonikának? Esetleg a Marsnak nagyobb a fajlagos felület/térfogat aránya, és emiatt egyszerűen túl gyorsan hűlt le?

2.5.1 A lemeztectonika és a Mars

Lemeztectonika szabályozza a Föld felszínének alakját és tulajdonságait, az óceáni medencéktől kezdve a hegyvonulatokig. A földfelszín mozgásainak is a lemeztectonika az oka, amely egy sor természeti veszélyt okoz, úgy mint földrengéseket és vulkánkitöréseket. A lemeztectonika a fő mechanizmus, amelyen keresztül a Föld elveszíti belső eredetű hőjét. Azonban lemeztectonika csak a Földön figyelhető meg! Ez rejtélyes. Miért csak a Földön fordul elő lemeztectonika? Ennek hiányában a többi Föld-típusú bolygó hogyan veszíti el belső hőjét? Ezek nagy kérdések a Föld és a többi bolygó kutatása során. Az alábbiakban – összehasonlítva a Mars bolygót a Földdel – röviden bemutatjuk azokat a folyamatokat, amelyek során a Föld-típusú bolygók hőt veszítenek, valamint a lemeztectonikával kapcsolatos jelenlegi ismereteinket.

2.5.2 A Föld-típusú bolygók szerkezete

A Föld és a Mars egyaránt közelítőleg szabályos, kémiai vagy mechanikai tulajdonságaikban egymástól eltérő rétegekből, gömbhéjakból áll. A középpontból kifelé haladva a Föld például kémiai szempontból egy belső magot tartalmaz, aztán jön a külső mag, a köpeny és a kéreg; mechanikai tulajdonságok szerint pedig a belső és külső mag, az alsó és a felső köpeny, valamint az asztenoszféra és litoszféra következnek. A litoszféra két részből áll: a kéregből és a köpeny merev legfelső részéből, ahol a lemeztectonika történik. Bár ez is szilárd, ellentétben a merev litoszférával, az alatta levő asztenoszféra plasztikus (azaz földtörténeti időskálán folytni tud, a szurokhoz hasonlóan). Ma már tudjuk, hogy a litoszféra és az asztenoszféra viszonylag függetlenek egymástól, eltérően az eredeti elképzelésektől, miszerint a tektonikus lemezek mozgása az asztenoszféra által irányított folyamat. A lemeztectonika a litoszférában történik (11. ábra, © BGS/NERC kép: NASA/JPL-Caltech).



11. ábra. A Föld öves felépítése és a litoszféra

2.5.3 Hogyan hűlnek ki a Föld-típusú bolygók?

A Föld-típusú bolygókról (tehát a Földről és a Marsról is) általában úgy gondolják, hogy már kialakulásukkor forrók voltak, és fokozatosan hűltek le. Sokféle természeti folyamatnak (például vulkáni és tektonikus) maga a hűlés, pontosabban a belső és külső hőmérséklet közötti különbség a hajtóereje. Ezekben a planétákon a hő eredetét két csoportba lehet osztani: elsődleges (primordiális, azaz örökölt) hő, ami a bolygó kialakulását kísérő folyamatok eredménye, illetve a radioaktív bomlás hője. A hő hővezetés (**kondukciónak**), hőáramlás (**konvekciónak**) és hősugárzás révén terjed kifelé a bolygó belsejéből, átadódik a külső rétegeknek és végül sugárzás révén elveszik a világűrben. A bolygó különböző rétegeiben és a rétegek határain a hőveszteség különböző módjai dominálnak. A becslések szerint a Föld évente $4,2 \times 10^{13}$ W, vagyis 42 TW hőt veszít: 32 TW áramlik át a litoszférán, és akár 10 TW veszik el az óceáni hátságok közepén hidrotermális tevékenység folytán [1].

Egy bolygó kihűlésének háromféle fázisa lehetséges: **magmaóceán fázis**, **stagnáló lemez fázis** (amikor a litoszféra egyetlen szilárd, merev rétegből áll) és az a fázis, amikor működik a **lemeztektonika**. Függetlenül attól, hogy a bolygó milyen módon veszíti el a belső hőjét, bizonyos fokig az összes bolygó veszít hőenergiát a felszínéről történő hősugárzás révén.

A Föld-típusú bolygókról úgy gondoljuk, hogy kialakulásuk egy rövid életű magma óceán szakasszal kezdődött el. A "magma óceán" kifejezés arra az állapotra utal, amikor a test annyira forró, hogy a felülete részben vagy jórészt olvadt állapotban van, és a belső hő a felületére elsősorban kis léptékű konvekció révén jut. A 12. ábra egy művészi elképzelés a Holdat körülbelül 4,5 milliárd évvel ezelőtt beborító magma óceánról.

(<https://nasaviz.gsfc.nasa.gov/10948>)



12. ábra. Magmaóceán borítja a bolygót élete kezdetén (NASA/JPL-Caltech)

Ha egy test eléggé lehűlt, akkor a felszíne megszilárdul. Az egybefüggő szilárd kéreggel takart bolygókon a belső hő a felszínre kondukciónak, azaz hővezetés révén jut. A szilárd kéreg azonban viszonylag rossz hővezető, a veszteség folyamata lényegesen lelassul. Ha a feltételek megfelelőek, akkor a Föld-típusú bolygókon az egybefüggő kéreg feltöredezik, beindul a lemeztektonika, és a lemezek között felbukkanó láva révén megnő a hőveszteség. Bár elméletileg lehetséges, hogy a Föld-típusú bolygók felváltva hol stagnáló lemezzel bírnak, hol pedig létrejön a lemeztektonika rendszere. Ezt soha sem figyelték még meg, de a megfigyelés hiánya a nagy geológiai időskálával is magyarázható. Végül, amikor eléggé lehűltek a bolygók, a sorsuk az, hogy csak hővezetés révén veszítenek hőt, inaktívak vagy halottak lesznek (azaz hiányzik az erő, ami hajtja az olyan folyamatokat, mint a vulkánosság és tektonika).

2.5.4 Milyen feltételek szükségesek a lemeztektonika létrejöttéhez?

Ezt a kérdést úgy lehet elképzelni, mint a mesebeli kislány Boglárka problémáját, aki mindent a körülményekhez képest optimalizál. (A *gyermek története a "Boglárka és a három medve"* című mesében olvasható. *Boglárka háromféle lehetőség közül mindig a "közepeset" választja, pl. az*

ágy, "ez túl nagy, ez túl puha, ez a legjobb" így ez utóbbiban aludt. Ugyanaz történt a kásával: hideg/meleg kása és egyéb dolgok, amiket talált a medve házában. A gyermek a "közepet" választotta, miután kipróbálta a szélsőségeket). Először is, a planéta anyagának kellően le kell hűlnie, hogy már túl hideg legyen a magmaóceán fenntartásához. Másrészt pedig elegendő belső hővel kell rendelkeznie, hogy meggátolja a stagnáló lemez kialakulását, azaz elegendő hő legyen, ami fenntartja a konvekciót a felső rétegek között. Harmadszor, a litoszférának elég hidegnek, sűrűnek és erősnek, valamint elég vékonynak kell lennie ahhoz, hogy a másik, erősebb lemez alá tudjon bukni. Ezt nevezik **szubdukciónak**. Végül talán a legfontosabb összetevő a sikeres lemeztectonika működéséhez a folyékony víz jelenléte, amely könnyen hozzáférhető a Földön, de nem úgy a többi Föld-típusú bolygón. Ez is egy Boglárka probléma: a Föld éppen a megfelelő távolságra van a Naptól, hogy felületi hőmérséklete 0 és 100 °C között legyen, és ezért egy stabil környezet jön létre a folyékony víz számára. Az eddigi ismereteink szerint a lemeztectonika számára szükséges összes feltétel csak a Földön van meg egyszerre.

2.5.5 Van-e bizonyíték a lemeztectonikára más bolygókon?

Nincs egyértelmű bizonyíték arra, hogy lenne lemeztectonika bármely más bolygón. [2] A Mars, bár van víz rajta (többnyire jég formájában), lényegesen kisebb, mint a Föld. A Marson megfigyelhető egyes felszíni formák arra utalnak, hogy a múltban a lemeztectonika ott is működött. Például egyes mágneses mintázatok (amit pl. a Mars Global Surveyor űrszonda megfigyelt) arra utalnak. Azonban más felszíni jellemzőket úgy értelmeznek, hogy lemeztectonika egyáltalán nem működött a Marson. Egyes vulkánok hatalmas mérete, mint például az Olympus Mons azt jelezheti, hogy a marskéreg hosszú ideig stacionárius maradt a magma felett. A Földön a tektonikus lemezeknek a magmaforrások feletti elmozdulása viszonylag kis vulkánokat eredményez, a felszínen sorban többet egymás mellett (pl. Hawaii-szigetek vulkáni lánc). Végeredményben nincs bizonyítékunk arra nézve, hogy bolygó-méretű lemeztectonika bármikor is működött a Marson.

2.5.6 Van-e kapcsolat a lemeztectonika, a kontinensek és az élet között?

Sok rejtélyes dolog merül fel a lemeztectonikával kapcsolatban, amivel csak most kezdünk foglalkozni. Például a Föld nemcsak abban egyedülálló, hogy rendelkezik lemeztectonikával, hanem abban is, hogy rendelkezik kontinensekkel, és van élet rajta. Ezek vajon összefüggnek? Nincs egyértelmű konszenzus ezekben a kérdésekben, ahogy még azt sem teljesen értjük, hogy hogyan jött létre a kontinentális kéreg. Azt sem tudjuk, hogy lehetséges lenne-e egy olyan világ, ahol van lemeztectonika, de nincsenek kontinensek, vagy fordítva, van-e olyan világ, ahol kialakultak a kontinensek, de nincs rajta lemeztectonika. A lemeztectonika és az élet kapcsolata még talányosabb, és ez jelenleg a tyúk és a tojás problémája: van-e szükségünk lemeztectonikára annak érdekében, hogy lehessen a földön élet, vagy kell az élet ahhoz, hogy legyen lemeztectonika a Földön? Természetesen ezek spekulatív kérdések, több elemes puzzle kirakásával foglalkozunk, ami nagyon izgalmas!

Hogyan és mikor indult el a lemeztectonika Földön? Ez az a kérdés, amit valószínűleg a közeljövőben képesek leszünk megválaszolni. Azt reméljük, hogy az InSight küldetés olyan adatokat nyújt majd, amik alapján meg tudjuk érteni, hogyan vesztette el a Mars a belső hőjét, és miért nem alakult ki rajta lemeztectonika. Ha megértjük, hogy miért nincs lemeztectonika a Marson, akkor az segít megérteni, hogy hogyan kezdődött el a Földön.

Ez a fejezet egy rövidített változata a "Miért csak a Földön fordul elő a lemeztectonika?" Martin, P. et al., 2008-ban a Physics Education szaklapban megjelent cikkének. ([http://iopscience.iop.org/cikk/10,1088/0031-9120/43/2/002 / pdf](http://iopscience.iop.org/cikk/10,1088/0031-9120/43/2/002/pdf))

Hivatkozások:

1. Anderson, D. L. (2007) *New Theory of the Earth*, Cambridge University Press, Cambridge, DOI: 10.2277/0521849594.
2. Beatty, J. K., Petersen, C., and Chaikin, A. (1999) *The New Solar System*, 4th edition, Cambridge University Press.

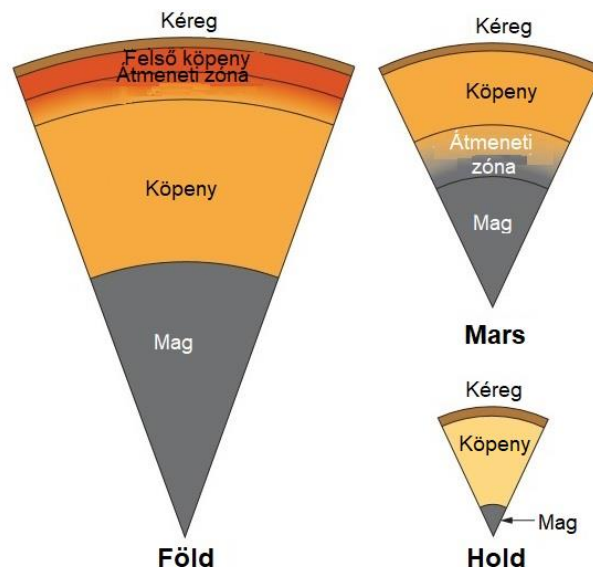
2.6 Az átmeneti zóna és a köpeny geokémiája

Föld és a Mars anyagösszetétele hasonló (ugyanolyan, mint a Naprendszer primitív meteoroidjaié), azonban a korábban homogén olvadt gömb alakú égitestek a „**differentiálódás**” folyamatán estek át. Ez azt jelenti, hogy a lehűlés során a különböző elemek különböző sebességgel szilárdultak meg és a sűrűbb fémes komponensek (főleg vas és nikkel) lesüllyedtek és egy magot alkottak. A könnyebb szilikát komponensekből pedig létrejött a köpeny és a kéreg. A köpeny anyagát többnyire olyan ásványok alkotják, amelyek tartalmaznak oxigént, magnéziumot, szilíciumot, vasat, kalciumot és alumíniumot. Ezek az elemek együttesen különböző ásványi anyagokat és kőzeteket alkotnak.

Azonban ugyanaz az ásvány létezhet többféle fizikai szerkezetben attól függően, hogyan történt benne az atomok összekapcsolódása. Ezeket a különböző szerkezeti elrendezésű (kristályrácsú), de ugyanolyan elemösszetételű kőzeteket „**polimorf**”-oknak vagy „**fázis**”-oknak nevezzük. Egy nagyon jól ismert anyag a szén, ami jól mutatja a polimorfizmus lényegét, hiszen előfordul például grafit vagy akár gyémánt formájában is. A köpeny belsejében az ásványi anyagok különböző polimorfokban fordulnak elő attól a nyomás és hőmérséklet értéktől függően, amelyen kialakultak.

A Földköpenyben kialakult egy ún. „**átmeneti zóna**” a körülbelül 410 km és 1000 km közötti mélységben, ahol az ásványi olivin (peridotitot alkotva) átalakul szorosabb (és sűrűbb) szerkezetű ásvánnyá, azaz perovszkit lesz belőle. A fázishatárok kimutatható változásokat okoznak a szeizmikus hullámok terjedési sebességében. A Mars esetében azt várjuk, hogy ezek a fázisváltások a köpenyben a maghoz sokkal közelebb fognak megtörténni, mint a Földön. Vajon képesek leszünk-e felismerni ezt a jelenséget a szeizmikus adatokból? Ez is a misszió egyik célkitűzése!

A Mars ugyanazt az alapvető belső struktúrát mutatja, mint a Föld és más Föld-típusú (kőzet) bolygók. A bolygó elég nagy ahhoz, hogy a nyomás a köpenyben hasonló legyen, mint ami a Föld egész felső köpenyében uralkodik, és a magja is hasonló arányú tömeget képvisel. A 13. ábra a két bolygó metszetét mutatja és azt, hogy a növekvő nyomás hol tud bizonyos ásványi anyagokat úgy átalakítani, hogy azoknak nagyobb sűrűségű kristályszerkezete jöjjön létre. (Összehasonlításként a Hold esetében a nyomás annak még a középpontjának közelében is alig éri el azt az értéket ami a földkéreg alatt uralkodik, és csak egy apró, szinte elhanyagolható magja van.) A Mars mérete arra utal, hogy meg kellett benne történnie azoknak a differentiálódási és kristályosodási folyamatoknak, amelyek a földkérget és annak magját kialakították a Föld keletkezésének korai szakaszában. (A képek nem méretarányosak)



13. ábra. A Föld a Mars és a Hold belső öveinek összehasonlítása (© BGS/NERC)

2.7 Milyen szeizmikus források lehetnek a Marson?

A Mars szeizmitásának erősségét eddig műholdképek alapján becsülték meg, ami a felszíni vetők és becsapódási kráterek felmérésén alapult. Ezen kívül a Föld és a Hold ismert szeizmitásából is következtek a Mars aktivitására.

2.8 Vetők

A Mars felszínén felületi, és mélyen a kéregbe hatoló vetők is láthatók. Az ilyen vetők létrejöttéhez az energiát vagy a bolygó hűlése és zsugorodása, esetleg a mélyben levő magma mozgása adja. A 14. ábrán egy becsapódási kráter látható. Átmérője körülbelül 6,2 km, és vetők sorozata (lineáris elemek) metszi keresztül. Ezek a vetők lecsökkentették a becsapódási kráter peremének magasságát.

(http://www.uahirise.org/ESP_017900_218).



14. ábra. Egy marsi kráter vetőkkel

2.8.1 Árapály erők okozta mozgások

A Mars körül keringő egyik hold, a Phobos egy nagyon alacsony frekvenciájú, körülbelül nyolc óra periódusidejű „árapály” mozgást okoz a Mars felszínén. A hosszú periódusú SEIS érzékelő eszköznek elég érzékenynek kell lennie ahhoz, hogy mérje ezt az árapálymozgást és kimutatható legyen a több mint egy évig (esetleg 2 évig) tartó méréseinek kiértékelése után.



15. ábra. A Phobos szabálytalan alakú

A Phobos és a Mars másik holdja a Deimos több okból is nagyon érdekes. Mindkét égitest kicsi, átlagos átmérőjük mindössze 22 és 12 km. A Naprendszer nagyobb holdjaival és a bolygókkal szemben szabálytalan alakúak. Ennél a méretnél ugyanis a gravitációs erő (ami esetünkben a Földének kevesebb mint 1/1000-e), már nem elegendő arra, hogy ezeket a kis holdakat gömbölyű alakra húzza össze (15. ábra).

NASA/JPL/

<http://www.uahirise.org/phobos.php>

2.8.2 Léggöri hatások

A Marson a porviharok is szóba jöhetnek mint olyan energiaforrás, ami szeizmikus rezgéseket okozhat a talajban. Ez a közelkép (16. ábra) egy porfelhőt mutat a Marson.

Kép: NASA / JPL-Caltech
<http://photojournal.jpl.nasa.gov/katalogus/PIA15959>



16. ábra. A szél hatása a Marson

2.8.3 Meteorit-becsapódások

A Mars krátereit megfigyelve lehetővé válik, hogy egy ésszerű becslést tegyünk arra, hogy hány új meteorit-becsapódást várhatunk évente. A Mars körül keringő műholdak képein rendszeresen felfedeznek új meteorkrátereket. A 17. ábra ugyanazt a Mars felszínt mutatja két egymást követő időpontban. A frissebb felvételen egy újabb kráter látszik!

Kép: http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mro20090924.html

NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science System)

A NASA Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) egység Context Kamera (CTX) felvételén a feldolgozó csapat gyakran fedez fel új sötét foltokat a Marson, amit ha jobban megvizsgálnak kiderül, hogy az egy új becsapódási kráter. Néha csak egy krátert találnak, de gyakran egy egész sorozat új kráter látható a képeken. A minták és a méretek alapján rajként (klastertként)

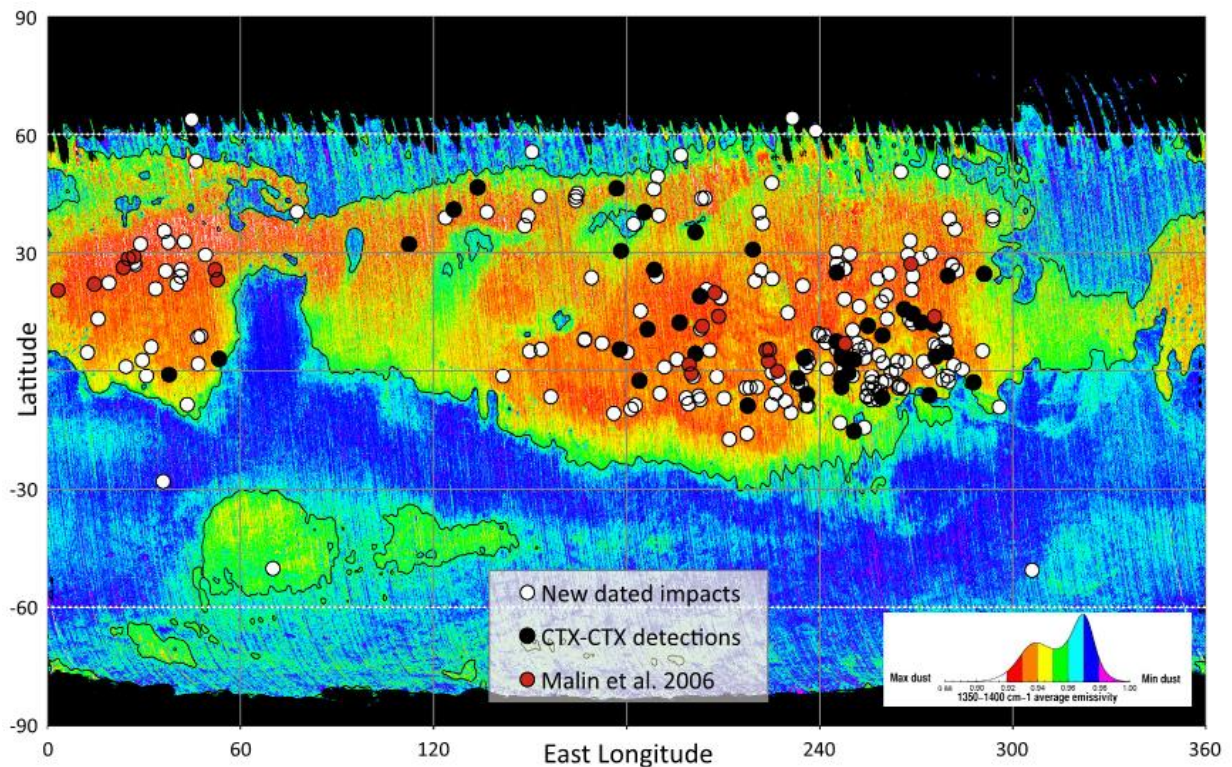


értelmezhetőek egyes kráterek, jelezve, hogy a bejövő meteoroid széttöredezett már mielőtt becsapódott a felszínre. Bizonyos esetekben a kráterrajok keletkezhetnek más, nagyobb becsapódási kráterből történő anyagkirobbanás visszatérése során is. Az új krátereket katalogizálják (18. ábra).

http://www.lpl.arizona.edu/~shane/publications/daubar_etal_icarus_2013.pdf



17. ábra. Új kráter látszik!

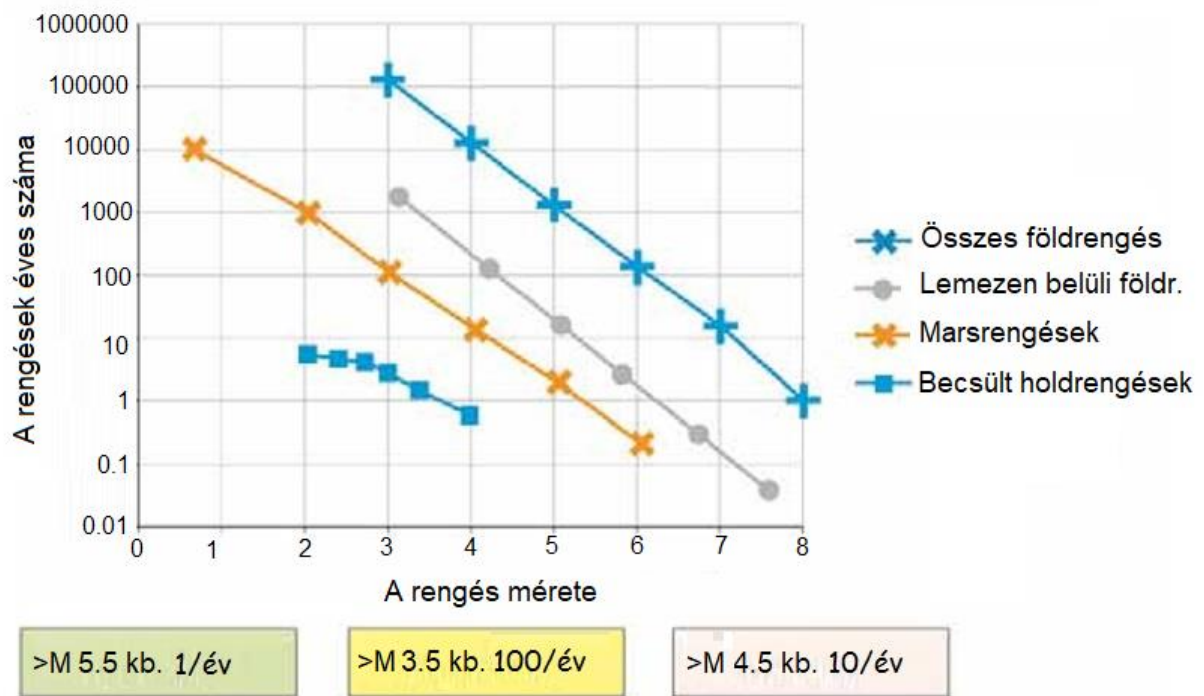


18. ábra. 2013-ban 213 új becsapódást rögzítettek a Marson

2.8.4 Marsrengések

A marsrengéseket a vetődések hozzák létre, (akár felszíniek vagy felszín alattiak) amik várhatóan olyan gyakran fordulnak elő a Marson, mint amennyi a sekély holdrengések és a Föld kőzetlemezeinek belső részén kipattant földrengések gyakorisága között lehet (19. ábra). (A Földön a földrengések leggyakrabban a lemezek határain fordulnak elő.)





19. ábra. A „földrengések” átlagos száma évente az esemény magnitúdója függvényében (© BGS/NERC)

3 Becsapódások és szeizmikus hullámok: matematikai és fizikai háttér

Egyszerűen fogalmazva a hullámmozgás az energia tovaterjedésének az anyag haladása nélküli módja. Egy rezgés vagy zavar a közegen áthaladva eljut tehát egyik helyről a másikra. Léteznek nem mechanikai hullámok is, úgymint az elektromágneses (ilyen a fény) és a gravitációs hullámok, melyek esetében nincs szükség közvetítő közegre. Ezekben az esetekben sugárzásról beszélünk. A továbbiakban csak a mechanikai hullámokkal foglalkozunk.

A hullámmozgást legkönnyebben talán egy spirálrugó segítségével tanulmányozhatjuk (20. és 21. ábra). Ha a kifeszített rugó egyik végén zavart keltünk, akkor létre tudunk rajt hozni hullámokat, amelyek végig haladnak a rugó mentén. Ha a rugó egyik végét ide-oda mozgatjuk, akkor amint az első hurok elmozdul, az magával húzza a következő hurkot, ami követve az előző mozgását, maga után húzza az azt követő hurkot, amit követ az azutánit, és a hullám így tovahalad a rugó mentén.

Ha gondosan megnézzük a rugó egy-egy karikáját akkor láthatjuk, hogy az először kissé elmozdul a nyugalmi helyzetéből, majd esetleg egy ellenkező irányú kitérés után visszatér oda. Miközben az energia keresztülhalad a rugón, a rugó egyik eleme sem mozdul el véglegesen a kiindulási helyéről, hanem a körül kis kitérésű rezgőmozgást végez. Ahogy az energia tovahalad, a rugónak mindig más és más részei jönnek mozgásba. Az energia ilyen módon történő terjedését nevezzük hullámmozgásnak.

3.1 A hullámok típusai

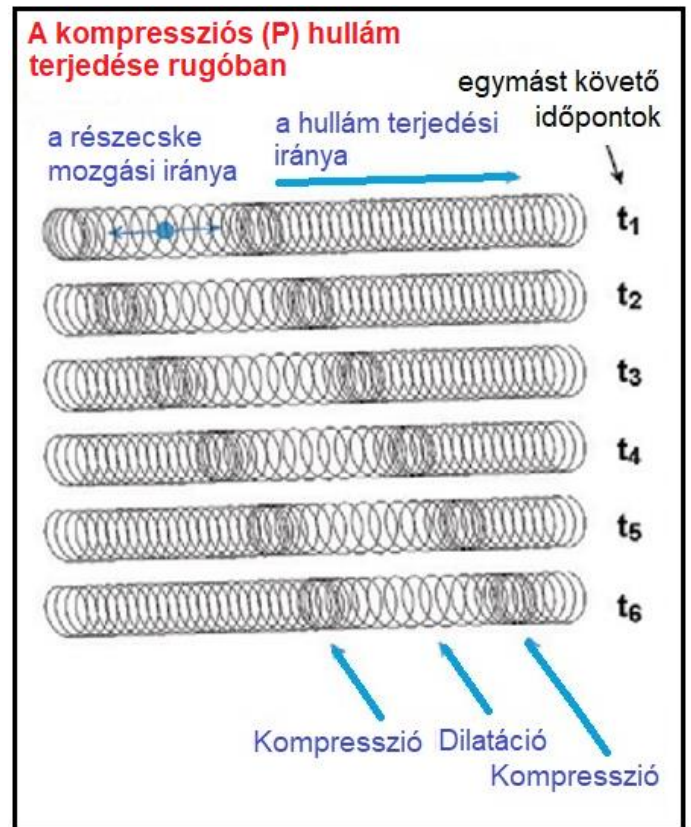
A mechanikai hullámoknak alapvetően két fő típusát különböztetjük meg aszerint, hogy a közeg részecskéinek oszcillációja (rezgése) a hullám terjedési irányába, vagy arra merőlegesen történik-e. A finomabb részletek vizsgálatához viszont még figyelembe kell vennünk magát a közeget, illetve annak mechanikai tulajdonságait is.

3.1.1 Longitudinális hullámok

A longitudinális hullámokban a közeg részecskéi ugyanabban az irányban oszcillálnak, mint amilyen irányban terjed maga a hullám. Ezek az ún. kompressziós, nyomás vagy hanghullámok, melyeket P betűvel (Pressure) szokás jelölni (20. ábra). A longitudinális hullámok ugyan különböző sebességgel, de bármilyen halmazállapotú közegben tudnak terjedni, mivel minden közeg, legyen az szilárd, folyadék vagy gáz, egy kissé összenyomható,

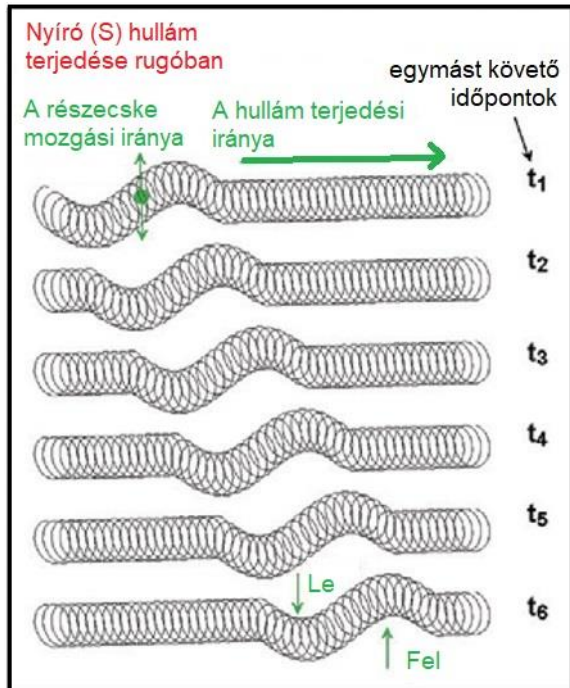
(Különleges esetet képviselnek a gravitációs hullámok, melyek nem valamilyen mechanikai közegnek, hanem magának a téridőnek a deformációjaként jönnek létre.)

(©, 2001–2006 L Braile)



20. ábra. A P-hullám

3.1.2 Transzverzális hullámok



A transzverzális hullámokban a közeg részecskéi a hullám terjedési irányára merőleges síkban rezegnek (21. ábra). Ezek a hullámok csak olyan közegben terjedhetnek, amelyben nyírófeszültség tud kialakulni. Ilyenek alapvetően a szilárd testek és a nagy viszkozitású folyadékok. (Gravitációs térben folyadékok felszínén is létrejöhetnek transzverzális hullámok, de itt a visszatérítő erőt nem a nyírófeszültség, hanem a részecskék súlya hozza létre.)

A transzverzális hullámok jellemző tulajdonsága a polarizációs állapotuk, ami lehet lineáris, elliptikus, vagy cirkuláris. A transzverzális hullámok jelölésére az S betűt (Shear) használják.

(Különleges esetet képvisel a fény, mint elektromágneses hullám, amely bár transzverzális hullám, a terjedéséhez mechanikai közeget nem igényel. Az elektromágneses hullámban ez elektromos és mágneses mezők oszcillálnak.)

© 2001–2006 L BRAILE

21. ábra. Az S-hullám

3.2 A szeizmikus hullámok

Amikor egy földrengés vagy egy meteorit-bechapódás történik, akkor hatalmas mennyiségű energia szabadul fel. Ennek az energiának egy része a kőzetrétegeken keresztül tovaterjed szeizmikus hullámok formájában.

Azokat a hullámokat, amelyek a bolygó felszínéhez kötöten haladnak **felületi hullámoknak**, és azokat, amelyek keresztülutaznak a bolygó testén **térhullámoknak** nevezzük.

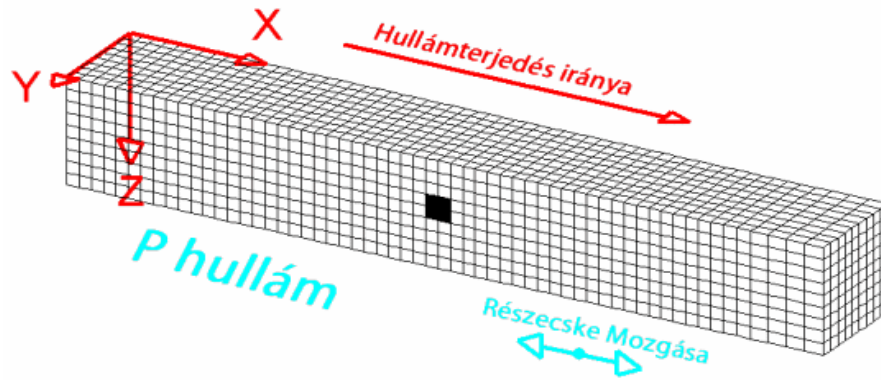
3.2.1 Térhullámok

A földrengések, illetve a vizsgálatunk tárgyát képező marsrengések P- azaz elsődleges (Primary) és S- azaz másodlagos (Secondary) hullámokat fognak gerjeszteni⁴.

3.2.1.1 A P-hullám

A P-hullám egy **longitudinális hullám**: olyan, mint ami akkor keletkezik, amikor a spirálrugó elejét a 20. ábrán látható módon meglökjük. A P-hullám a leggyorsabban terjedő, így elsőként beérkező szeizmikus hullám, ezért a földrengést vagy meteorit-bechapódást követően ezt érzékeljük legelőször. Olyan, mint a hanghullám, ami a talajban terjed. A P-hullámok szilárd anyagokban, mint a Föld kérge és köpenye valamint a folyadékokban, mint a Föld külső magja is képesek terjedni (22. ábra).

⁴ A szeizmológiában használatos P és S jelölések összhangban vannak a korábban említett nyomás (P - Pressure) és nyírás (S - Shear) jelölésekkel.

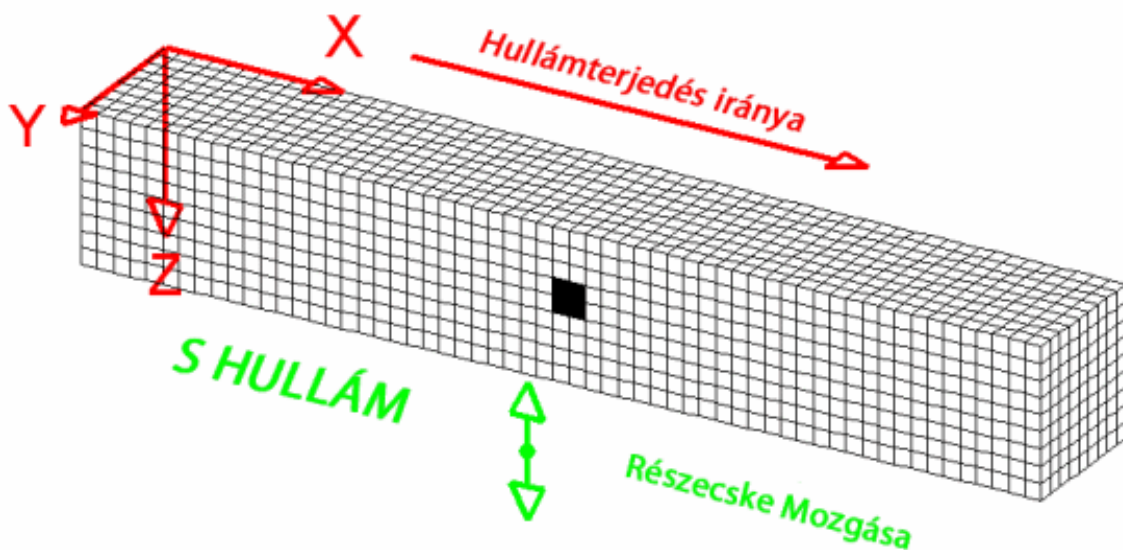


22. ábra. A P-hullám terjedése

3.2.1.2 Az S-hullám

Az S-hullám **transzverzális hullám**: olyan, mint az a hullám, amit akkor kapunk, amikor a kinyújtott spirálrugó elejét oldalirányban lökjük meg. Az S-hullámokban a részecskék a hullám terjedési irányára merőleges síkban rezegnek, ami lehet függőleges vagy vízszintes sík, vagy ezek kombinációja. Az S-hullámok csak szilárd közegben képesek terjedni, mint pl. a Föld kérgé és köpenye ideális folyadékokban nem terjednek, mert azokban nem ébrednek nyíróerők (23. ábra).

A P- és S-hullámok energiáját összehasonlítva a tudósok képesek megmondani, hogy földrengés vagy robban(t)ás történt-e — a robbantások sokkal erősebb P-hullámot gerjesztenek. A Földön ez egy hasznos módszer az atombomba-kísérletek felügyeletére, a Marson pedig segíteni fog megkülönböztetni a marsrengéseket a meteorit-becsapódásoktól; ez utóbbiakat ugyanis felszíni robbanásoknak tekinthetjük.



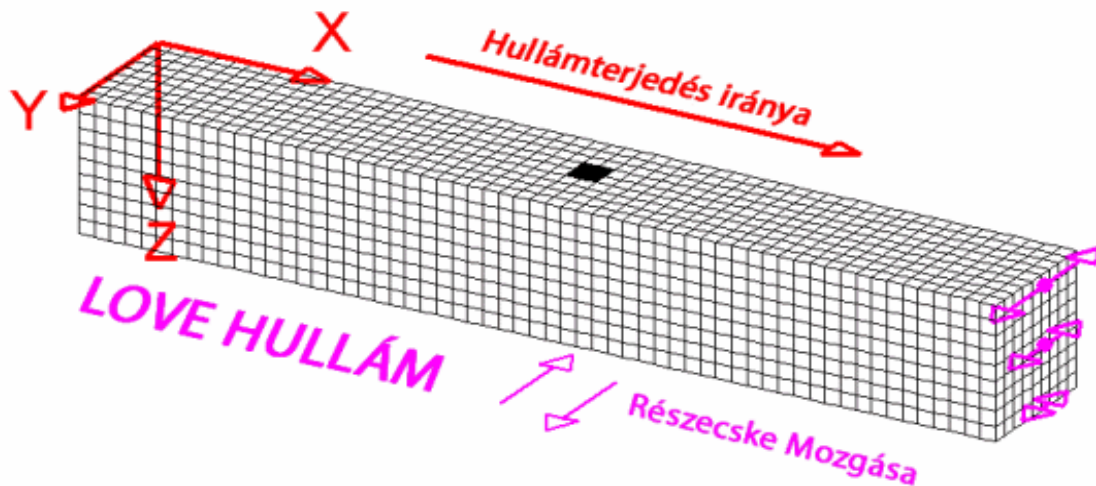
23. ábra. Az S-hullám terjedése

3.2.2 Felületi hullámok

A felületi hullámok akkor jönnek létre, amikor P- és S- hullámok egy mélyfészki rengésből kiindulva elérik a felszínt, és megtörnek, vagy visszaverődnek a felszínhez közeli rétegekben. Két típusa ismert; **Love-hullám** és **Rayleigh-hullám**.

3.2.2.1 Love-hullám

A Love hullám olyan átlós hullám, ami a bolygó felszíne mentén terjed. A részecskemozgás itt a horizontális síkban történik, ami merőleges a hullám terjedési irányára. Az oszcilláció amplitúdója a mélységgel csökken (24. ábra).

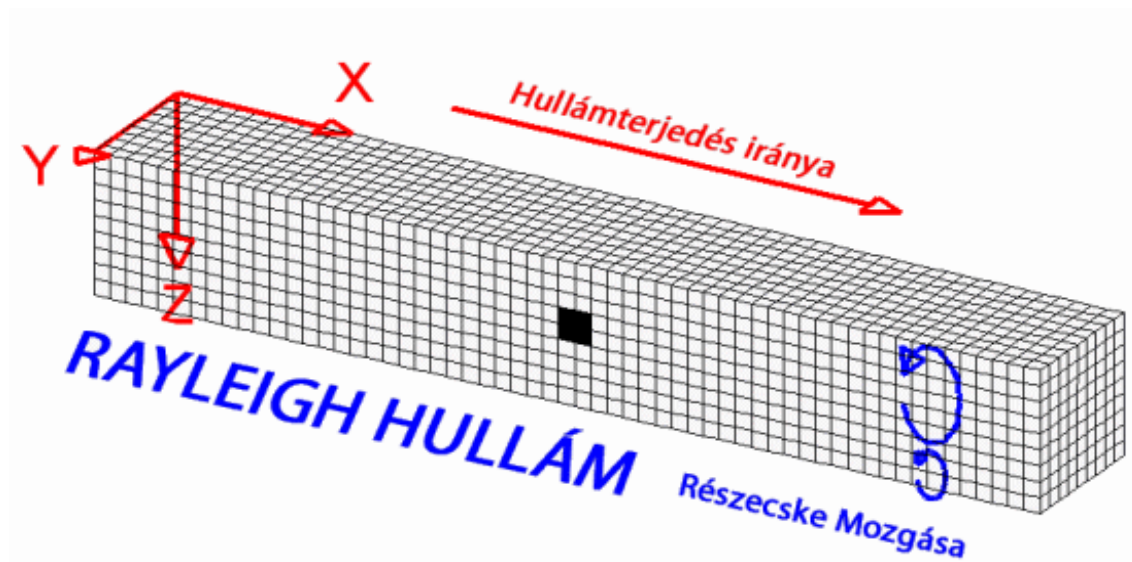


24. ábra. A Love-hullám

3.2.2.2 Rayleigh-hullám

A Rayleigh-hullám a vízhullámokhoz hasonló. A részecskemozgás komplex, egy ellipszis alakú pálya mentén történik. Az oszcilláció amplitúdója a Love-hullámhoz hasonlóan a mélységgel csökken (25. ábra).

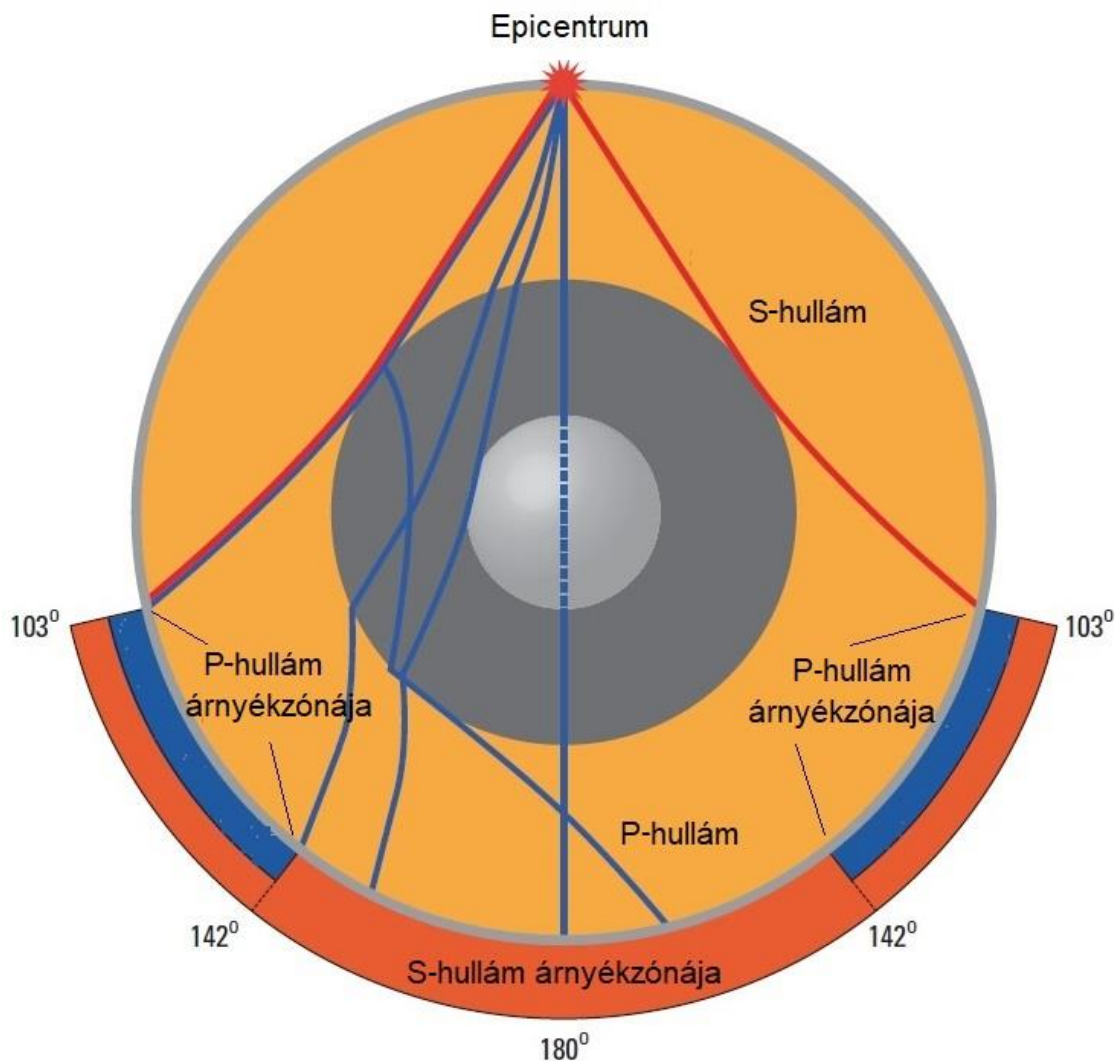
A felületi hullámoknak igen alacsony frekvenciájúak is lehetnek (néhány mHz). Ezek az igen alacsony frekvenciás hullámok hatalmas távolságokat utazhatnak be anélkül, hogy lényegesen gyengülnének, és néha az is megfigyelhető, hogy egy nagy rengés után többször is körbejárják a bolygót.



25. ábra. A Rayleigh-hullám

3.3 Mit árulnak el a szeizmikus hullámok egy bolygó szerkezetéről?

Mint minden hullám, a szeizmikus hullámok is visszaverődhetnek és megtörhetnek. A szeizmikus hullámok visszaverődési, illetve törési szögének valamint intenzitásának vizsgálata teszi számunkra lehetővé, hogy a bolygó belsejében levő anyag sűrűségéről és szerkezetéről információt kapjunk. Példaként itt a Föld! A Föld belső szerkezetét is a szeizmikus hullámok tanulmányozásával ismertük meg (26. ábra).



26. ábra. A P- és S-hullámok sugárútjai a Föld metszetében

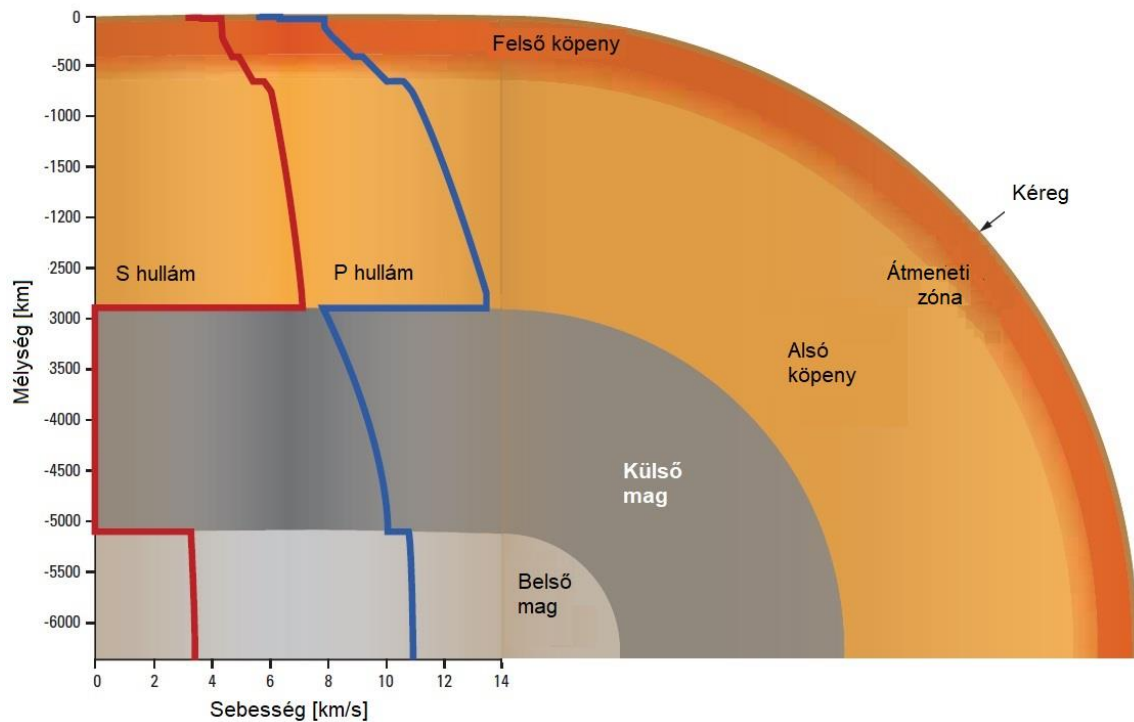
3.3.1 A P-hullám refrakciója

A P-hullámok keresztülhaladnak a földköpenyen, ami rövid időtartamú erőhatásra szilárd anyagként viselkedik, és áthatolnak a folyékony magon is. Ahogy a köpenyben a nyomás a mélységgel növekszik, úgy nő a P-hullámok terjedési sebessége, és görbült sugárút alakul ki. Szűk határrétegeken pedig, mint a köpeny-mag határon a folyékony magba lépve a P-hullám sebessége hirtelen lecsökken, ami ahhoz vezet, hogy a Föld felszínén van egy terület, ahova nem érkeznek be közvetlenül P-hullámok – az eseménytől 103°-142° távolságban egy árnyékszóna jön létre.

3.3.2 Az S-hullám árnyékszónája

Az S-hullámok csak szilárd anyagokban terjednek, mint a pl. Föld kérgé és köpenye. A 103°-nál nagyobb távolságokban árnyékszóna alakul ki, ahova az epicentrumtól, azaz a földrengés kipattanási helyéről nem érkeznek be S-hullámok. Valójában a Föld folyékony magjának a méretét és összetételét eredetileg úgy felfedezték fel, hogy elemezték az árnyékszóna elhelyezkedését (26. ábra).

A 27. ábra a P- és S-hullámok sebességviszonyait mutatja Föld belsejének. A szeizmikus hullámok sebessége a mélységgel növekszik. A P-hullám sebessége a köpeny-mag határon egy éles csökkenést mutat. Az S-hullámok a folyékony külső magban nem terjednek (nulla a sebessége).



27. ábra. Módosított IASP91 Referencia Föld Modell (© BGS/NERC)

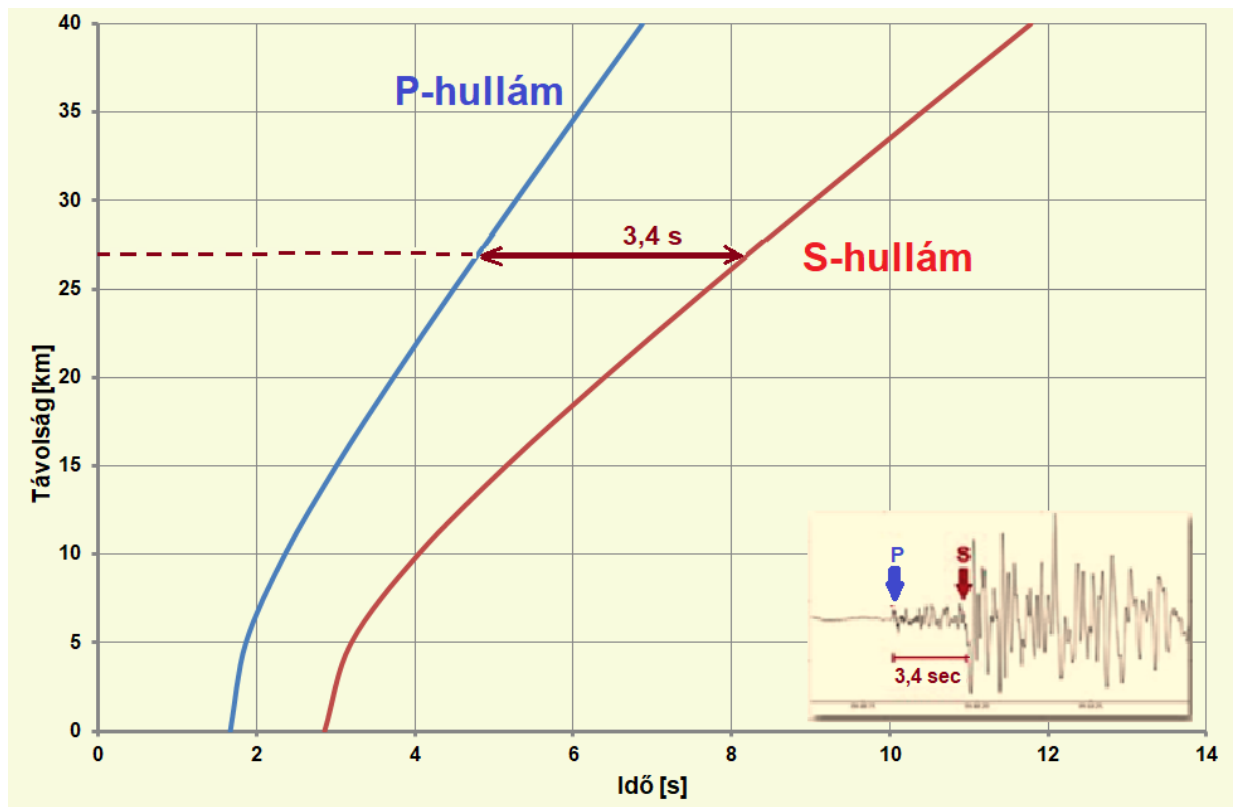
3.4 Hogyan és mit fogunk tanulni az InSight küldetés során a szeizmikus eseményekből?

A marsi eseményeket kísérő szeizmikus hullámok iránt nagy az érdeklődés az ezzel foglalkozó kutatók között. A szeizmométerek és a gyorsulásmérők mérik a beérkező hullámok irányát és amplitúdóját, a Mars felett keringő (orbitális) egység pedig képeket küld. A képek segítségével képesek leszünk meghatározni a becsapódási események helyét, és így a hullámok gondos elemzésével lassan kezdjük majd megérteni a Mars szerkezetét.

A P- és az S-hullámok közötti sebességkülönbség lehetővé teszi a tudósok számára, hogy megismerjék a Mars belsejét, hasonlóan ahhoz, ahogy a Földön ezt sikerült megtenni.

Míg a P-hullámok terjedési sebessége 5-7 km/s a földkéregben, addig az S-hullámok lassabban 3-4 km/s sebességgel haladnak. Ha a szeizmométertől egy bizonyos távolságban becsapódás történik, akkor ennek hatásaként először a gyorsabb P-hullámokat érzékeli a műszer, ami kisebb amplitúdóval jelenik meg a szeizmogramon. Amikor az S-hullámok is elérik a műszert egy újabb, nagyobb amplitúdójú nyom lesz megfigyelhető. A P-hullámok és S-hullámok eltérő beérkezési ideje és amplitúdója látható a 28. ábrán.

A beérkezési idők közti eltérést fel tudjuk használni arra, hogy kiszámítsuk az esemény szeizmométertől való távolságát. Nagyobb távolság esetén hosszabb idő fog eltelni a két hullámtípus beérkezése között. A 28. ábrán látható grafikon segítségével meghatározhatjuk ezt a távolságot.



28. ábra. A P- és S- hullámok menetideje egy 10 km-re a felszín alatti rengésből kiindulva $v_P=6$ km/s, $v_S=3,5$ km/s

3.4.1 Részecskék mozgása

Csakúgy, ahogy egy tóban keletkezett víz hullámok terjedési irányából kideríthető, hogy merre van a hullámforrás, az eseménytől akár távolabb is meg lehet mondani azt, hogy honnan ered a zavar (29. ábra).

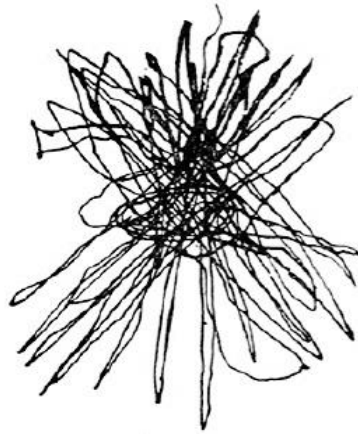


29. ábra. A víz hullámok forrása kideríthető

3.4.1.1 A talajmozdulás iránya

A korai szeizmometerek a talajmozgást egy egyszerű inga segítségével követték, ami nyomot rajzolt. Ugyanezt az elvet használjuk arra, hogy meghatározzuk azt az irányt, ahonnan a szeizmikus hullámok kiindultak (30. ábra.)

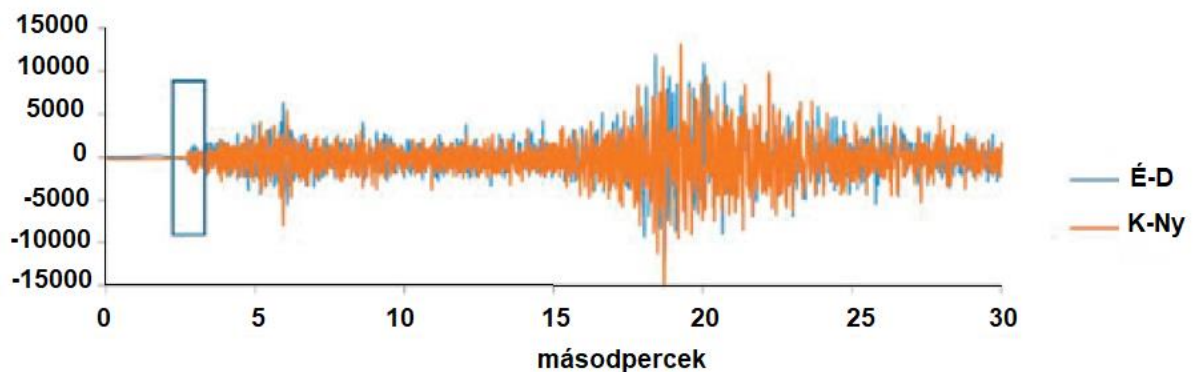
Manapság a szeizmometerek a talajmozgást az idő függvényében három irányban rögzítik: egy függőleges és két vízszintes, általában az észak-déli (É-D) és kelet-nyugati (K-Ny) irányban.



5. 15 .A . M
 April 18, 06.
 Veterans Home, Cal
 Napa Co.

30. ábra. A korai szeizmométerek egyszerű ingák voltak (© BGS / NERC Paul Denton)

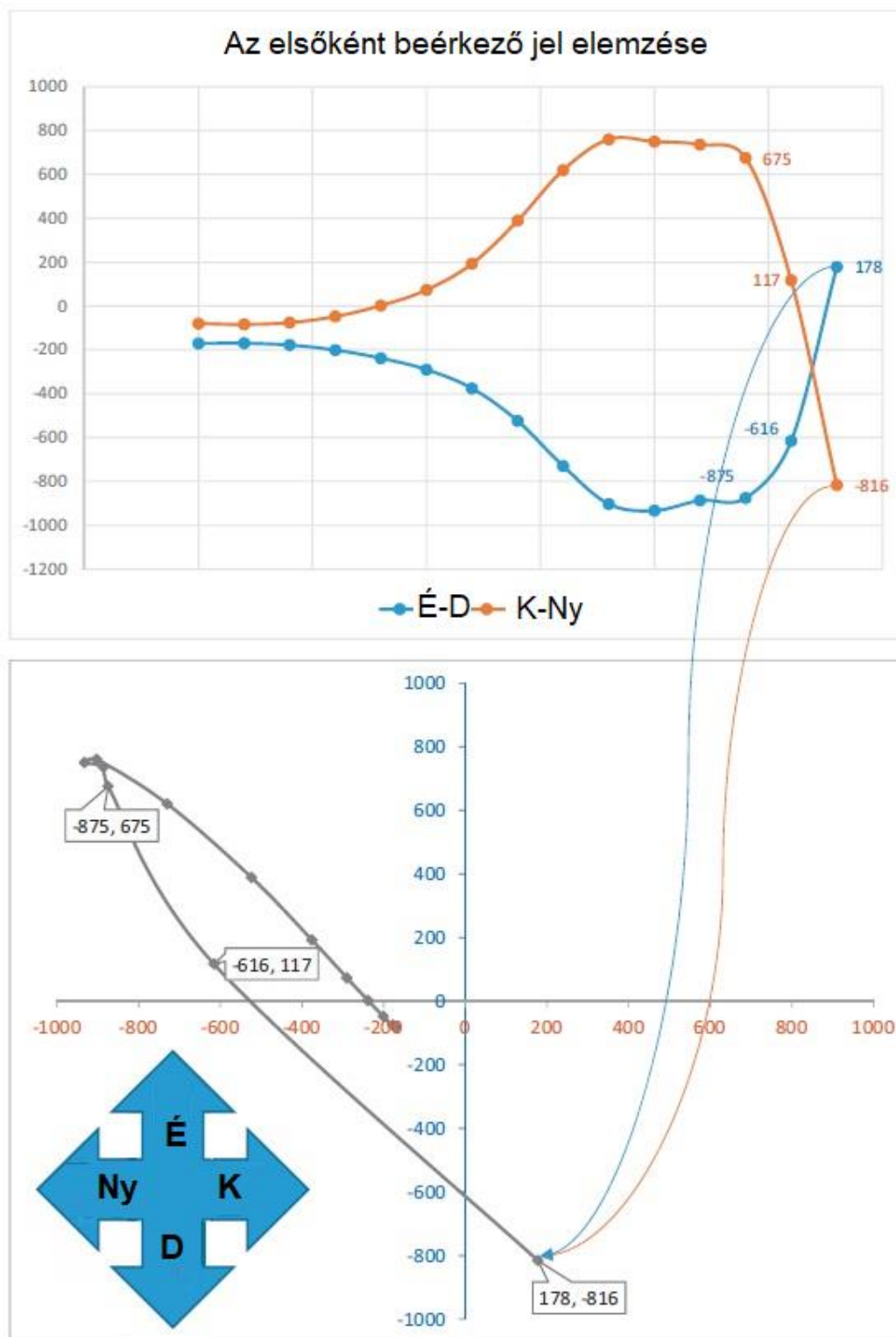
Az alábbi szeizmogram (31. ábra) egy viszonylag kicsi ($M=4,2$), a műszertől 240 km-re kipattant földrengés rögzített talajmozgását mutatja. Az ábrán a két vízszintes komponens az É-D-i és K-Ny-i irányú látható. Az elsőként beérkezett szeizmikus hullámok (bekeretezett rész) részletes elemzése lehetővé tette, hogy meghatározzuk az irányt, ahonnan a hullámok érkeztek.



31. ábra. A két horizontális csatorna elemzése

Ábrázolva az É-D-i és K-Ny-i irányú komponenseken minden egyes időpontban mért elmozdulást, a talaj egy részecskéjének mozgását bemutató grafikont kapunk, amiről megállapíthatjuk a rengés irányát (32. ábra).

(Kiegészítés: szerk. A 32. ábrán a 31. ábra kék téglalappal jelölt részét nagyítottuk ki. A kék vonal az É-D-i, a narancssárga pedig a K-Ny-i irányban elhelyezett horizontális szeizmométer kilengéseit mutatja. Minden egymás utáni mintavételkor kiolvassuk a regisztrált értéket. Ezt mutatja a 32. ábra felső része (vízszintes tengely az idő). Látható, hogy időben változik a két szeizmométeren mért érték. Ezt egy derékszögű koordináta-rendszerben ábrázolva (y: É-D; x: K-Ny) meg tudjuk határozni a P-hullám beérkezési irányát.)



32. ábra. A P-hullám elemzése megmondja annak beérkezési irányát

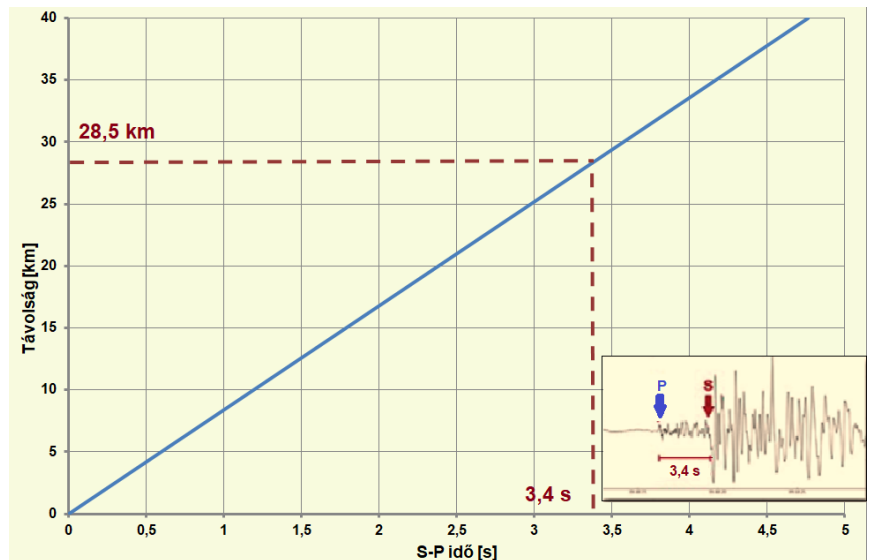
3.4.2 A marsrengések helyének meghatározása egyetlen állomás segítségével

A Marson kombinálhatjuk a szeizmogramból kapott információt azokkal a képekkel, amiket a NASA Mars körül keringő HiRISE szondája szolgáltat. Az új kráterek keletkezését összekapcsolhatjuk a kapott jelekkel a következő lépéseket követve:

1:

Az S mínusz P idő alapján meghatározzuk az esemény távolságát a szeizmométertől 0 km fészekmélységet feltételezve.

© BGS / NERC (Paul Denton)

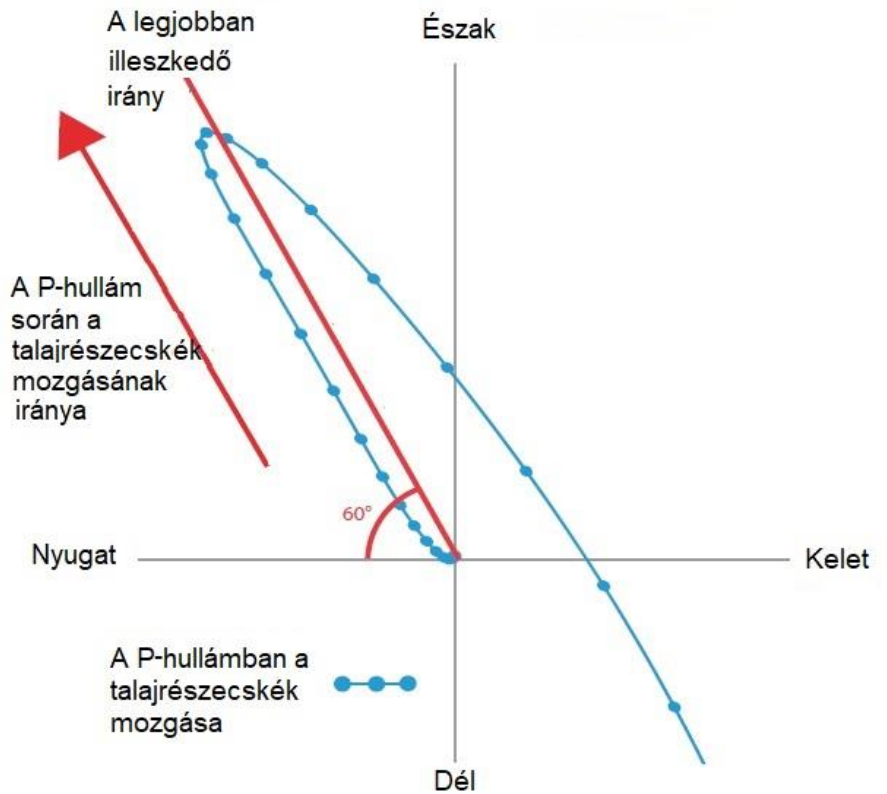


33. ábra. Az esemény távolságának meghatározása az S-hullám késési idejéből

2:

Az első jel elemzésével a beérkezési irányt tudjuk meghatározni.

© BGS / NERC (Paul Denton)

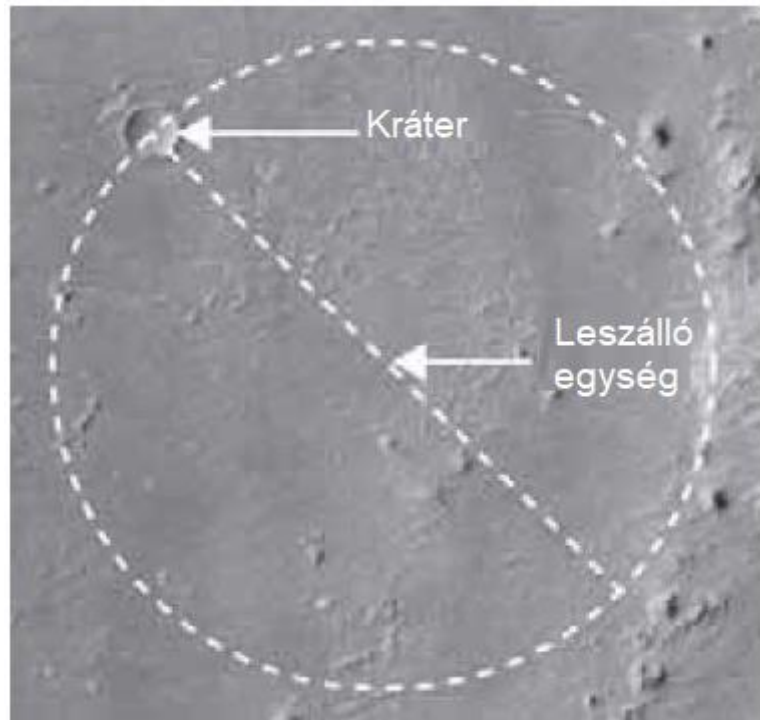


34. ábra. A P-hullám irányának meghatározása

3:

Az esemény 1. pont szerint kapott távolságának megfelelő sugárral kört rajzolunk a gyorsulásmérő műszer köré és a térképeken megkeressük a feltételezett új krátert.

© BGS / NERC (Paul Denton)



35. ábra. Egy megfelelő sugarú körön keressük a krátert

4:

A HiRISE szondának a feltételezett területéről a szeizmikus jel észlelése előtt és után készült képeit összehasonlítjuk, és a felvételeket közelebbről megnézve behatároljuk a krátert

© BGS / NERC (Paul Denton)



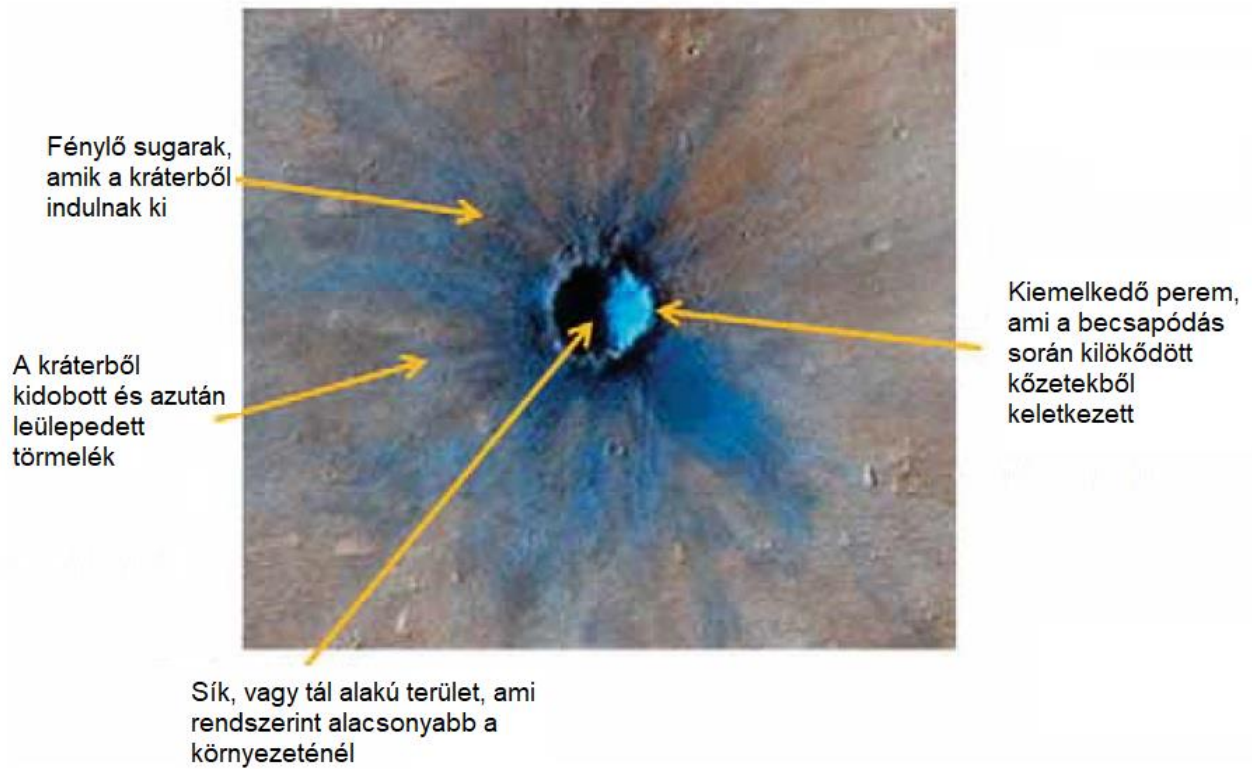
36. ábra. A HiRISE képeit használjuk a kráterek vizuális keresésre

4 Egy kráter keletkezik: háttértudomány

4.1 A becsapódási kráterek

Egy bolygó vagy egy hold felszínét formáló becsapódási kráterek kisebb objektumok nagyon nagy sebességű (jellemzően 15 km/s) becsapódása során keletkeznek. A becsapódás helye egy kráter formájában azonosítható, mely megközelítőleg kör alakú kiemelkedő peremmel rendelkezik, amit a kilövellt anyag mintázata borít be, és a belseje alacsonyabban fekszik, mint a környező felület.

A 37. ábrán látható becsapódási krátert a HiRISE (High Resolution Imaging Experiment) fedélzeti kamerája rögzítette (NASA Mars Reconnaissance Orbiter műholdról): 37. ábra.



37. ábra. A kráter részei

A Naprendszerben sok égitesten, mint például a Marson, a Holdon és a Merkúron is nagy számban láthatók a becsapódási kráterek, míg más égitesteken, mint pl. a Föld viszont sokkal ritkábbak. A Föld ugyanis aktív geológiai folyamatokkal rendelkezik és a becsapódási kráterek erodálódnak, lepusztulnak az idő múlásával.

4.2 Mi történik egy becsapódás után?

4.2.1 Egyszerű kráterképződés

Egy bolygó felszínén levő legkisebb becsapódási krátereket egyszerű krátereknek nevezzük, mert egyszerű tál alakúak. Ezek a kráterek akkor keletkeznek, amikor egy ütközés, azaz egy kisebb aszteroida vagy üstökös eléri a felszínt és az így keletkező lökéshullám megrázza a bolygó kérgét.

(© BGS / NERC - Módosított szöveg a képek Bevan M French \ David A Kring után \ LPI\UA.)

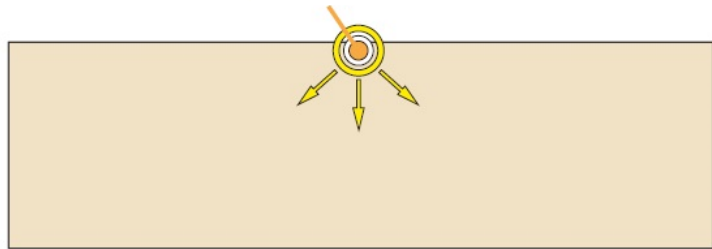
Ütközés és kompressziós szakasz

Ez a szakasz az ütközés utáni pillanat. A becsapódó test eltalálja a bolygó felszínét, és ahogy eléri a felszínt, összetöri az anyagot és lökéshullámok keletkeznek. A test kezdeti mozgási energiája más formákká pl. részben hővé alakul, ami megolvasztja és elpárologtatja az anyagot a hatás helyén. Ezzel véget ér a kráter kialakulásának az első szakasza. Ez a szakasz nem igényel sok időt - az arizonai sivatagban a Barringer-kráter kialakulása pár milliszekundumig tarthatott.

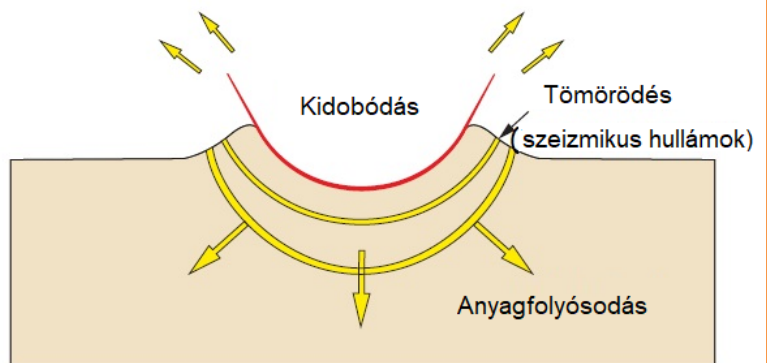
© BGS / NERC (Paul Denton)

Első érintkezés és kompressziós szakasz

A becsapódó test



A kontaktus és kompressziós szakasz vége



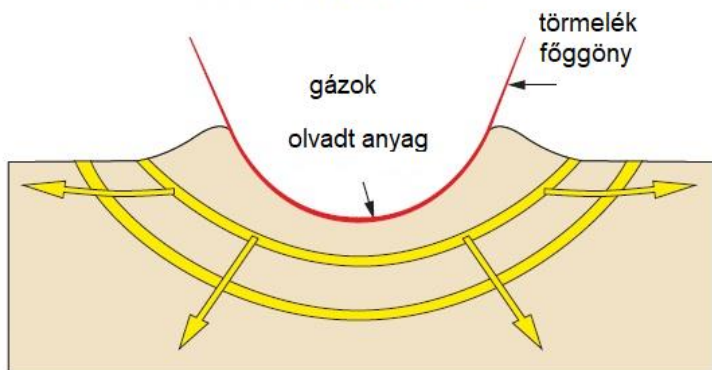
38. ábra. Az egyszerű kráter keletkezési folyamata (1)

A felszín átformálása

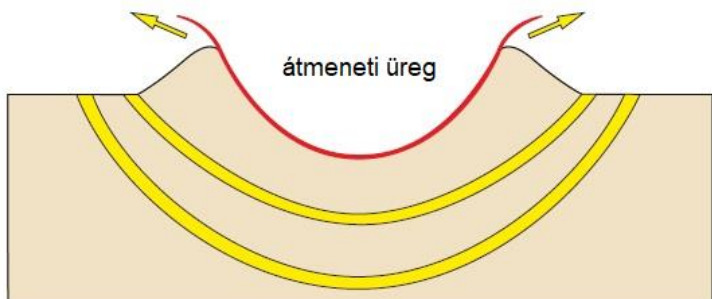
A továbbiakban a kompressziós lökéshullám tovaterjed. Az anyag összenyomódik, majd szétszóródik, és kezd kialakulni a kráter ürege. A kidobódott anyag egy része törmelékfüggöny formájában visszahull a felszínre. A kidobott anyag lerakódik a kráter körül, és peremet alkot. A Barringer-kráter kialakulásának ez a szakasza körülbelül 10 másodpercig tartott.

© BGS / NERC (Paul Denton)

A felszín átformálása



A felszín átalakulása befejeződött

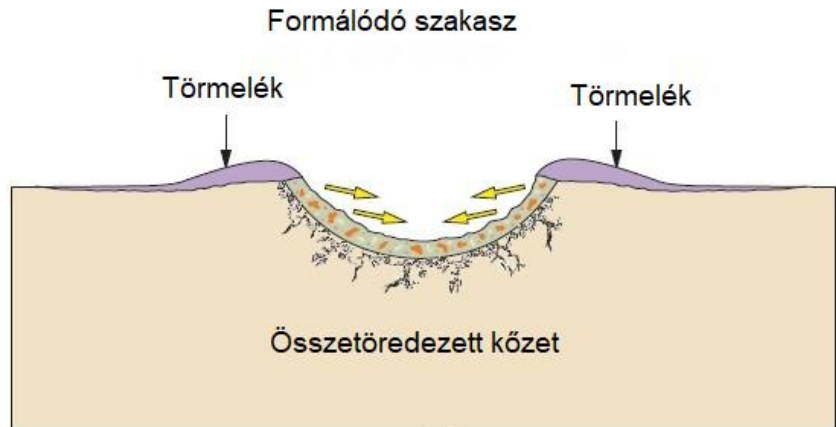


39. ábra. Az egyszerű kráter keletkezési folyamata (2)

Formálódó szakasz

A kráter kezd összeomlani a gravitáció hatására és némi anyag visszakerül a kráter belsejébe. A külső falak egyes részei is megrogynak vagy összeomlanak. Ha a kráter elég nagy, akkor egy központi csúcs vagy gyűrű is képződik.

© BGS / NERC (Paul Denton)



40. ábra. Az egyszerű kráter keletkezési folyamata (3)

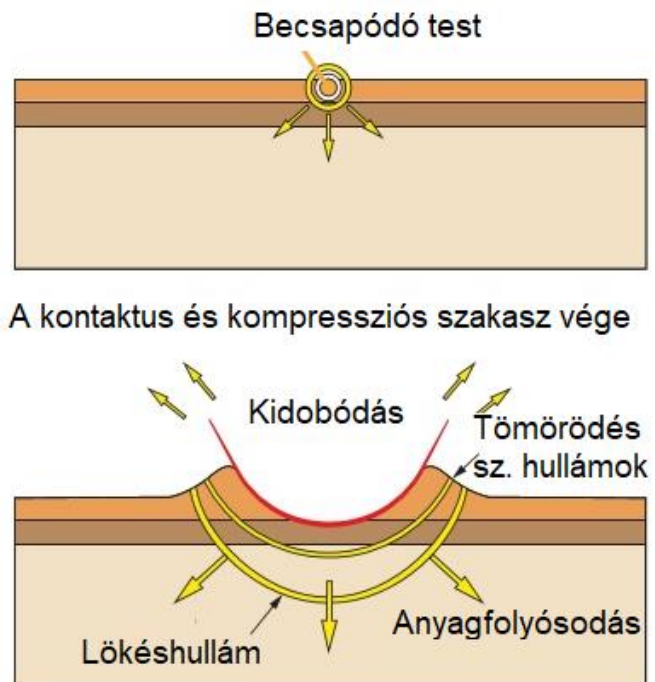
4.2.2 Összetett kráterképződés

Nagyobb aszteroidák és üstökösök komplex krátereket és kráter falakat alakítanak ki, amelyek akár annyira meredek is lehetnek, hogy hajlamosak összeesni, és a kráter középpontjában egy nagy, esetleg gyűrűvel is körbevett központi csúcs keletkezik. (© BGS/ NERC szöveg és a képek módosítva Bevan M French\David A Kring\LPI\UA után.)

Ütközés és kompressziós szakasz

A kráter kialakulásának első szakasza hasonló az egyszerű kráterek keletkezéséhez.

© BGS / NERC (Paul Denton)

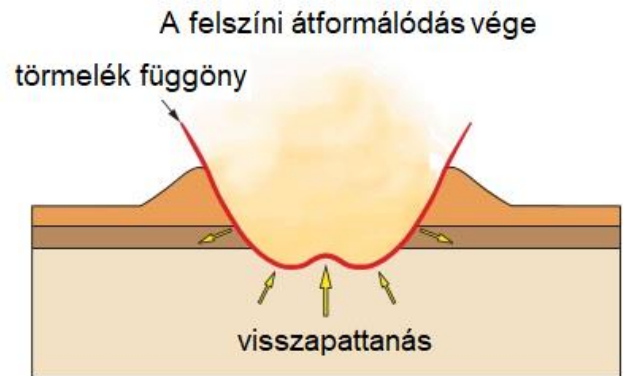
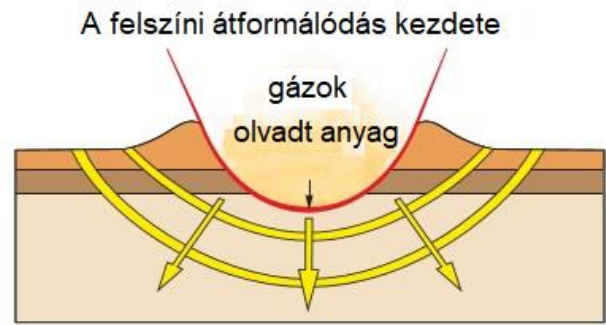


41. ábra. Az összetett kráter keletkezési folyamata (1)

A felszín átformálása

A formálódás során egy központi csúcs emelkedik ki, vagy pattan vissza a kráter fenekéről.

© BGS / NERC (Paul Denton)



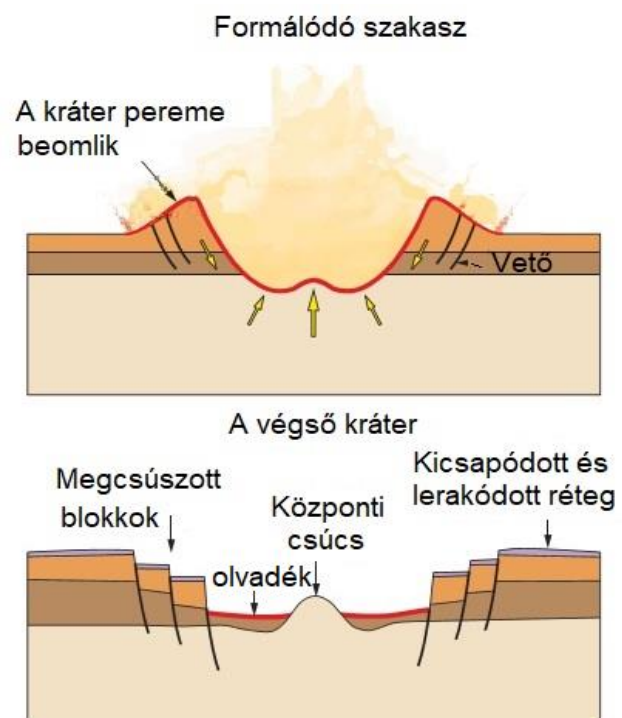
42. ábra. Az összetett kráter keletkezési folyamata (2)

Formálódó szakasz

A kráter falai kezdenek összeomlni és a pereménél egy módosult rész jön létre. Összehasonlítva az egyszerű kráterekkel, itt sokkal több olvadékanyag keletkezik, és a kráterben egy vastag becsapódási olvadék felszín jön létre.

A legnagyobb hatású esemény az, amikor a kiemelkedő központi csúcs összeomlik, és egy központi gyűrűt hoz létre (nem látható az ábrán). A Földön a Chicxulub kráter (Mexikó, Yucatan félsziget) a legjobb példa a komplex, kiterjedt olvadéklappal, csúccsal és gyűrűvel rendelkező becsapódási kráterre, bár a tenger alatt, vastag üledékrétegek alá van temetve.

© BGS / NERC (Paul Denton)



43. ábra. Az összetett kráter keletkezési folyamata (3)

5 Szótár

asztenoszféra: A Föld belsejében lévő, a rideg litoszféra alatti, képlékenyen deformálódó rész, mely a felső-köpeny egy része. Kb. 180 km vastag réteg.

állomás: A földrengések regisztrálása a szeizmológiai állomásokon elhelyezett műszerekkel történik. A Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium által üzemeltetett állomások megtekinthetők a www.seismology.hu honlapon.

differenciálódás: Az az eseménysor, melynek során az égitestek elnyerik réteges, övekre tagolt szerkezetüket.

epicentrum: A földrengés fészkeinek felszíni vetülete

földrengés: Földrengés pattan ki, ha egy tektonikai lemezben törés következik be vagy egy már meglévő vető mentén a kőzetblokkok elmozdulnak egymás mellett. Az ekkor felszabaduló energia rugalmas hullámok formájában terjed. A kőzetblokkok mozgását talajmozgás is kíséri, ezeket együttesen nevezzük földrengésnek.

gyorsulásmérő: Feladata olyan talajmozgások rögzítése, amelyek nagy, emberek által is érzékelhető, esetleg károkat is okozó földrengések alkalmával lépnek fel, vagyis a gyorsulásmérő gyakorlatilag nem más, mint egy érzéketlen szeizmométer.

hőáram: Az F felületen időegységenként átáramlott energia mértékegysége: W. A hőáram a csökkenő hőmérsékletek irányába mutat, arányos a terjedési irányú, hosszegységenkénti hőmérséklet-változással és az erre az irányra merőleges keresztmetszettel.

lemeztektonika: A lemeztektonika elmélete szerint a földi litoszférát merev kőzetlemezek építik fel, amelyek egymáshoz képest mozognak. A lemezek peremeit jelző vetők mentén gyakran pattannak ki földrengések. A kőzetlemezek közeledhetnek egymáshoz, ekkor szubdukció (alábukás) és kollízió (ütközés) zajlik. A távolodó lemezszegélyeknél jönnek létre az óceánközépi hátságok. Az egymás mellett elcsúszó lemezek esetén oldalelmozdulásos vetők jellemzők. Az utóbbira a legismertebb példa a Szent-András törésvonal.

litoszféra: A Föld legkülső, szilárd, merev, törésesen viselkedő része. A kérget és a köpeny legfelső részét is magában foglalja. A litoszférát kőzetlemezek alkotják, melyek képesek a Föld felszínén mozogni. Ezek a litoszféralemezek az asztenoszférán "úsznak".

Longitudinális hullám: A rugalmas térhullámok egy csoportja, melyben sűrűsödések és ritkulások követik egymást. A részecskemozgás a terjedési irányval párhuzamosan, előre-hátra történik. Terjedési sebességük nagyobb, mint a transzverzális hullámoké. P- vagy Primer hullámoknak is nevezzük őket. A kéregben jellemző sebességük 5-7 km/s.

Love-hullám: A Love-hullám a felületi hullámok csoportjába tartozik. Kialakulásának feltétele, hogy a felszínen legalább egy véges vastagságú réteg legyen, amelyben a transzverzális hullám sebessége kisebb, mint az alatta lévő féltérben. A kialakuló hullám terjedési sebessége a két rétegben jellemző S-hullám terjedési sebessége közé esik. A részecskemozgás a vízszintes síkban, a terjedési irányra merőlegesen történik. A Love-hullám gyorsabb a Rayleigh-hullámnál, átlagos terjedési sebessége a Föld esetén 4,43 km/s.

Rayleigh-hullám: A Rayleigh-hullám a felületi hullámok közé tartozik, egy féltér felülete mentén jön létre. A hullámban a részecskemozgás a terjedés irányával egybeeső függőleges síkban, egy függőlegesen elnyúlt ellipszispálya mentén, retrográd (az ellipszis felső részén a terjedési irányval ellentétes) irányban történik. A Rayleigh-hullám terjedési sebessége közelítőleg 92%-a az adott közegben jellemző transzverzális hullám sebességének. Átlagos terjedési sebessége a Föld esetén 3,97 km/s.

szeizmométer: Olyan berendezés, ami a talajmozgást valamilyen egyéb, könnyebben mérhető fizikai mennyiséggé (pl. elektromos feszültséggé) alakítja át, de az elnevezést gyakran a szeizmográf szinonimájaként használják. A szeizmométer illetve szeizmográf feladata a lehető

legkisebb talajmozgás érzékelése. A mai modern készülékek képesek a talajnak akár 0,00001 mm-es elmozdulását is regisztrálni.

szubdukció: Szubdukciónak nevezzük az óceáni litoszféra kontinentális litoszféra alá történő lebukását a két lemez ütközése során. A szubdukciós zónákban sekély-, közepes és mélyfészű rengések egyaránt kialakulhatnak, itt jönnek létre a legnagyobb magnitúdójú és a legmélyebb földrengések is.

térhullám: A térhullámok olyan földrengéshullámok, melyek a Föld belsejében haladnak. A térhullámok közé tartoznak a longitudinális és a transzverzális hullámok, melyeket a szeizmológiában P- és S-hullámoknak nevezünk.

transzverzális-hullám: A transzverzális hullámban a részecskék a terjedési irányra merőleges síkban mozognak. Terjedésük során a közegben csak nyíróerők lépnek fel, ezért a transzverzális hullámot nyíróhullámnak is nevezik. Mivel folyadékban nyíróerők nem lépnek fel, ezért a transzverzális hullámok folyadékokban nem terjednek. Terjedési sebességük kisebb, mint a longitudinális hullámoké. S- vagy Szekunder hullámoknak is nevezzük őket. A kéregben jellemző sebességük 3,5-4 km/s.

6 Irodalomjegyzék

- AMERICAN METEOR SOCIETY. 2015. Meteor terminology. <http://www.amsmeteors.org/2013/03/meteor-terminology/>
- BANERDT, W, B. 2012. InSight geophysical mission to Mars. [Presentation]. [cited May 2016]. http://mepag.jpl.nasa.gov/meeting/2012-10/10_2012-1004_MEPAG.pdf
- BOYLE, R. 2015. Listening to meteorites hitting Mars will tell us what's inside. New Scientist.
- BRAILE, L. 2006. Seismic wave demonstrations and animations. Purdue University. [cited December 2016]. <http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.html>
- BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. 2016. Discovering geology: Earthquakes. [cited January 2017]. <http://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/earthquakes/home.html>
- CHAPLIN, M, and DENTON, P. 2007. Seismology: Innovations in Practical Work. [cited January 2017]. <https://www.stem.org.uk/elibrary/resource/27385>
- COLLINS, S, C. ET AL. 2002. Hydrocode simulations of Chicxulub crater collapse and peak-ring formation. Icarus, Vol. 157, 24–33.
- DAUBAR, I, J. ET AL. 2013. The current Martian cratering rate. Icarus, Vol. 255, 506–516.
- FRENCH, B, M. 1998. Formation of impact craters. 17-30 in Traces of catastrophe. A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. LPI Contribution No. 954. (Houston: Lunar and Planetary Institute.)
- KHAN, A, ET AL. 2016. Single-station and single-event marsquake location and inversion for structure using synthetic Martian waveforms. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 258, 28–42.
- MARTIN, P, ET AL. 2008. Why does plate tectonics occur only on Earth? Physics Education, Vol. 43.
- NASA. 2016. Insight... into the early evolution of terrestrial planets. [Website]. [cited May 2016]. <http://insight.jpl.nasa.gov/>
- NASA. 2016. Mars facts. [cited June 2016]. <http://mars.nasa.gov/allaboutmars/facts>
- SOLOMON, S, C. ET AL. 2005. New perspectives on ancient Mars. Science, Vol. 307, 1214–1220.
- TEANBY, N, A. 2015. Predicted detection rates of regional-scale meteorite impacts on Mars with the InSight short-period seismometer. Icarus, Vol. 256, 49–62.

7 Ábrajegyzék

1. ábra. A tudományos kutatás receptje	4
2. ábra. Az űrbéli kőzetek a Naprendszer részei	5
3. ábra. Meteoroid, meteor és meteorit	5
4. ábra. A Föld és a Mars összehasonlítása (1)	6
5. ábra. A Föld és a Mars összehasonlítása (2)	6
6. ábra. A Föld és a Mars összehasonlítása (3)	7
7. ábra. A marsi szeizmikus események néhány lehetséges forrása	7
8. ábra. A HiRISE kamera nagy felbontású képeiből készült 3D hatású videó egy részlete	8
9. ábra. Az InSight leszálló egység fantáziaképe és a SEIS belseje	10
10. ábra. Az egyenlítő mentén tervezik a leszállást, várhatóan 2018. november 26-án lesz	11
11. ábra. A Föld öves felépítése és a litoszféra	12
12. ábra. Magmaóceán borítja a bolygót élete kezdetén (NASA/JPL-Caltech)	13
13. ábra. A Föld a Mars és a Hold belső öveinek összehasonlítása (© BGS/NERC)	15
14. ábra. Egy marsi kráter vetőkkel	16
15. ábra. A Phobos szabálytalan alakú	17
16. ábra. A szél hatása a Marson	17
17. ábra. Új kráter látszik!	18
18. ábra. 2013-ban 213 új becsapódást rögzítettek a Marson	18
19. ábra. A „földrengések” átlagos száma évente az esemény magnitúdója függvényében (© BGS/NERC)	19
20. ábra. A P-hullám	20
21. ábra. Az S-hullám	21
22. ábra. A P-hullám terjedése	22
23. ábra. Az S-hullám terjedése	22
24. ábra. A Love-hullám	23
25. ábra. A Rayleigh-hullám	24
26. ábra. A P- és S-hullámok sugárútjai a Föld metszetében	25
27. ábra. Módosított IASP91 Referencia Föld Modell (© BGS/NERC)	26
28. ábra. A P- és S- hullámok menetideje egy 10 km-re a felszín alatti rengésből kiindulva $v_P=6$ km/s, $v_S=3,5$ km/s	27
29. ábra. A víz hullámok forrása kideríthető	27
30. ábra. A korai szeizmométerek egyszerű ingák voltak (© BGS / NERC Paul Denton)	28
31. ábra. A két horizontális csatorna elemzése	28
32. ábra. A P-hullám elemzése megmondja annak beérkezési irányát	29
33. ábra. Az esemény távolságának meghatározása az S-hullám késési idejéből	30
34. ábra. A P-hullám irányának meghatározása	30
35. ábra. Egy megfelelő sugarú körön keressük a krátert	31
36. ábra. A HiRISE képeit használjuk a kráterek vizuális keresésre	31
37. ábra. A kráter részei	32
38. ábra. Az egyszerű kráter keletkezési folyamata (1)	33
39. ábra. Az egyszerű kráter keletkezési folyamata (2)	33
40. ábra. Az egyszerű kráter keletkezési folyamata (3)	34
41. ábra. Az összetett kráter keletkezési folyamata (1)	34
42. ábra. Az összetett kráter keletkezési folyamata (2)	35
43. ábra. Az összetett kráter keletkezési folyamata (3)	35

8 Feladatok és kísérletek

Azok számára, akik közelebbről is szeretnék tanulmányozni a marsrengéseket, és bele szeretnének kóstolni a földrengések, a csillagászat és különösképp a marskutató izgalmas világába, gyakorlásul néhány érdekes, tanulságos és szórakoztató feladatot ajánlunk, melyeket tanórán, vagy szakköri foglalkozás keretében célszerű elvégezni, de egyesek részben akár otthon, egyénileg is megcsinálhatók. A sokrétű feladat és kísérlet során szerteágazó ismeret szerezhető, átélhető egy igazi csillagászati esemény felismerésének, kiértékelésének az élménye!

Minden órai munka szerzője: Paul Denton © British Geological Survey 2018

Az órai munkák anyaga oktatási célokra lemásolható, a Brit Geológiai Szolgálat, mint szerző és tulajdonos megnevezésével. Anyagi haszonnal nem forgalmazható.

Az órai munka magyar nyelvű változatát Kiszely Márta¹ készítette. Köszönet a szerzőnek, hogy lehetővé tette a program magyar nyelven való terjesztését.

Lektorálta és kiegészítésekkel ellátta: Dr. Hudoba György²

¹ MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, szeizmológus

² Óbudai Egyetem, főiskolai docens, fizikus

8.1 A marsi kráterek méretének a meghatározása



A 2018-as Mars misszió során az InSight elhelyez egy szeizmométert a Mars felszínére, és a tervek szerint 2019-től a műszer elkezd észlelni a marsi meteorit-becsapódások okozta talajrezgéseket. Ugyanakkor a Marsról folyamatosan készülő műholdképek felhasználásával az új krátereket azonosíthatják, és meg tudják majd határozni, hogy mennyi energia szabadult fel a keletkezésükkor. A becsapódás érzékelt szeizmikus jeleinek felhasználásával a kutatók majd egyre többet tudnak meg a Mars belső szerkezetéről.

Ebben a feladatban képzeletben az egyik missziós projektsoporthoz csatlakozunk. A csapat feladata olyan távérzékelési módszerek megismerése és elemzése, melyeket a kráter szélességének és mélységének meghatározására használnak.

A csoport feladata, hogy kis sebességű ejtési kísérletekkel szimulálja a kráterek keletkezését, és modellezze a műhold felvételét egy telefon vagy táblagép kamerájának a felhasználásával. A csoport azt az információt kapja, hogy a Mars felszínének anyaga nagyon porszerű, akár a liszt.

Házi feladat lehet a Mars körül keringő MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) műszereinek (főként a HiRISE) és tevékenységének megismerése.

FELADAT

Készíteni kell egy saját krátert, azt le kell fényképezni, majd meg kell ismerni és érteni a műholdak képeinek feldolgozása mögötti technikát.

TANULÁSI CÉL

- lépték megállapítása (kalibrálás)
- mérési adatok feldolgozása
- tangens szögfüggvény használata

KELLÉKEK

- mély tepszi, vagy kartondoboz (legalább 30 cm x 30 cm x 5 cm)
- liszt (annyi, hogy a fenti edényt 5 cm mélyen kitöltse)
- kakaópor (vékony "takaró" réteghez)
- fagolyó (kb. 3,5 cm átmérőjű, 30 g tömegű)
- lámpa (napsütés szimulálására, árnyék létrehozásához)
- okostelefon vagy táblagép (kamerával)
- 1 méteres vonalzó vagy mérőszalag
- HiView szoftver (ingyenes; <http://www.uahirise.org/hiview>)
- MS Paint, IrfanView vagy egyéb alkalmas képfeldolgozó szoftver
- „01-UjKraterek_2007-2013.xlsx” adatfájl

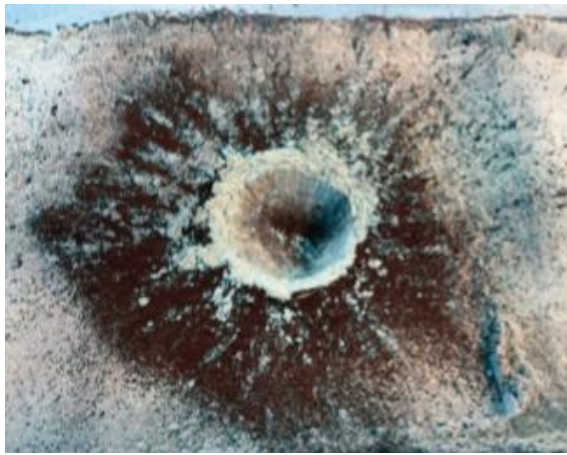
A KRÁTER MODELLEZÉSE

A becsapódási terület modellje lehet egy magas falú tepszi vagy egy kartondoboz melynek az oldala legyen elég magas, hogy meggátolja az anyag kiszóródását. A becsapódási terület legalább 30x30 cm legyen. A felszín anyaga kulcsfontosságú, a feladat kidolgozói erre a lisztet találták a legalkalmasabbnak, bár finom homok is megfelelő lehet. A becsapódási területet úgy készítjük elő, hogy a lisztet (vagy homokot) lassan beleszítjük a tartályba (különben hajlamos lenne összetömörödni). Az edényt finoman rázogassuk meg, hogy az anyag egyenletesen töltse azt ki. A liszt/homok réteg legalább 5 cm mély legyen. A becsapódási kráter mintázatát legjobban a kiszóródó anyag nyomon követésével lehet megfigyelni. Ehhez a liszt színétől eltérő anyagot, például kakaóport, púdert, vagy porított festéket is használhatunk.

A becsapódási terület előkészítésekor az eltérő színű por egy részét a liszt felületére szítjuk. Ez lehetővé teszi, hogy az ütközéskor kidobott anyag és a sugarak jól láthatók és mérhetőek legyenek.

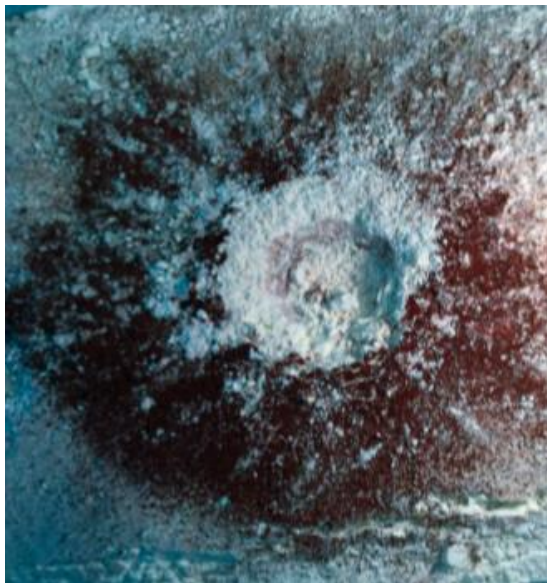
A szerzők a legjobb „meteorit”-nak eddig egy kb. 3,5 cm átmérőjű és 30 g tömegű fagolyót találtak (sűrűsége kulcsfontosságú tényező), ami kb. 60 cm magasságból leejtve eredményezte az alábbi krátert.





ÁRNYÉK MODELLEZÉSE

A Napot egy 45° -os szögben világító asztali lámpa modellezheti, ami árnyékot hoz létre a kráterben.



KALIBRÁCIÓS KÉP KÉSZÍTÉSE

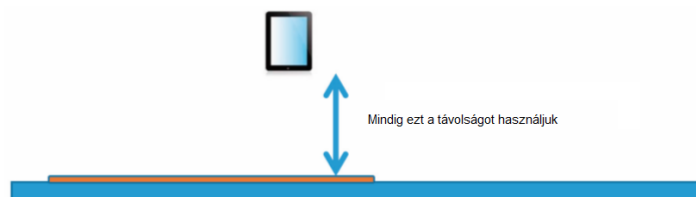
A technika alapja a következő fogalmak megértését igényli:

- felbontás - az egyes képpontok (pixelek) mekkora távolságot jelentenek a valóságban
- képméret - hány képpont alkotja a képet

A fénykép készítéséhez használhatunk pl. egy táblagép, vagy telefon kameráját is. Nagyon fontos, hogy a modellezésünk során mindig ugyanazt a kamerát használjuk, merőleges rálátással, azonos magasságból.

Először egy skálázáshoz használható kalibrációs képet készítünk.

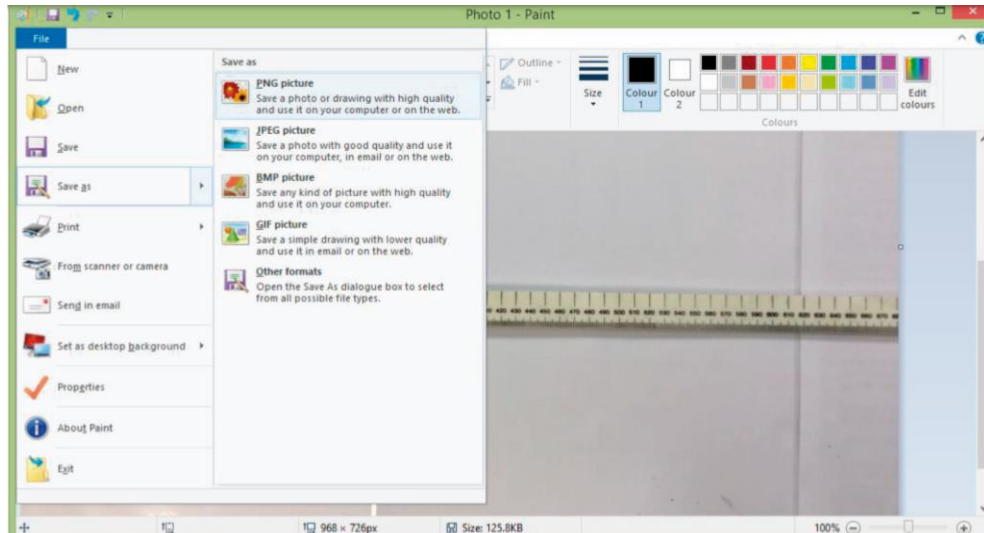
Az alábbi ábra egy 40 cm távolságról lefényképezett mérőszalagot mutat:





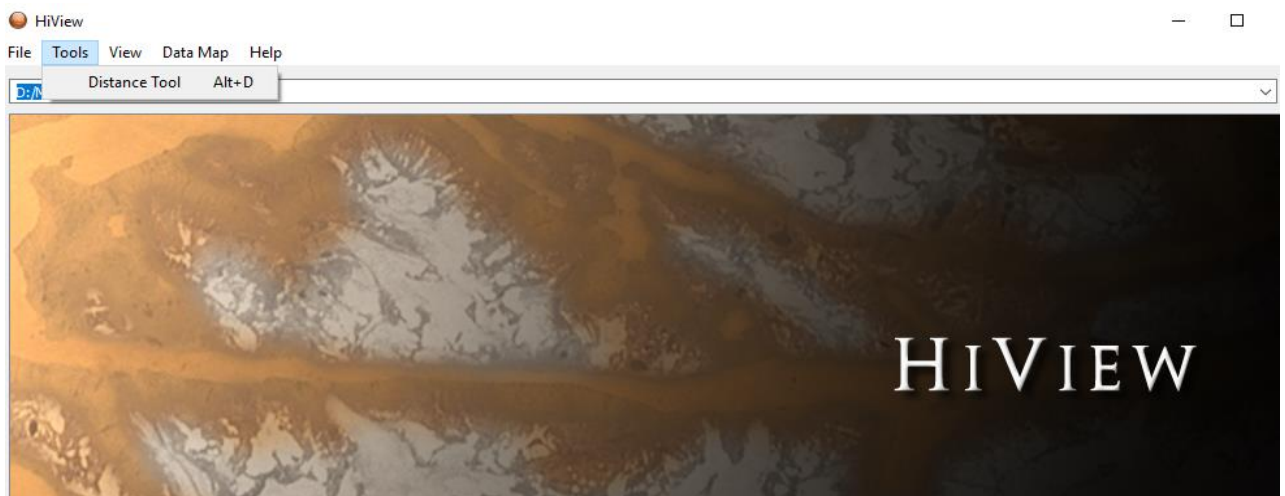
A KÉP ÁTALAKÍTÁSA AZ ELEMZÉSHEZ

Az elkészített képet le kell tölteni a számítógépre. A valószínűleg JPG-fájlt át kell konvertálni PNG formátumba a HiView számára, amivel a későbbiekben az elemzést fogjuk végezni. Ha Windows-t használunk, ehhez nyissuk meg a letöltött képet pl. a Paint programmal, és a „Save as” parancssal mentjük el PNG formátumban.



A HiView TELEPÍTÉSE

A HiView-t a www.uahirise.org/hiview webhelyről lehet telepíteni.



A FELBONTÁS MEGHATÁROZÁSA

Sikeres installálás után indítsuk el a programot, és nyissuk meg vele a PNG formátumú kalibrációs képünket! Első lépésként meghatározzuk egy ismert távolságra eső képpontok számát. Az egér bal fülét lenyomva és nyomva tartva, az egér mozgatásával jelöljük ki egy tartományt, ahogy azt az alábbi ábra mutatja! A kijelölt tartomány mérete pixelekben mérve a bal felső sarokban látható.



Esetünkben a vonalzon kijelölt 500 mm hosszúságú szakasznak 802 képpont (pixel) felel meg, így a felbontásunk:

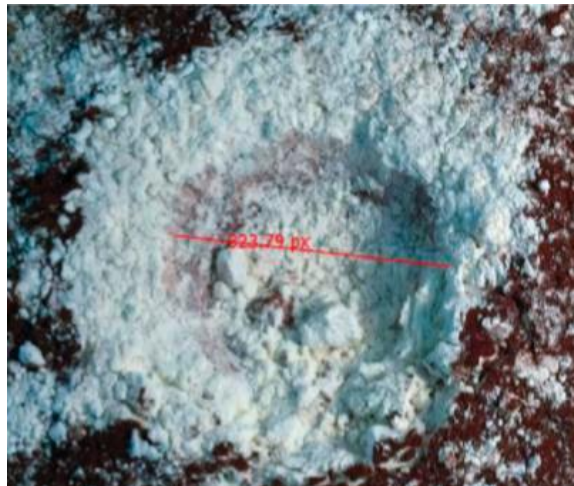
$$\text{Felbontás} = 500\text{mm} / 802\text{px} = 0,62 \text{ mm/px}$$

A „Distance Tool” használata a HiView alkalmazásban

A „Tools/Distance Tool” menüpont segítségével kapcsoljuk be a távolságmérő eszközt! Kattintsunk a képen a kiindulásul választott pontra, majd az egeret mozgassuk a kívánt távolsáig! Ekkor egy piros vonal jelenik meg, amely mellett a pixelek száma (px), vagyis a vonal hossza olvasható. Ezzel az eszközzel nem csak vízszintes (X) és függőleges (Y), hanem tetszőleges irányban levő két képpont távolságát is meg tudjuk határozni.

A KRÁTER MÉRETÉNEK A MEGHATÁROZÁSA

A kráter képét ugyanúgy elemezzük a HiView használatával mint a vonalzó képét: a képet PNG formátumra konvertáljuk, betöltjük HiView programba, és a „Distance Tool” segítségével távolságot mérünk.



A fenti képen a kráter átmérője 324 képpont (kerekítve 323,79-ről). Mivel ugyanabból a magasságból fényképeztük, mint a kalibrációs képet, az egyes pixelek tényleges hossza most is 0,62 mm.

Tehát a kráter tényleges átmérője: Kráter átmérője = 324 px · 0,62 mm/px = 201 mm

Ellenőrzésként közvetlenül is mérjük meg a krátert, hogy a módszerünk helyességét igazoljuk.

A KRÁTER MÉLYSÉGÉNEK A MEGHATÁROZÁSA

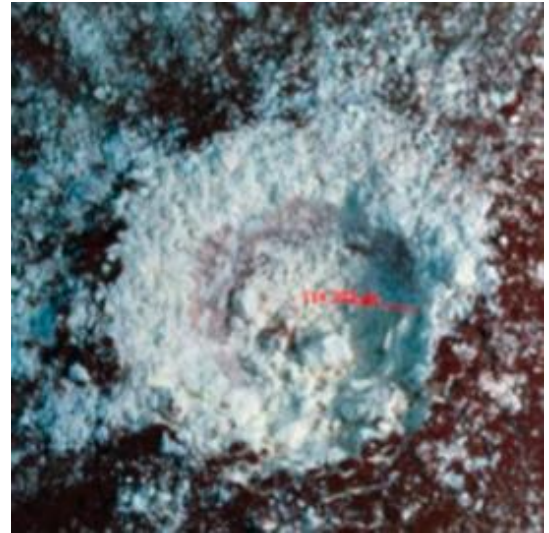
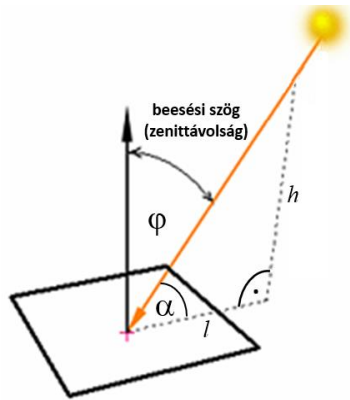
A kráter-mélységét is meg tudjuk határozni, ami ismét ellenőrizhető közvetlen méréssel. Először is mérjük meg az árnyék hosszát! A 114 képpontos árnyék hosszúság 70,7 mm (114 px · 0,62 mm/px = 70,7 mm) távolságot jelent. Mivel esetünkben a megvilágítás szöge épp 45 fok volt, a kráter mélysége megegyezik az árnyék hosszával, azaz 70,7 mm.

Ha a megvilágítás szöge eltér a 45 foktól, akkor a kráter mélységének meghatározása egy kicsit bonyolultabb. Ehhez ismerni kell a derékszögű háromszögek oldalainak arányaira vonatkozó összefüggéseket, azaz a szögfüggvényeket.

Definíció szerint $\text{tg } \alpha = h/l$, ahol h a kráter mélysége, l az árnyék hossza, így a kráter mélységére egyszerűen kapjuk: $h = l \text{ tg } \alpha$. A gyakorlatban inkább a Nap φ zenittávolságát (a beesési szöget) használják. Ezzel a kráter mélységét a

$$h = l \text{ tg}(90^\circ - \varphi)$$

formulával tudjuk kiszámítani.

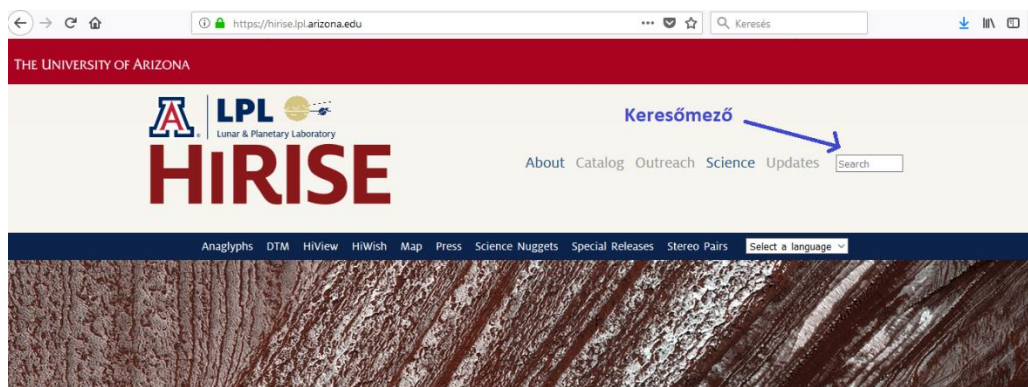


FELADAT: valódi kráterek elemzése a HiView segítségével

A Nagyfelbontású Képképző Tudományos Kísérlet keretében (High Resolution Imaging Science Experiment - HiRISE) a Mars Reconnaissance Orbiter fedélzetén működik egy tükrös távcsővel rendelkező kamera, amely az objektíve 0,5 m átmérőjű. Az eddigi űrkutatások során ez a legnagyobb kamera, ami lehetővé teszi, hogy a Marsról 0,3 m/pixel felbontású képeket készítsünk. Ez már az 1 m-nél kisebb tárgyak felbontását is lehetővé teszi.

A HiRISE kamerája által készített képeket egy online adatbázisban tárolják és ingyenesen hozzáférhetők, a <https://hirise.lpl.arizona.edu> címen. A minket érintő funkciók sajnos csak angol nyelven érhetők el. (Bár van lehetőség a magyar nyelv kiválasztására, a lehetőségek nagyon korlátozottak.)

Az adatbázisban sokféle funkció található, és bármelyik képre kattintva nagyon érdekes saját képeket is készíthetünk.



EGY KRÁTER KÉPÉNEK A LETÖLTÉSE

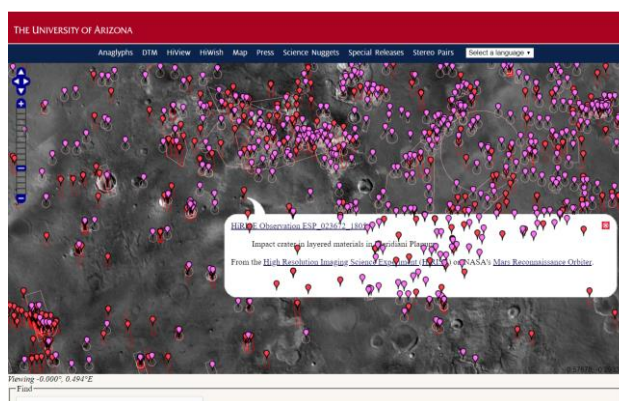
Ha egy ismert kráter felvételét szeretnénk letölteni, akkor ennek a legegyszerűbb módja a keresési funkció használata. A keresőmező PSP vagy ESP hivatkozási számot vár a terület beazonosításához.

Az itt bemutatott példa a PSP_001750_1425 nevű felvétel két, majdnem azonos méretű marsi kráterrel. Ezt az azonosítót a keresőmezőbe beírva feljön egy lap, amely a kép egy kis részletét és pozícióját tartalmazza. Innen léphetünk tovább a részletes adatokat tartalmazó oldalra, ahonnan letölthető a jobb oldalt látható felvétel, különböző változatokban.

Megjegyzés: a HiView összes menüpontjához teljes felbontású képet kell használni. A szürkeárnyaltos JP2 és IRB a legkevésbé tömörített. Ezek nagyon nagy fájlok, és néhány percet vesz igénybe a letöltésük

A „Map” felírra kattintva és a csúszkával kissé belenagyítva az oldal megmutatja, mely területekről készültek nagyfelbontású képek, ahonnan további információk és keresési lehetőségek nyílnak meg. (Lassú!)

A gyakorláshoz a potenciális kráterképek listáját a "01-UjKraterek2007-2013.xlsx" Excel-fájl tartalmazza, ami letölthető a honlapról (<http://telapo.datatrans.hu/mars/>).



Miután kiválasztottuk a képet és a becsapódási krátert azonosítottuk, itt az ideje, hogy a méréseket elvégezzük. A technika pontosan ugyanaz, mint a saját kráterünk esetében volt. Töltsük be a képet HiView képelemző programba, és használjuk a „Distance Tool” menüpontot a pixelek megszámlálásához! A kiválasztott kráter átmérőjére 3687 px-nek adódott.

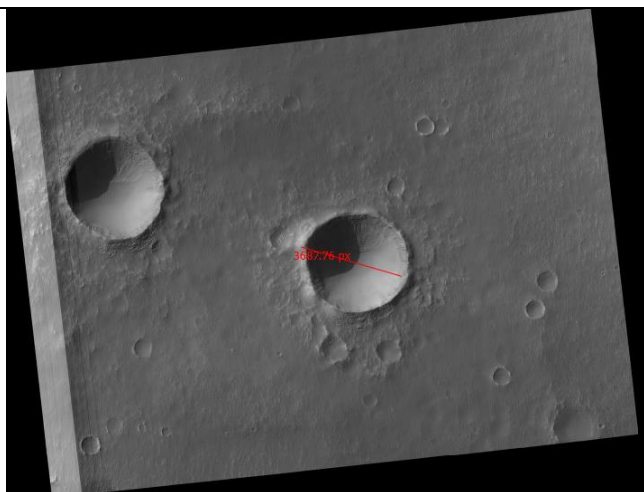
A kép adatait a következőképpen adták meg:

- felbontás (Map projected scale): kb. 25 cm/pixel
- a napfény beesési szöge (Solar incidence angle): kb. 72°,
- ebből következően a Nap 90° - 72° = 18° magasan van a horizont felett
- az űrszonda magassága (Spacecraft altitude): 253,7 km

A kráter tényleges átmérőjének kiszámításához használjuk a „Map projected scale” alatt található felbontást, ami ebben az esetben 25 cm/pixel.

Átmérő = 3687 · 0,25 m = 921,75 m

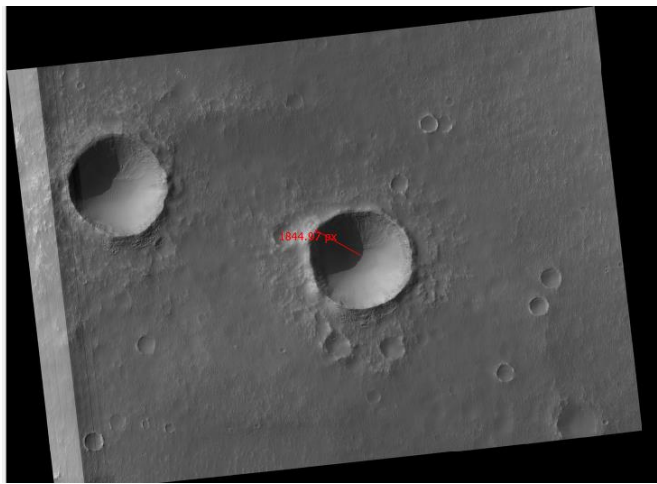
E kráterek publikált mérete 900 m körüli.



Ha most a „Distance Tool” segítségével megmérjük az árnyék hosszát pixelekben: árnyék hossza = 1845·0,25 m = 461,25 m

majd meghatározzuk a kráter falának magasságát:

$$h = l \operatorname{tg}(90^\circ - \varphi) = 461,25 \text{ m} \cdot \operatorname{tg}(18^\circ) \approx 150 \text{ m}$$



FELADAT: KRÁTEREK ELEMZÉSE „MAP-PROJECTED” KÉPEK ALAPJÁN

A HiView képek letölthetők a HiRise adatbázisból, az alábbi példában a PSP_006998_2060 egy, a Mars felszínére rögzített kép (map projected). Ezek a képek bármilyen átméretezés során mindig méretarányosak maradnak, így a kép a kráter átmérőjének és árnyékhosszának meghatározásához felhasználható. Gyakorlásul határozzuk meg önállóan a kráter méreteit.

HiView - PSP_006998_2060_RED.JP2

File Tools View Data Map Help

Navigator

D:\MARS\PSP_006998_2060_RED.JP2

PSP_006998_2060_RED.JP2

Bands

Display: Red Green Blue

1 Source: 0 0 0

Pixel Values

256 Display:

1024 Source:

Geometry

	X	Y
Source Size:	28796	48897
Region Size:	5951	4718
Region Origin:	4587	12765
Source Location:		
Display Location:	661	524

Image Scale: 0,111

Apply Immediate

8.2 A kráterképződés modellezése



A KRÁTER-
KÉPZŐDÉS
MODELLJE
14-18 éveseknek

2. óra

A 2018-as Mars misszió során az InSight elhelyez egy szeizmométert a Mars felszínére, és a tervek szerint 2019-től a műszer elkezd észlelni a marsi meteorit-becsapódások okozta talajrezgéseket. Ugyanakkor a Marsról folyamatosan készülő műholdképek felhasználásával az új krátereket azonosíthatják, és meg tudják majd határozni, hogy mennyi energia szabadult fel a keletkezésükkor. A becsapódás érzékelt szeizmikus jeleinek felhasználásával a kutatók majd egyre többet tudnak meg a Mars belső szerkezetéről.

Ebben a feladatban képzeletben az egyik missziós projektcsoporthoz csatlakozunk. A csapat feladata a Mars felszínére nagy sebességgel becsapódó meteorit hatásainak vizsgálata.

A csoport úgy döntött, hogy kis sebességű ejtési kísérletekkel szimulálja a kráterképződést. A csoport azt az információt kapta, hogy a Mars felszínének talaja porszerű, olyan finom, akár a liszt.

Házi feladat: utána nézni a kráterképződés matematikai modellezésének.

Kráter képződés: a meteoritek matematikai modellezése

A becsapódó test

A kísérlethez különböző átmérőjű golyókat kell összegyűjteni. A legkisebb golyó átmérője ne legyen sokkal kisebb, mint 1 cm (pl. egy gyöngyszem); az ennél kisebb testek inkább beássák magukat a talajba, és nem hoznak létre krátert.

A szerzők a legjobb „meteorit”-nak eddig egy kb. 3,5 cm átmérőjű és 30 g tömegű fagolyót találtak (sűrűsége kulcsfontosságú tényező)

A becsapódási terület

Készítsük elő a meteoritunk becsapódási területét! Ez lehet egy mély tepsi vagy egy karton doboz - elég magas legyen az oldala, hogy meggátolja az anyag kiszóródását. A becsapódási terület legyen legalább 30x30 cm. Az anyaga kulcsfontosságú; liszt vagy finom homok, de nagyon kicsi üveggyöngyök is jól modellezik a valódi becsapódási felületeket.

Számunkra a liszt a legmegfelelőbb. A felületet finoman bepermetezhetjük pl. permetezőző viráglócsolóval. Ez a felszín a kérget még realisabban modellezi.

A becsapódási felületet úgy hozzuk létre, hogy a lisztet (vagy homokot) lassan a tartályba szitáljuk, hogy laza maradjon. Az edényt finoman rázogassuk meg, hogy az anyag egyenletesen töltsen ki. A liszt/homok réteg legalább 5 cm mély legyen.

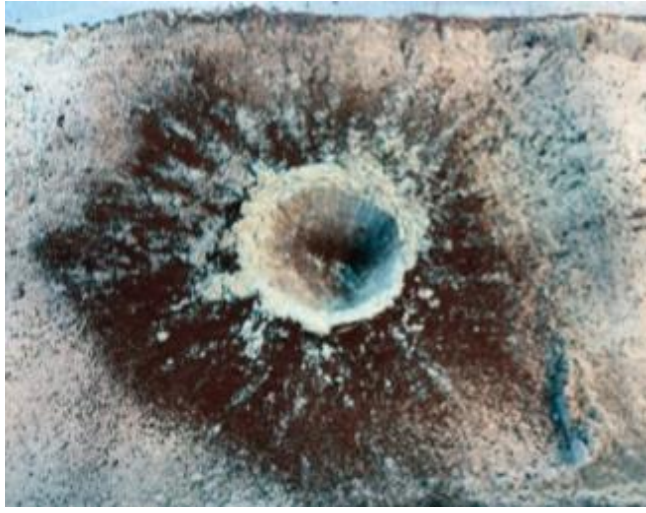
TANULÁSI CÉL

- megérteni, hogyan függ a kráterek alakja a becsapódó meteoritek tulajdonságaitól
- megérteni, hogy a megbízható mérési adatok érdekében milyen fontos a kísérleti paraméterek pontos beállítása
- az energia átadás leírása, egy objektum becsapódásakor
- a megfelelő egyenletek használata a meteor becsapódási sebességének kiszámításához
- az adatok grafikus ábrázolása
- az adatok és a grafikonok elemzése alapján mintázatok és összefüggések megállapítása
- matematikai modell felállítása
- mérési adataink és ejtési kísérleteink értékelése és megbízhatóságának elemzése

KELLÉKEK

- mély tepsi vagy kartondoboz (legalább 30 cm x 30 cm x 5 cm)
- liszt (annyi, hogy a fenti edényt 5 cm mélyen kitöltse)
- kakaópor (vékony "takaró" réteghez)
- fagolyó (kb. 3,5 cm átmérőjű, 30 g tömegű)





A becsapódási kráter mintázatát részletesebben is megfigyelhetjük, ha nyomon követjük a kiszóródó anyagot. Ezt a felületre előzetesen leszórt, a liszt színétől eltérő anyag, például kakaópor, púder vagy porított festék segítségével tehetjük meg. A becsapódási terület előkészítésekor az eltérő színű por egy részét a liszt felületére szitáljuk. Ez lehetővé teszi, hogy az ütközéskor kidobott anyag és a sugarak jól láthatók és mérhetők legyenek.

A KÍSÉRLET

Adjunk a diákoknak különböző anyagú és méretű golyókat. Egy előzetes vizsgálat segítségével válasszák ki melyik tárgyat tartják a "legjobb" meteoritnak. A további vizsgálatok során ez lesz majd a becsapódó testünk. (A legjobb „meteorit”-nak a szerzők eddig egy kb. 3,5 cm átmérőjű és 30 g tömegű fagolyót találtak.)

A golyót különböző magasságokból kell leejteni, amivel a különböző ütközési sebességeket fogjuk modellezni. (Feltesszük, hogy a golyó sebességét a légellenállás nem nagyon fékezi, nem éri el a végsebességét).

A kísérlet megtervezésének része lehet az, hogy a tanulók előre határozzák meg a saját ejtési magasságukat. Például 20 cm-től 200 cm-ig terjedő magasságig, 20 cm-es lépésekkel, vagy az ejtési magasságokat úgy osszák be, hogy a becsapódási sebesség változzon egyenletesen.

Van egy kritikus magasság, ami felett a diákok már "jó" krátereket kapnak. Akár feladatként is kiadhatjuk nekik, hogy önállóan derítsék ki ezt az értéket, vagy el is árulhatjuk nekik. A becsapódási kísérletekben a golyókat ennél magasabbról kell leejteni, ha jó mérési adatokat akarunk kapni. A fából készült golyóhoz és liszttel kitöltött felülethez a kritikus magasságot a szerzők kísérleti úton 0,72 m-ben határozták meg.

Ennek a jelenségnek az lehet a magyarázata, hogy alacsonyabb lejtési magasságoknál van olyan pont, ahol a becsapódás ereje nem elég erős ahhoz, hogy legyőzze a lisztszemcsék részecske-részecske kölcsönhatását, és ennek következtében a kráter átmérője nem lesz jelentősen nagyobb növekvő ejtési magassággal.

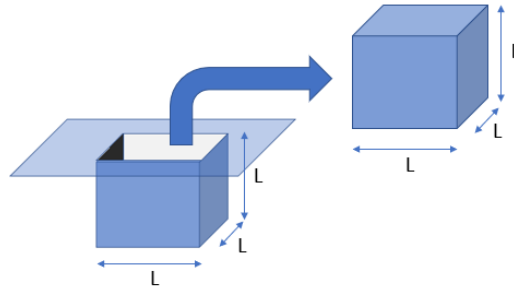
Az becsapódási felületet ugyanúgy készítsük elő minden ejtéskor, mint ahogy az előzetes golyókiválasztó kísérletnél is tettük. A kísérlet a korábbiakhoz hasonló menetet követi: a meteoritunkat az egyes kiválasztott magasságokból az edénybe ejtjük, és gondosan megmérjük minden ejtés után a keletkezett lisztkráter átmérőjét. Minden magasságból végezzünk legalább három ejtési kísérletet!

Jegyezzük fel az adatokat egy táblázatban, például az alábbi módon.

Ejtési magasság	Kráter átmérő [cm]	Átlagos kráter átmérő [cm]

Ássunk gödröt!

A kráterkeletkezés modellezésének egyik megközelítése az, hogy a kráter kialakulását egy lyuk kiásásához hasonlítjuk (Byfleet, 2007, Florida State University). A krátert egy L élhosszúságú, a homokba ázott kocka alakú lyukként modellezzük. Az energia megmarás törvénye szerint a lyuk létrehozásához ugyanakkora potenciális energia szükséges, mint amikor egy hasonló méretű kockát kiemelünk a lyuk melletti talajra.



A lyuk térfogata: $V = L^3$

A lyukból kidobott anyag tömege: $m = \text{térfogat} \cdot \text{sűrűség} = V\rho = L^3\rho$, ahol ρ a kidobott anyag sűrűsége

Az anyag súlya: $G = mg = L^3\rho g$, ahol $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ a nehézségi gyorsulás értéke.

A potenciális energia növekedése: $E_p = mgL$

Ha feltételezzük, hogy ez a megközelítés igaz bármilyen alakú kráterre; akkor csak egy alaki tényezőt kell bevezetnünk a kráter bármilyen alakúra való kiterjesztéséhez. Ez az alaki tényező ugyanaz lesz minden becsapódásnál mindaddig, amíg a kráter alakja hasonló marad a kísérletek során.

Egy hipotézis lehet az is, hogy nagyobb sebességeknél mélyebb kráter jön létre, vagy nagyobb anyagtömörödés, esetleg eltérő kráter formák. A homok konzisztenciája (pl. nedvesség, szemcseméret) egy olyan másik paraméter lehet, ami befolyásolni tudja a kráter alakját.

Tehát $E_p = mgLf_c = L^3\rho gLf_c = L^4\rho g f_c$, ahol f_c a kráter alakjára vonatkozó tényező

A lyuk kiásásához szükséges potenciális energia megegyezik a golyón közvetlenül az ütközés előtti kinetikus energiájával, ami nem más, mint a golyó zuhanás során bekövetkezett potenciális energiavesztése a (feltéve, hogy a levegő ellenállása miatt nincs veszteség).

A golyó kinetikus energiája közvetlenül a becsapódás előtt: $E_k = mgh$, ahol h a golyó ejtési magassága. Mivel modellünkben nem veszünk figyelembe semmilyen energiavesztést, ezért közvetlenül az ütközés előtt a lefelé haladó golyó potenciális energiája az anyag kidobását eredményező kinetikus energiává alakul át: $mgh = L^4\rho g f_c$ ezért a kráter méretének negyedik hatványa arányos lesz az ejtési magassággal, vagy a becsapódó golyó tömegével:

$$h \approx L^4 \text{ illetve } m \approx L^4.$$

Az elmélet alapján tehát azt várjuk, hogy a golyó ejtési magassága vagy a golyó tömege a (kráter nagysága)⁴ függvényében ábrázolva egy egyenes lesz, mivel a többi paraméter (a sűrűség, a nehézségi gyorsulás és a kráterek alakja) állandó.

A hatványtörvény

Egy másik megközelítés szerint a kísérleti vizsgálatok kimutatták, hogy a meteorit $E = \frac{1}{2}mv^2$ kinetikus energiája és a keletkező kráter D átmérője között hatvány összefüggés van (Bunce, 2006, Leicester University).

A kráter elmélete szerint: $D = kE^n$, ahol k és n (nem egész) konstansok

A fenti egyenlet természetes logaritmusát véve: $\ln(D) = n \cdot \ln(E) + \ln(k)$

Így az $\ln(D)$ görbéje (az y tengely mentén) az $\ln(E)$ függvényében (az x tengely mentén) felrajzolva lineáris kapcsolatot eredményez, ahol n az egyenes meredeksége, és k a metszéspont.

8.3 A marsi kráterek helyének meghatározása (tanári segédlet)



A MARS
KRÁTEREK
HELYÉNEK A
MEGHATÁROZÁSA
14-18 éveseknek

3. óra

Ez a gyakorlat ötvözi az első foglalkozás (kráter méretének a meghatározása) keretében megtanult módszereket, mely által a diákok eljátszhatják az Insight tudósainak szerepét, vagyis hogy a szeizmométer jelei alapján egy újonnan keletkezett becsapódási krátert kell megkeresniük. Ez a feladat bemelegítésül szolgál a HiRISE képalkotási tevékenységéhez, és lehetővé teszi, hogy a diákok ráhangolódjanak arra, mit is kell tenni, mikor majd valódi becsapódás történik, hogyan lehet információt kinyerni a megkapott adatokból.

FELADAT

Osszuk ki a tanulóknak az útmutatót, a feladatlapot és a becsapódás előtti műholdképet. Magyarázzuk el, hogy a feladatot – a becsapódás helyének durva behatárolását - önállóan kell megoldaniuk. Miután elkészültek, a megoldás helyességét ellenőrizni lehet a „03-HogyTalalunkBecsapodast.pptx” prezentáció útmutatásai alapján.

Útmutató és feladatlap: kráterkeresés (diákoknak)

FORGATÓKÖNYV

Te egy tudós vagy, aki a Mars Insight küldetésén dolgozik, és akinek a Marsra lerakott szeizmométer adatait kell elemeznie. Az alábbi adatlapon található információk és a rendelkezésre álló eszközök segítségével határozd meg a meteorit becsapódásának helyét!

P- és S-hullámok

A P-hullámok longitudinális (vagy nyomás) hullámok, olyanok, mint ami egy kifeszített rugón végigszalad, amikor hosszirányban adunk neki egy ütést. (A részecskék rezgésének iránya megegyezik a hullám haladási irányával.) A P-hullám a leggyorsabban haladó szeizmikus hullám. Egy földrengés vagy becsapódás során ezt jelzi elsőként a szeizmométer.

Az S-hullám transzverzális hullám, olyan, mint ami egy kifeszített rugón végighalad akkor, amikor a rugót a kifeszítés irányára merőlegesen ütjük meg. Az S-hullámokban a részecskék a hullám terjedési irányára merőleges síkban rezegnek. Ez történhet függőleges vagy vízszintes síkban, vagy a kettő bármilyen kombinációjában. Az S-hullám terjedési sebessége kisebb, mint a P-hullámé, ezért ez a második impulzuscsomag a szeizmogramon.

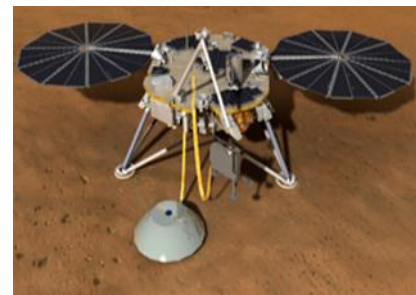
Az S-P futásidő-különbség

TANULÁSI CÉL

- epicentrum
- longitudinális és transzverzális hullámok tulajdonságai

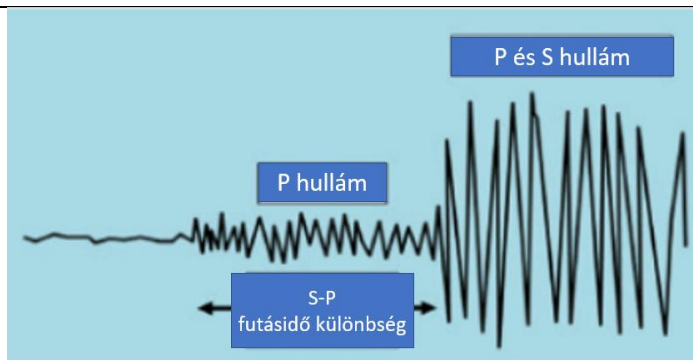
KELLÉKEK

- útmutató
- feladatlap
- vonalzó
- iránytű
- szögmérő
- ceruza
- számológép
- „03-HogyTalalunkBecsapodast” (PPT prezentáció)

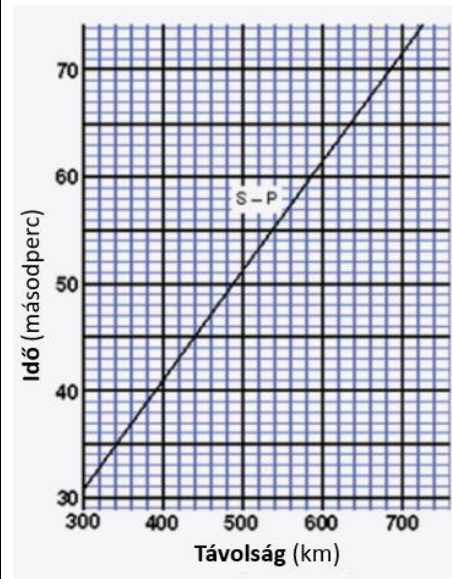


FOGALMAK

- transzverzális hullám
- longitudinális hullám
- P (primer) hullám
- S (szekunder) hullám



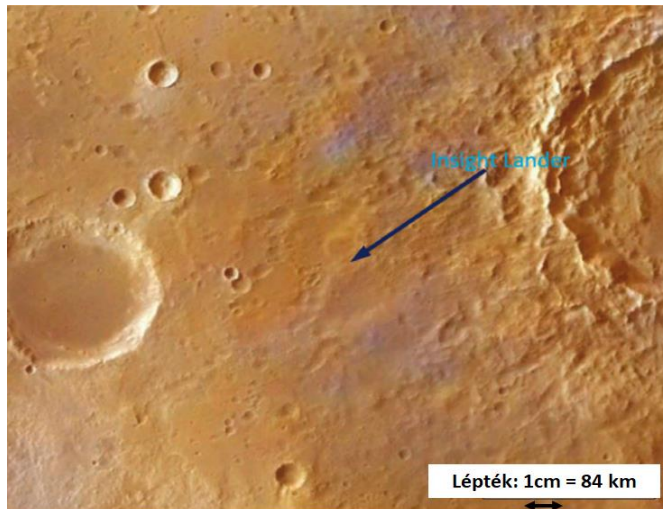
Mivel a P-hullámok a Mars talajában is gyorsabban haladnak, mint az S-hullámok, a szeizmométer ezt érzékeli először. Az InSight-től minél nagyobb távolságban történt az esemény, annál nagyobb lesz az S- és a P-hullámok beérkezése között az időkülönbség. Ez a jobb oldali grafikon segítségével lehetőséget ad arra, hogy meghatározzuk, milyen messze történt a becsapódás a leszálló egységtől.



Az adatok elemzéséből az alábbiakat tudjuk:

- Az S-P futásidőkülönbség = 53 másodperc
- A becsapódás a leszálló egységtől 60 fokban Ny-i irányban történt

Meg tudod becsülni a becsapódás helyét?



Karikázd be azt a helyet, ahol véleményed szerint az InSight által detektált becsapódás történt.

S-P időkülönbség = 53 s

Tehát a leszállóegységtől való távolság: km

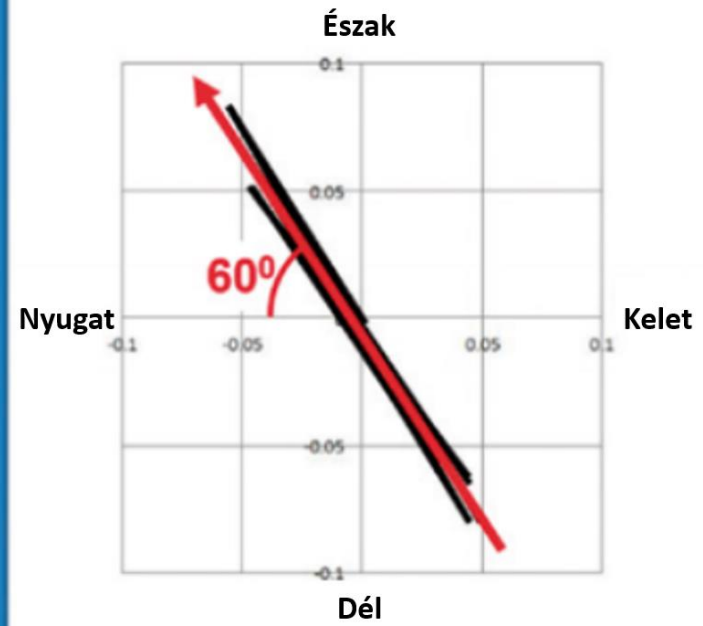
A becsapódás szöge 60° Ny-i irányban

Szeizmométerek

Észak - Dél



Kelet - Nyugat



8.4 Hullámok: Meteorit-becsapódások keltette szeizmikus hullámok amplitúdójának vizsgálata



Az 2018-ban elindult űrmisszió során egy szeizmométert terveznek lerakni a Mars felszínére. A majdnem hét hónapos utazás után a tudósok arra számítanak, hogy szeizmikus hullámokat tudnak detektálni, amiket a vörös bolygóra becsapódó meteoritek okoznak. A Marsról készült műholdképek felhasználhatók az új kráterek azonosítására. Ha sikerül megtalálni ezeket az új krátereket, és a tudósok képesek lesznek a szeizmikus jeleket felhasználni arra, hogy kiszámítsák mekkora energiával csapódtak be, akkor egyre többet fogunk megtudni a Mars belsejéről.

Ebben a feladatban képzeletben az egyik missziós projektsoporthoz csatlakozunk. A csapat feladata, hogy megmérje a meteorit által okozott szeizmikus hullámok amplitúdóját.

FELADAT: AZ AMPLITÚDÓ MÉRÉSE

A BECSAPÓDÓ METEORIT MODELLJE

A vizsgálat során különböző felületekkel és testekkel fogunk kísérletezni. A becsapódó test mérete és tömege nagyban befolyásolja az eredményt. A leghatékonyabb becsapódó testnek egy krokett készletből származó, az alábbi ábrán látható nehéz műanyag golyó bizonyult.

BECSAPÓDÁSI TERÜLET

A becsapódási területet gondosan meg kell tervezni és ki kell próbálni a kísérletek megkezdése előtt. Nagyon kemény felületek, például padlók kiválóak erre a célra. Az alábbi képen látható mozgatható tudományos bemutatópult nagyon hatékonyan bizonyult. Az oldalszegélyek lehetővé tették, hogy a terület puhább anyaggal, mint például homokkal kitölthető legyen, ez által az eltérő tulajdonságú talajok hatása összehasonlíthatóvá vált.



Telefon, vagy Tablet

A SZEIZMOMÉTER ALKALMAZÁS

Számos ingyenesen letölthető alkalmazás található az interneten, amelyek a táblagépek vagy okostelefonok gyorsulásmérő szenzorját használják fel. Az ebben a feladatban használt alkalmazás: Seismometer 6th (SkyPaw Co. Ltd) volt (<https://apkpure.com/seismometer-6th/com.skypaw.seismometer>). A szeizmométert úgy állították be, hogy a z-tengely irányában gyűjtsön adatokat, miközben az amplitúdó mérését végezzük. Az alkalmazásban használt egyéb beállítások az alábbi ábrán láthatók:

(A <https://play.google.com/store/search?q=seismometer%20app&c=apps&hl=hu> helyről számos más alkalmazás is kipróbálható.)

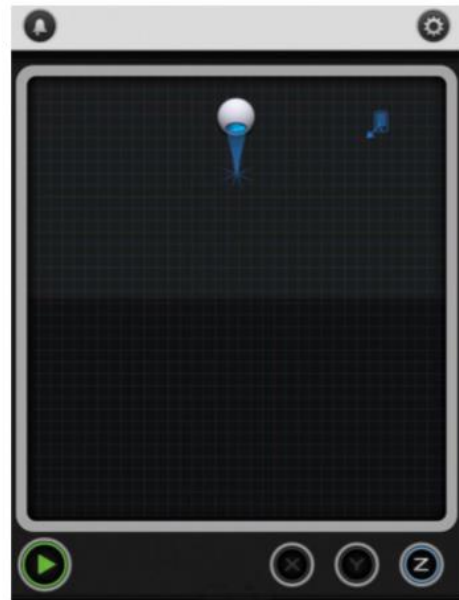
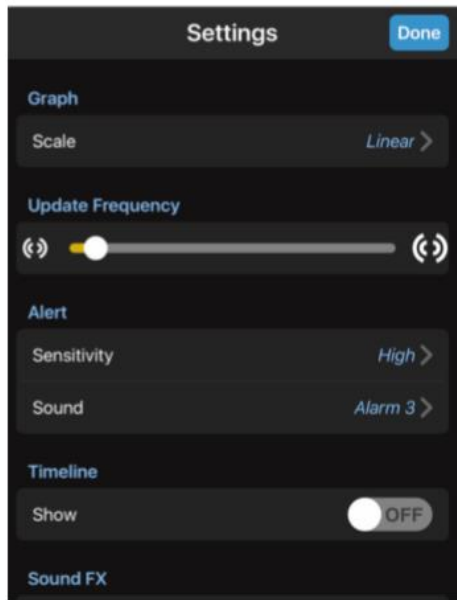
TANULÁSI CÉL

- a becsapódó test szerepe a szeizmikus hullámok keltésékor
- a hullámok amplitúdója
- a változók (kontroll paraméterek) jelentősége annak érdekében, hogy megbízható adatokat kapjunk
- adatok felvétele távérzékelővel
- pontos grafikon készítése a felvett adatokból
- mintázatok és összefüggések feltárása az adatok és a grafikonok elemzéséből

KELLÉKEK

- különböző méretű golyók
- szegélyezett becsapódási terület
- telefon vagy táblagép
- szeizmométer alkalmazás
- mm-papír a grafikonok felvételéhez





A GYAKORLAT

3 féle módon kísérletezhetünk

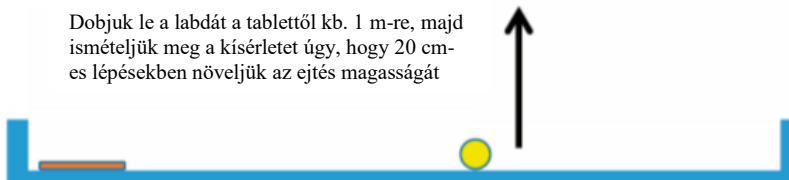
1. A rezgés amplitúdójának függése a becsapódás távolságától

Dobjuk le a labdát 50 cm magasról, majd ismételjük meg a kísérletet úgy, hogy 20 cm-es lépésekben növeljük a becsapódás tablettől való távolságát



2. A rezgés amplitúdójának függése a becsapódó test sebességétől

Dobjuk le a labdát a tablettől kb. 1 m-re, majd ismételjük meg a kísérletet úgy, hogy 20 cm-es lépésekben növeljük az ejtés magasságát



3. A rezgés amplitúdójának függése a felszín anyagától

Ismételjük meg a kísérleteket úgy is, hogy a tartályt különböző anyagokkal, mint pl. homok, liszt, üveggyöngyök, ... töltjük fel.

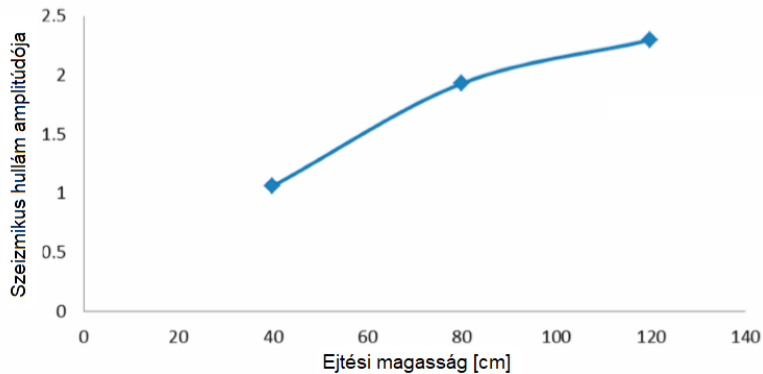


Elemzés és következtetések

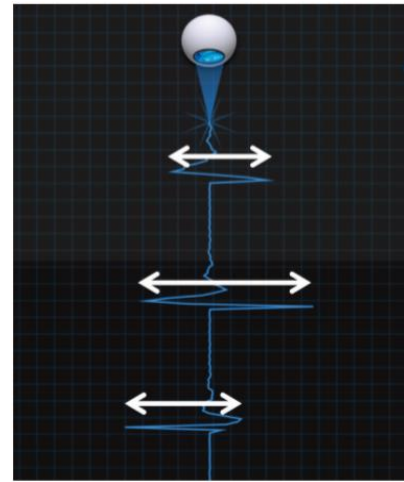
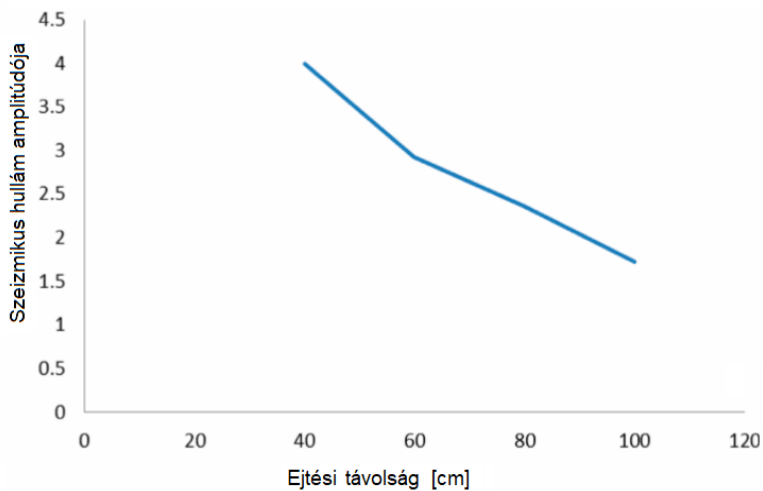
Az elvégzett kísérletek eredményét a mellékelt diagram mutatja. Bár az applikációnak van egy skálája, a hullám méretét a szerzők egy vonalzóval mérték meg, mm-es egységekben. Itt kell megjegyezni, hogy a hullám amplitúdója az egyensúlyi helyzettől való maximális kitérés. (lásd ábra). A nagyobb megbízhatóság érdekében az amplitúdó kétszeresét (a nyílak hosszát) mérték meg.

A jobb oldali képen látható három jelet ugyanazon „meteorit” okozta, mindhárom esetben ugyanabból a magasságról, és a tablettól ugyanolyan a távolságban leejtve. Ez jól szemlélteti a véletlen hibát. Ezért kell a mérési eredményeket átlagolni, amit a szerzők meg is tettek.

Egy jellemző mérési eredményt mutat az alábbi grafikon.



A becsapódás sebessége a $v = \sqrt{2gh}$ összefüggésből számítható, ahol h az ejtés magassága méterben, $g=9,81 \text{ m/s}^2$ pedig a gravitációs gyorsulás értéke.



8.5 Hullámok: A hanghullámok szilárd anyagban és levegőben való terjedése



A hullámok eltérő sebességgel terjednek a különböző anyagokban, azok eltérő belső szerkezete miatt. Ebben a kísérletben a diákok megfigyelhetik, hogy a hang szilárd közegben vagy gázban terjed-e jobban.

TANULÓI FELADATOK:

1. Tartsuk a drót vállfa tartót úgy, hogy az akasztója a talaj felé nézzen.
2. Rögzítsünk 1-1 drótot a vállfa felső sarkaihoz.
3. A drótnak kb. a felét csavarjuk fel a mutató ujjainkra úgy, hogy a vállfa szabadon tudjon lógni.
4. Hajoljunk előre úgy, hogy a vállfa előttünk lósson (győződjünk meg róla, hogy nem ér hozzá semmihez).
5. Az egyik tanuló a teáskanállal üsse meg a vállfát, és figyeljük meg, hogy mit hallunk ekkor.
6. Ismételjük meg ezt a kísérletet, de ezúttal az ujjainkat, melyekre a drót rá van csavarva, dugjuk a fülünkbe.
7. Mit fogunk hallani most?

A szilárd anyagok és gázok molekuláinak eltérő elrendeződése a kulcs a jelenség magyarázatához. Kérjük meg a diákokat, hogy magyarázzák el, miért hallják sokkal jobban a vállfa rezgését, amikor az ujjainkat a fülünkbe vannak dugva. Térjünk ki a következőkre:

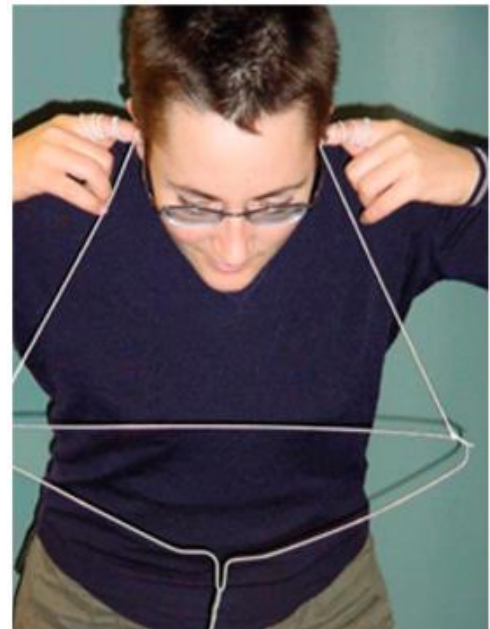
- A hanghullámok úgy terjednek az anyagban, hogy megrézzetnek az anyag molekuláit, amik ekkor egymáshoz ütköznek, ezáltal tovaterjed az energia.
- A gázokban sokkal lazábban kapcsolódnak egymáshoz a részecskék, mint a folyadékokban és a szilárd anyagokban, így több idő kell a részecskéknek az ütközéséhez. Ez a gázban lassabb terjedési sebességhez vezet, mint folyadékokban és szilárd anyagokban.
- A gázok molekulái minden irányban tudnak rezegni, és ez által a hangot továbbítani. A szilárd közeg molekulái szorosan kapcsolódnak egymáshoz, így viszont csak bizonyos irányban képesek rezegni, ami a hanghullám hatékonyabb terjedését teszi lehetővé.
- A vállfás kísérletben, amikor az ujjainkat a fülünkbe dugtuk, a hanghullámok a vállfáról a dróton és az ujjainkon keresztül közvetlenül a fülünkbe jutnak.

TANULÁSI CÉL

- a hang jobban terjed szilárd anyagban mint a gázokban
- a különböző halmazállapotú anyagok részecskemodellje

KELLÉKEK

- drótból készült vállfa
- két darab kb. 50 cm hosszúságú drót
- fém teáskanál



FELADATLAP

A hang különböző sebességgel terjed az eltérő - szilárd, cseppfolyós, illetve gáz halmazállapotú anyagokban. Az InSight tudósai ezt használhatják fel arra, hogy megismerjék a Mars belső szerkezetét. Derítsük ki, hogy a hang a szilárd anyagokban vagy a gázokban terjed-e gyorsabban.

Az alábbi négyzetekbe rajzoljuk be a molekulák elrendezését szilárd, folyékony és gáz halmazállapotú anyagok esetében.

szilárd	folyékony	gáz
---------	-----------	-----

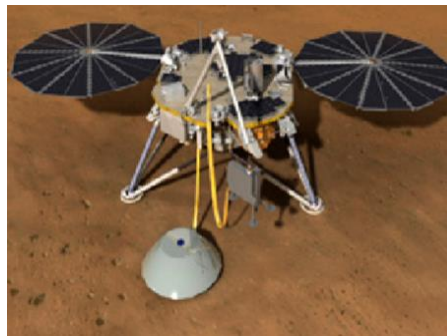
A hang longitudinális hullám. Ez azt jelenti, hogy a részecskék rezgésének iránya megegyezik a hullám haladási irányával. és a hullám az anyag részecskéinek ütközése révén terjed tovább.

Melyik halmazállapotú anyagban terjed a hang jobban és miért?

Teszteljük, hogy melyik anyagban terjed jobban a hang

1. Tartsuk a vállfa tartóját úgy, hogy az akasztója a talaj felé nézzen.
2. Rögzítsünk 1-1 drótot a vállfa felső sarkaihoz.
3. A drótnak kb. a felét csavarjuk fel a mutató ujjainkra úgy, hogy a vállfa szabadon tudjon lógni.
4. Hajoljunk előre úgy, hogy a vállfa előttünk lógjon (győződjünk meg róla, hogy nem ér hozzá semmihez).
5. Az egyik tanuló a teáskanállal üsse meg a vállfát, és figyeljük meg, hogy mit hallunk ekkor.
6. Ismételjük meg ezt a kísérletet, de ezúttal az ujjainkat, melyekre a drót rá van csavarva, dugjuk a fülünkbe.

Melyik esetben lehet a hangot jobban hallani? Amikor az ujjunk a fülünkben van, vagy amikor nincs? Tehát melyik közegben terjed jobban a hang?



FOGALMAK

- gáz
- molekulák
- szilárd, cseppfolyós és gáz halmazállapot
- sebesség
- hullám

8.6 A P- és S-hullámok modellezése spirálrugóval



Annak érdekében, hogy a tudósok a szeizmométerek segítségével hogyan tudnak megtalálni egy krátert a Marson, meg kell értenünk a két hullámtípus azon tulajdonságait, amelyeket a szeizmogramokon megfigyelnek. Ez a demonstráció lehetővé teszi a diákok számára, hogy megértsék a mechanikai hullámok alapvető tulajdonságait, és elemezzék a különböző tulajdonságú hullámokat.

A TANULÓK FELADATA:

Mi a hullám? Kérjük meg a tanulókat, hogy adjanak meg egy meghatározást arról, hogy szerintük mit jelent egy hullám. (Hullám lehet pl. a mexikói hullám is). Azt mondhatjuk, hogy a hullám az energia átadásának egyik módja. Azonban a legfontosabb jellemzője a hullámnak az, hogy az energia átadása az **anyag áramlása nélkül** történik.

A longitudinális és transzverzális hullámok leglátványosabban egy spirálrugó segítségével mutathatók be.

Válasszunk ki egy önkéntest az osztályból, és kérjük meg, hogy tartsa a rugó egyik végét. Feszítsük ki a rugót, és ügyeljünk arra, hogy az szabadon tudjon mozogni.

Kössünk egy színes szalagot az egyik spirálra, hogy könnyen megfigyelhessük a mozgását.

Longitudinális (hosszanti) hullám demonstrálása: Nyomjuk össze a rugó néhány menetét. Amikor hirtelen elengedjük őket, akkor szétugranak, és összenyomják az előttük levőket. Azok aztán újra szétugranak és az őelőttük levőket nyomják össze, és így tovább. A tekerescmenetek mozgása demonstrálja a részecskék mozgását egy anyagon áthaladó longitudinális hullámban.

Most ismételjük meg ezt a kísérletet, de a tanulók figyeljék meg a színes szalagot. Észre kell venniük, hogy hátra és előre ingázik egy pont körül, de maga a menet nem mozdul el véglegesen a nyugalmi helyzetéből. A hullám áthaladt a spirálrugón, átment rajta az energia, de egyetlen tekerescmenet sem változtatta meg véglegesen a helyzetét.

Kérjük meg a tanulókat, hogy mondjanak példát egy longitudinális hullámra, pl. hang. Megjegyezzük, hogy a mechanikai hullámok terjedéséhez valamilyen közegre van szükség.

Készítsünk fényképet a rugóban haladó hullámról! Mekkora a hullámhossz? (Két sűrűsödési hely középpontja közti távolság.)

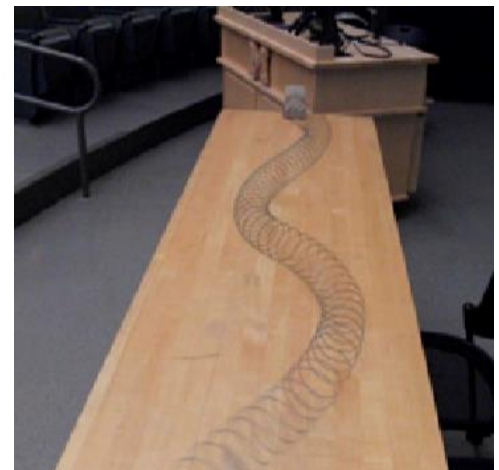
A hosszanti hullám az anyag összenyomódásából (ahol a részecskék egymáshoz a nyugalmi helyzetükhöz képest közelebb helyezkednek el), és ritkulásokból (ahol távolabb) állnak. A közeg részecskéi a nyugalmi helyzetük körül végeznek kis amplitúdójú (harmonikus) rezgő mozgást. A részecskék rezgési iránya megegyezik a hullám terjedési irányával.

TANULÁSI CÉL

- longitudinális és transzverzális hullámok és tulajdonságaik
- mit értünk hullám alatt?
- hullámhossz, amplitúdó és frekvencia

KELLÉKEK

- spirálrugó
- egy darab színes szalag
- kamera



A spirálrugó kiváló eszköz a longitudinális (hosszanti) és a transzverzális (keresztirányú) hullámok bemutatásához

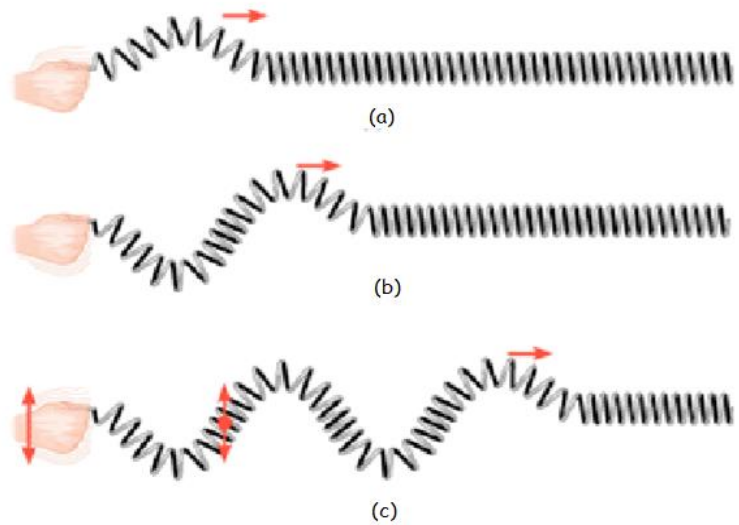


Transzverzális (keresztirányú) hullámok elemzése:



A keresztirányú hullám elemzéséhez ugyanazt a beállítást alkalmazzuk, mint a longitudinális hullámok esetében, de most a részecskék oszcillációja merőleges a hullám terjedésének irányára. Mozgassuk a kezünket oldal irányban ide-oda, hogy a hullám végig fusson a kifeszített spirálrugón. Kérjük meg a tanulókat, hogy találják ki, milyen típusú hullámmozgást látnak most. Mutassuk be a diákoknak, hogy ha folyamatosan mozgatjuk a rugót, akkor állóhullám keletkezik.

A transzverzális hullámokban a részecskék a hullám terjedési irányára merőleges síkban oszcillálnak. Míg a mechanikai hullámok terjedéséhez közegre van szükség, léteznek nem mechanikai hullámok is, mint pl. a fény, ami elektromágneses hullám, és sugárzással terjed. Az elektromágneses hullámban az elektromos és mágneses mezők "oszcillálnak".



Amplitúdó:

Szemléltessük az amplitúdó fogalmát úgy, hogy növeljük a mozgató kezünk kitérését. Ezután a csillapítást mutathatjuk be úgy, hogy néhány hullámot elindítunk a spirálrugón, és megkérjük a tanulókat, hogy figyeljék meg, mi történik az idő múlásával. Ahogy az energia elnyelődik a környezetében, a hullám amplitúdója lecsökken.

A hullámhossz és az amplitúdó mérése:

Készítsünk fényképet a spirálrugón végig haladó hullámról. Meg tudják-e határozni a diákok egy hullám hullámhosszát és amplitúdóját?

8.7 Hullámok: hangsebesség meghatározása levegőben



A Mars InSight misszió tudósai a különböző hullámok eltérő sebességének ismeretében tudják kiszámítani, hogy a meteoritek a leszálló egységtől milyen messze csapódtak be.

Ebben a kísérletben diákok a hang terjedési sebességét fogják meghatározni, levegőben. (A kísérlet elvégzése szélcsendes időben történjen!)

1. EGYSZERŰ VISSZHANG KÍSÉRLET

Ha ismerjük a fal távolságát, meg tudjuk határozni a hang terjedési sebességét a levegőben.

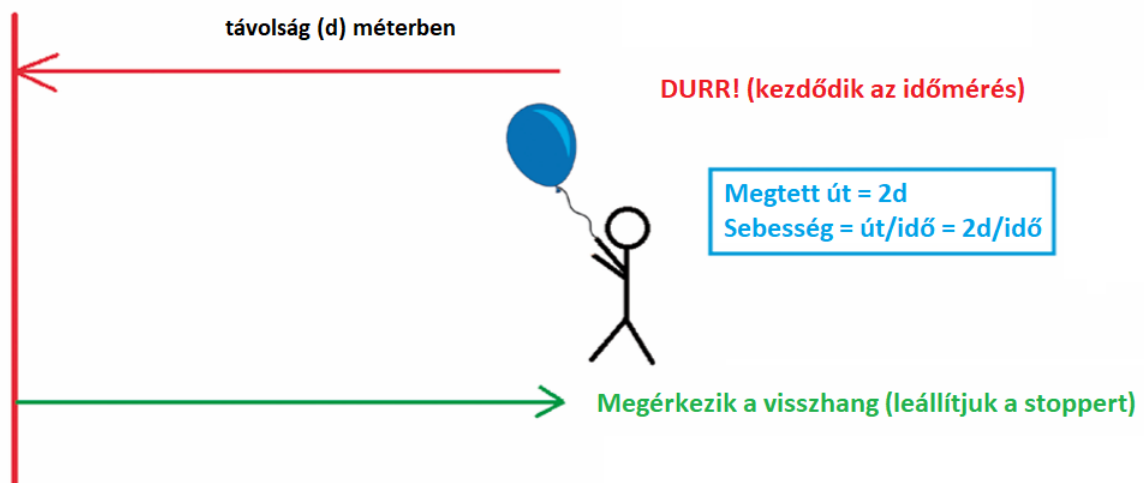
- Kell egy önkéntes, aki "lufit durrant" és három további önkéntes, akik az időt mérik. Egy mérőszalaggal meg kell mérni a faltól való távolságunkat (legalább 30 méter legyen).
- Legyen egy próba "durrantás", hogy a diákok tudják, mire kell számítani. Amikor a léggömb kidurran, az időmérők elindítják a stopperóráikat.
- Amint meghallják a visszhangot, a stoppereket leállítják, és a mért időket átlagolják.

TANULÁSI CÉL

- mérési hibák és mérési pontosság
- több mérés átlaga
- sebesség = távolság/idő

KELLÉKEK

- egy fal (30-50 méter távolságban)
- egy csomag léggömb
- két nagy darab fa, amik összeütve erős hangot adnak ki
- stopperórák
- mérőszalag



Mivel a hangnak ugyanazt a távolságot kétszer kell megtennie (a falig oda és vissza), a hangsebesség kiszámításához a következő egyenletet használhatjuk:

$$\text{sebesség}[m/s] = \frac{\text{távolság}[m]}{\text{idő}[s]} = \frac{2 \times (\text{a fal távolsága})}{(\text{a visszhang beérkezési ideje})}$$

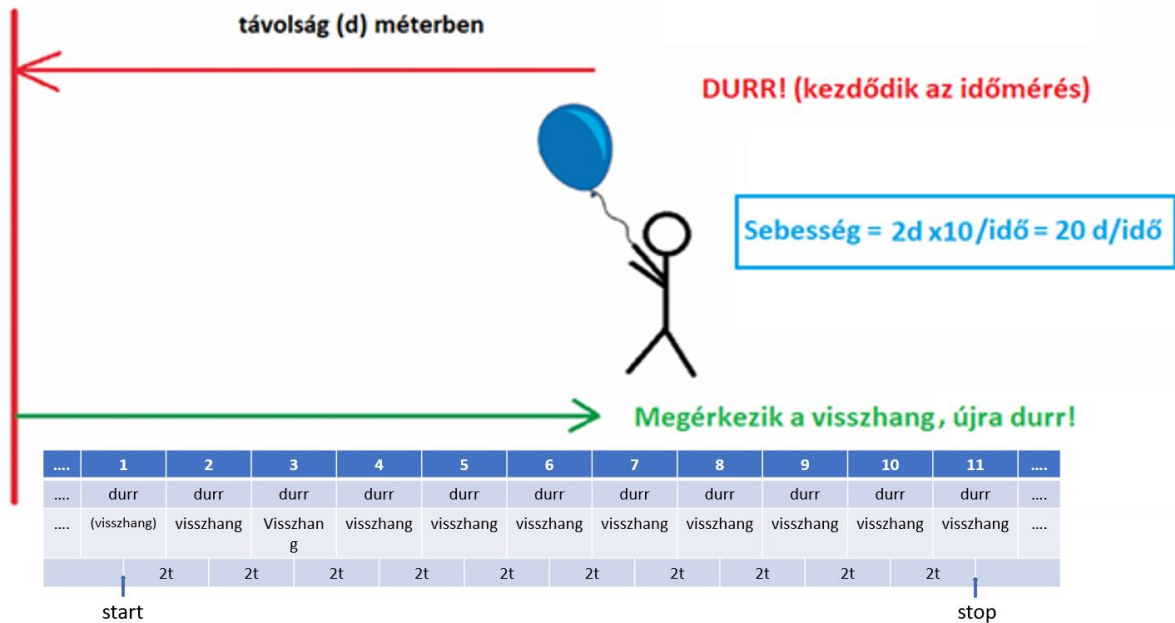
Van azonban néhány probléma ezzel a módszerrel. Kérjük meg a diákokat, hogy gondolkodjanak el azon, hogy mennyi emberi hibát rejt az időzítések mérése – ami már túl sok a pontos eredmény eléréséhez!

Javíthatjuk a pontosságot, ha meg tudjuk állapítani, mennyi időbe telik több visszhang terjedése. Ehhez a „durrantónak” abban a pillanatban kell hangot keltenie, amikor meghallja a visszhangot. A „durrantást” most két fadarab erős összeütése adja.

- Egy önkéntes lesz a "durrantó", a többiek pedig mérjék az időt. Egy mérőszalaggal meg kell mérni a faltól való távolságot (legalább 30 méter legyen).
- A "durrantó" üsse össze a két fát, és amint meghallja a visszhangot, ismételten üsse össze. Kérjük meg az időmérőket, hogy figyeljék a durranás hangját. Minden esetben csak egy durranást szabad hallani: egyszerre kell meghallani a fadarabok összeütését és annak a visszhangját. Ezt addig kell gyakorolni, amíg a „durrantó” fel nem veszi a ritmust.
- Ha a "durrantó" ritmusban van, akkor indulhat a stopper, és addig mérjenek, amíg 11 durrt nem hallottak. Ekkor kell megállítani a stoppereket, és átlagolni a három önkéntes által mért időt.

Mivel 11 durrantás között 10 időtartam van, ez 10 teljes futásidőt jelent (ld. ábra). Tehát a teljes távolság megtételéhez szükséges távolság 20-szorosa a fal távolságának.

$$sebesség[m/s] = \frac{távolság[m]}{idő[s]} = \frac{20 \times (a \text{ fal távolsága})}{(11 \text{ durranás közt eltelt idő})}$$



FELADATLAP

A Mars Insight tudósainak tudniuk kell, hogy milyen gyorsan terjednek a különböző rugalmas hullámok különböző anyagokban ahhoz, hogy meg tudják határozni, a szeizmométertől milyen messze történt a meteorit-beesés. Segíthetünk nekik a levegőben terjedő hang sebességének megméréseivel.

Hangsebesség mérése levegőben, egyetlen visszhang segítségével

Szélcsendes időben négy önkéntes álljon jó messze a faltól. Mérjük meg ezt a távolságot mérőszalag segítségével.

Egy önkéntes durrantson ki egy léggömböt, ez nagy hanggal jár. Amint a léggömb eldurran, a másik három önkéntes indítsa el a stopperóráikat.

Amikor az önkéntesek meghallják a visszhangot, akkor állítsák meg a stopperóráikat, és átlagolják a mért időket.

A kísérletet ismételjük meg háromszor!

Eredmények és számítások

Milyen messze voltak az önkéntesek a falról? m

Az alábbi táblázatba írjuk be az önkéntesek által három alkalommal mért időtartamot, azaz mennyi időbe telt, hogy a hang a falhoz érjen, onnan visszaverődjön, és meghalljuk a visszhangot.

	1. diák	2. diák	3. diák	átlag
Mért idő [s]				
Mért idő [s]				
Mért idő [s]				
átlag [s]				

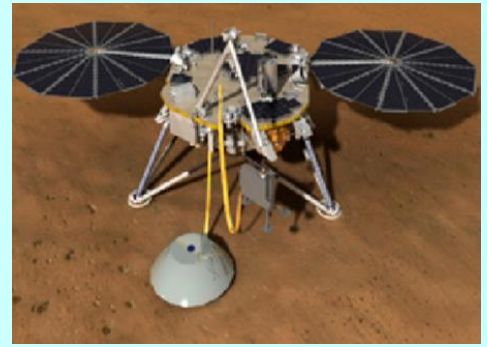
A hangsebesség levegőben:

Mekkora utat kell megtennie a hangnak, hogy eljusson a falhoz, és visszaérjen a megfigyelőkhöz? m

A hangsebesség levegőben = m/s

Mennyire volt megbízható az eredményünk? Mi a hiba fő forrása?

$$sebesség[m/s] = \frac{távolság[m]}{idő[s]} = \frac{2 \times (a \text{ fal távolsága})}{(a \text{ visszhang beérkezési ideje})}$$



FOGALMAK

- sebesség
- visszhang
- távolság
- idő

$$Sebesség = \text{út/idő}$$

Hangsebesség mérése levegőben, többszörös visszhang segítségével

A mérési pontosság többszörös futásidő méréseivel fokozható.

- Egy önkéntes lesz a "durrantó" és hárman mérjék az időt. Egy mérőszalaggal meg kell mérni a faltól való távolságukat, ami legalább 30 méter legyen.
- Ekkor a "durrantó" üsse össze a két fát, és amint meghallja a visszhangot, ismételten üsse össze. Kérjük meg az időmérőket, hogy figyeljék a durranás hangját. Minden esetben csak egy durranást szabad hallani: egyszerre kell meghallani a fadarabok összeütését és annak a visszhangját. Ezt addig kell gyakorolni, amíg a „durrantó” fel nem veszi a ritmust.
- Ha a "durrantó" ritmusban van, akkor indulhat a stopper, és addig mérjenek, amíg 11 durranást nem hallottak. Ekkor kell megállítani a stoppereket, és átlagolni a három önkéntes által mért időt.

A mérést ismételjük meg háromszor!

	1. diák	2. diák	3. diák	átlag
Mért idő [s]				
Mért idő [s]				
Mért idő [s]				
átlag [s]				

A hangsebesség levegőben:

Mekkora utat kell megtennie a hangnak, hogy eljusson a falhoz, és visszaérjen a megfigyelőkhöz? m

A hangsebesség levegőben = m/s

$$sebesség[m/s] = \frac{távolság[m]}{idő[s]} = \frac{20 \times (a \text{ fal távolsága})}{(11 \text{ durranás közt eltelt idő})}$$

Hogy lehetne tovább javítani a mérési eredményt?

8.8 Hullámok: a P és S hullámok demonstrációja egy dobozban



Egy doboz segítségével megmutathatjuk a diákoknak, hogyan lehet P- és S-hullámokat detektálni egy táblagép gyorsulásmérőjével. A demonstráció során megérthetik a diákok a különböző hullámok alapvető tulajdonságait, és elemezhetik azokat a szeizmogramok jelei alapján.

FELADAT: A DIÁKOK KÉSZÍTSENEK EGY DOBOZT

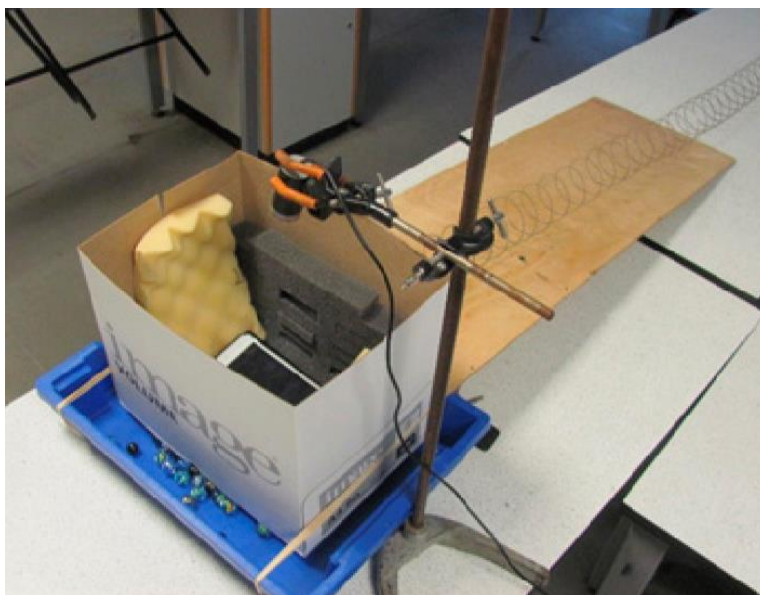
1. Tegyük a dobozba szivacsot úgy, hogy az a táblagépet megtartsa.
2. Rakjunk körülbelül 15 golyót a tálcába.
3. Rögzítsük a dobozt gumiszalaggal a tálcához. Próbáljuk rázogatni a dobozt, hogy ellenőrizzük, szabadon tud-e mozogni mindkét vízszintes irányban (lásd ábra).
4. Rögzítsük a spirálrugót a doboz oldalához a következő módon: a doboz oldalát kilyukasztjuk olyan magasságban, hogy a spirálrugó ne érjen a tálcához. A lyukba tekerjük be néhány menetet, majd a ragasztószalaggal rögzítjük a rugót. (Alternatív megoldásként egy testreszabott kötőelem is készíthető.)
5. A tálca széléhez helyezünk el egy lapot, hogy a rugó akadálytalanul, törésmentesen jusson az asztalról a dobozhoz.
6. Egy Bunsen-állvány és megfelelő szorítók segítségével állítsuk be a webkamerát, hogy lássa a táblagép képernyőjét. A webkamera képét kivetítve mindenki követheti a folyamatot.
7. Futtassunk a táblagépen egy megfelelő szeizmométer alkalmazást! Számos ilyen ingyenesen letölthető program létezik, amik nagyon egyszerűen használhatók. (A <https://play.google.com/store/search?q=seismometer%20app&c=apps&hl=hu> helyről számos alkalmazás közül választhatunk.) Célszerű, ha a kiválasztott alkalmazás a különböző irányú elmozdulásokat külön grafikonon mutatja, és a fel/le irány (Z tengely) kirajzolása kikapcsolható.

TANULÁSI CÉL

- a hosszanti (longitudinális) és keresztirányú (transzverzális) hullámok tulajdonságai

KELLÉKEK

- doboz (pl. egy fénymásolópapír doboza)
- tálca a felszereléseknek
- 2 nagy rugalmas szalag (pl. gumipók, postai gumigyűrű, ... stb.)
- spirálrugó
- kb. 15-20 golyó, vagy gyöngy
- tablet, szeizmométer alkalmazással
- szivacs
- hosszú asztal
- olló, ragasztószalag
- webkamera és kivetítő



A táblagépet tartalmazó fénymásoló doboz egy tálcába szórt golyókon ül. A dobozt rugalmas szalagok stabilan tartják, de szabadon el tud mozdulni mindkét vízszintes irányban.

A DEMONSTRÁCIÓ:

1. Indítsuk el a szeizmométer alkalmazást a táblagépen!
2. A rugó segítségével keltsünk longitudinális és transzverzális hullámokat, mint ahogy azt a „A P- és S-hullámok modellezése spirálrugóval” részben tettük. A webkamera képét kivetítve az eredményt az egész osztály láthatja. (Hasznos lehet, ha az egyik diák kezeli az alkalmazást, és egy másik pedig a rugón kelti a hullámokat, mert így a rögzített file rövidebb lesz.)
3. A kísérletben nem fog teljesen elkülönülni a P- és S-hullám, mivel az energia egy kis része mindig átjut az egyik rezgési módból a másikba (csatolt rezgések).
4. A diákok kipróbálhatják a kísérletet hosszabbra kinyújtott rugóval is. Van-e valamilyen hatása egy feszebb spirálrugónak az eredményekre?

8.9 A becsapódás iránya



Az Insight-on dolgozó tudósok két gyorsulásmérő szeizmogramjaiból határozzák meg a meteor becsapódás irányát. Az irány, az S-P futásidőkülönbség és a műhold képek alapján meg lehet határozni a Mars felszínére zuhant meteorit becsapódásának pontos helyét.

FELADAT: A DIÁKOK KÉSZÍTSENEK EGY DOBOZT

Megjegyzés: Futtassunk a táblagépen egy megfelelő szeizmométer alkalmazást! Számos ilyen ingyenesen letölthető program létezik, amik nagyon egyszerűen használhatók. (A <https://play.google.com/store/search?q=seismometer%20app&c=apps&hl=hu> helyről számos alkalmazás közül választhatunk.) Célszerű, ha a kiválasztott alkalmazás a különböző irányú elmozdulásokat külön grafikonon mutatja, és a fel/le irány (Z tengely) kirajzolása kikapcsolható.

1. Ragasszuk az A3-as papírt az asztalra.
2. Helyezzük a táblagépet a papírlap közepére és rajzoljuk körül - ez lesz a kiindulási helyzet.
3. Rajzoljunk tollal egy nyilat a papírra (amint az ábrán látható), hogy bejelöljük melyik irányban rázzuk meg először a táblagépet. Használjunk szögmérőt a szög méréséhez. A 60° vagy 30° a legalkalmasabb, mivel egyértelművé teszi, hogy melyik az x irányú hullám, és melyik az y.
4. Rázzuk meg a táblagépet előre és hátra e vonal irányában, és figyeljük a jelet.

ADATFELDOLGOZÁS

A keletkező fájlok e-mailben elküldhetők más számítógépekre. Ezek a fájlok Excel-be betölthetők, és az X és az Y irányú elmozdulás-adatok grafikonon kirajzolhatók. Ez azt is lehetővé teszi, hogy kiválasszuk a rögzített adatok azon részét, amiből meghatározható a kezdeti elmozdulás iránya.

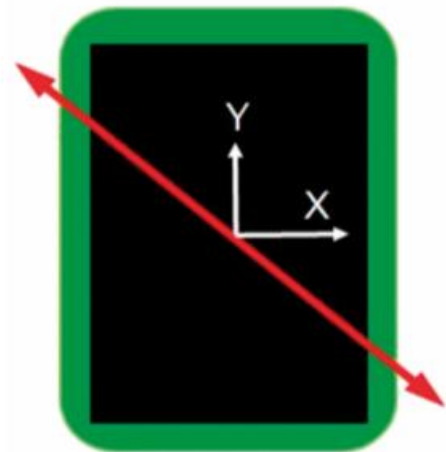
Az X-Y koordináta rendszerben felrajzolt görbe lehetővé teszi, hogy meghatározzuk a hullám beérkezésének irányát. Hogy jó szöveget kapjunk, fontos, hogy az X és Y skála felosztása megegyezzen az Excel által felajánlott lépték helyett.

TANULÁSI CÉL

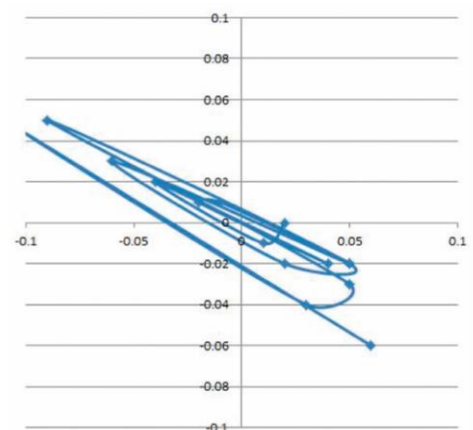
- a hosszanti (longitudinális) és keresztirányú (transzverzális) hullámok
- vektorok

KELLÉKEK

- táblagép
- webkamera
- A3-as írólap
- ragasztószalag



A papírlapra helyezett tablet az irányok bejelölésével.



Az EXCEL által kirajzolt diagram

8.10 P- és S-hullámok demonstrációja diákokkal



Ebben a feladatban a tanulókat arra kérjük, képzeljék el, hogy most ők lesznek a részecskék (nem atomok vagy molekulák, csak részecskék), amik szilárd (vagyis kötésekkel rendelkező) vagy folyékony (kötések nélküli) anyagot alkotnak. A részecskék közötti kötések a karjaikkal hozzák létre, így szemléltethetjük, hogyan haladnak a P- és az S-hullámok a különböző halmazállapotú anyagokban.

TANULÁSI CÉL

- a longitudinális (hosszanti) és transzverzális (keresztirányú) hullámok tulajdonságai
- a kötések és a részecskék elrendeződésének hatása arra, hogy a szilárd és a folyékony anyagok hogyan továbbítják a hullámot

KELLÉKEK

- kb. 10 diák

A GYAKORLAT

A longitudinális hullám (P-hullám) demonstrálása

- 10 diák az osztály előtt álljon egymás mellé, hogy a vállaik majdnem összeérjenek.
- Minden diák tegye a karjait a szomszédjai tőle távolabbi vállára (karolja át a nyakukat). Ők most a szilárd anyag részecskéi, és a karjaik a részecskék közötti erős kötést modellezzik. (A sor végén álló diákoknak nyilván csak egy szomszédja lesz.)
- Mondjuk el a diákoknak, hogy most a sor egyik végét meg fogjuk tolni, és nekik rugalmasan kell viselkedniük, tehát el kell mozdulniuk a nyomás hatására, majd vissza kell térniük az eredeti pozíciójukba.
- Óvatosan toljuk meg a sor egyik végén álló diákot! Ahogy a hullám terjed, minden diáknak egymás után kissé meg kell mozdulnia, és utána visszatérni az eredeti pozíciójába.
- Most a tanulók - továbbra is egymás mellett állva - engedjék le a kezeiket maguk mellé. Ezzel a folyadékban levő részecskék közötti gyengébb kötések szemléltetnek.
- Ismét óvatosan toljuk meg a sor egyik végén álló diákot! A P-hullám még mindig tud terjedni a "folyadék"-ban.

Mindkét esetben időre volt szükség, hogy a zavar eljusson a sor végére, vagyis a hullámnak van terjedési sebessége, ami valószínűleg észrevehetően nagyobb volt a „szilárd” anyagban. A „részecskék” oszcillációja ugyanabban az irányban történt, mint amilyen irányban a hullám terjedt.

A keresztirányú S-hullám szemléltetése

- 10 diák az osztály előtt álljon egymás mellé, hogy a vállaik majdnem összeérjenek.
- Minden diák kulcsolja össze a karját a mellette álló karjával, vagy karolja át a nyakát. Ők most a szilárd anyag részecskéi, és a karjaik a részecskék közötti erős kötést modellezzik.
- Mondjuk el a diákoknak, hogy most a sor egyik végét meg fogjuk mozgatni, és nekik rugalmasan kell viselkedniük, tehát el kell mozdulniuk a nyomás hatására, majd vissza kell térniük az eredeti pozíciójukba.
- A sor egyik végén álló diákot óvatosan léptessük előre (a sor irányára merőlegesen), majd húzzuk vissza.

Az S hullám a szilárd anyagban képes tovaterjedni, de ezúttal a részecskék mozgási irányára merőleges a hullám terjedési irányára (és valószínűleg lassabban, mint a P-hullámok esetén).

- Most a tanulók - továbbra is egymás mellett állva - engedjék le a kezeiket maguk mellé. Ezzel a folyadékban levő részecskék közötti gyengébb kötések szemléltetnek.
- Ismét léptessük előre, majd húzzuk vissza óvatosan a sor egyik végén álló diákot.

Ezúttal nincs hullámenergia-átvitel. A keresztirányú hullám nem képes folyadékban terjedni.



A diákok ezután megvitathatják, hogyan hat az anyag szerkezete és a részecskék közötti kötések erőssége a transzverzális és longitudinális hullámok terjedésre.



Megjegyzés: Ki lehet próbálni azt az esetet is, mikor a diákok libasorban állnak fel, és az előttük levő diák vállára helyezett kezükkel hozzák létre a kötést.

8.11 BBC micro:bit szeizmológia



Adatgyűjtés a BBC micro:bit egységből

Mivel a BBC micro:bit rendelkezik gyorsulásmérő chippel, magától értetődik, hogy a szeizmométerekről szóló oktatás középpontjába kerüljön.

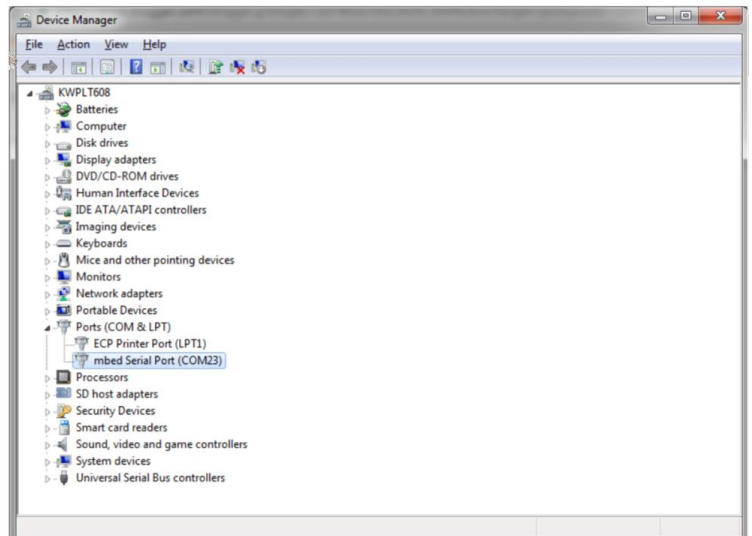
Megjegyzés: más, hasonló mikrokontrollerre, mint az ARDUINO család, vagy a RaspberryPI is kidolgozható hasonló feladat, de mivel ezekben nincs beépített gyorsulásmérő, külső szenzort kell használni (<https://1sheeld.com/accelerometer-module>).

ELMÉLET

1. Windows 10 előtti verziók esetén telepítsük az mbed soros illesztőprogramját a számítógépre hogy az a mikro:bit-el az USB-kábelen keresztül tudjon kommunikálni.
2. Írjunk kódot, amivel a micro:bit-ről a gyorsulás adatokat kiküldjük a soros vonalra.
3. Győződjünk meg róla, hogy a megfelelő mikro: bit eszközfájl telepítve van a jAmaseis számára.
4. Csatlakoztassuk össze az eszközöket!

Részletes útmutató

1. Feltéve hogy Windows operációs rendszert használunk, ha szükséges, a micro:bit-tel való kommunikációhoz telepítsük a soros illesztő programot: <https://developer.mbed.org/handbook/Windows-serial-configuration>. (Mac, Linux és Windows-10 esetében az operációs rendszer már eleve tartalmazza ezt az IoT szabványú protokollt.) Ez egy virtuális COM portot hoz létre a számítógépen, ami pl. Windows 7 alatt a Számítógép ... Tulajdonságok ... Eszközkezelő menü alatt ellenőrizhető.



Ezen a számítógépen COM23 porton érhető el a micro:bit

TANULÁSI CÉL

- hogyan működik a szeizmométer
- programozás grafikus szerkesztővel
- adatok begyűjtése a szenzorból
- a kapott adatfolyam grafikus megjelenítése

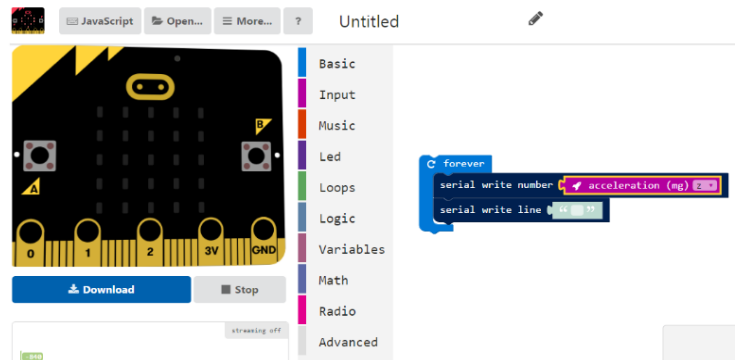
KELLÉKEK

- BBC micro:bit számítógép
- mikro-USB kábel
- PC az mbed virtuális soros port meghajtóval, a Serialplot és/vagy a jAmaSeis szoftverrel (mindegyik ingyenesen letölthető)
- 30 cm-es hajlékony vonalzó
- kb. 1 kg-os test

2. Írjunk egy pár soros kódot, ami kiküldi a gyorsulás adatokat a soros portra. Ez megtehető akár egy böngészőből is, a micro:bit weboldalán:

<https://codethemicrobit.com/>

A weboldal útmutatást tartalmaz, hogyan kell az elkészült programot betölteni a micro:bit-be.



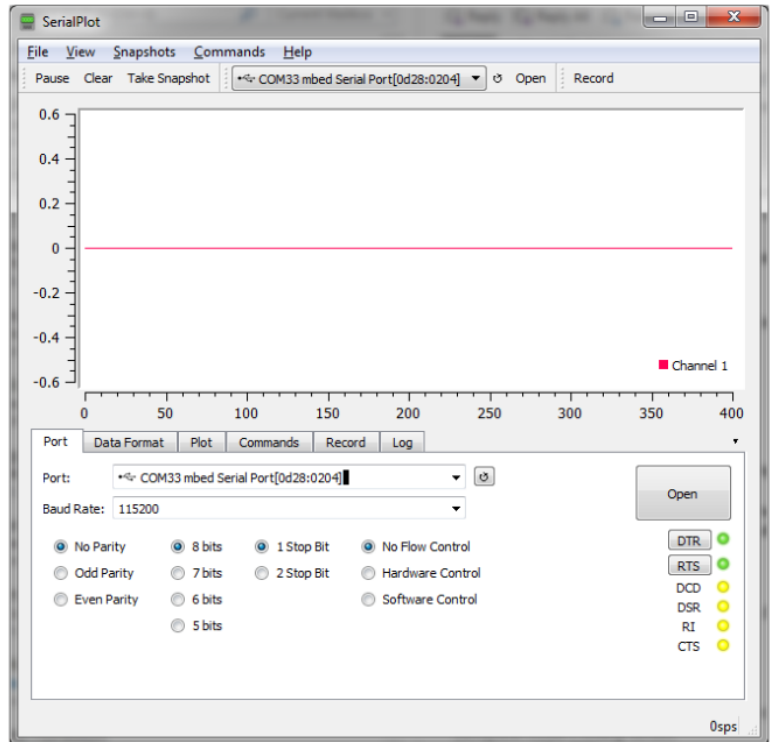
3. Az adatok megjelenítése a *Serialplot* program segítségével

A mikro: bitnek mostantól folyamatosan küldenie kell a gyorsulás adatokat az USB portra, melyeket a számítógép az előzőkben beállított soros porton keresztül (a jobb oldali képen látható példában ez most a 33-as port) tud venni.

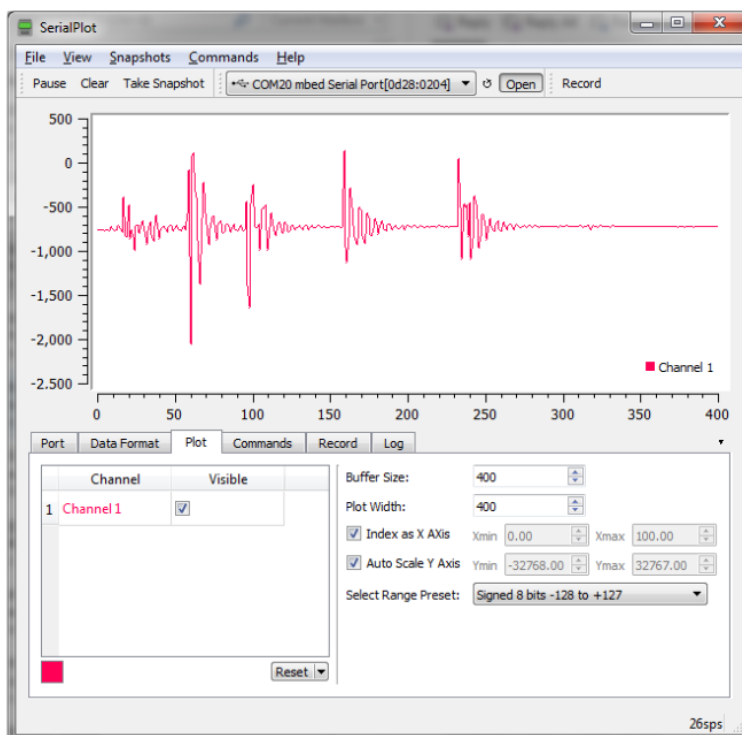
Az adatok grafikusan megjeleníthetők a *Serialplot* egyszerű és ingyenesen letölthető programmal:

<https://hackaday.io/project/5334-serialplot>

A szoftver beállításához ismerni kell a microbit által használt adatátviteli sebességet (115200 bit/s). Fontos, hogy a DataFormat menüben az ASCII-t válasszuk!



Az adatokat ezután valós időben lehet nyomon követni az ablakszélesség kiválasztásával és az "open" gomb megnyomásával.

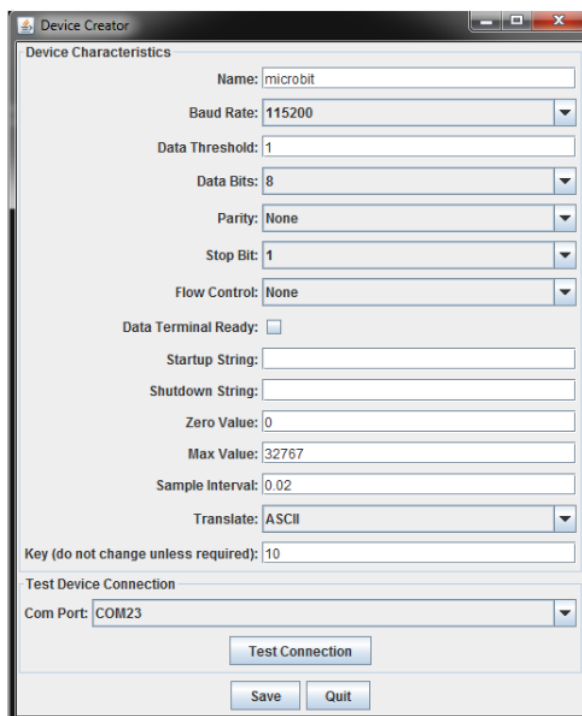


5. A **jAmaSeis** szoftver lehetővé teszi, hogy egyidejűleg három adatfolyamot is kirajzoljunk, jöjjön az akár a számítógéphez kötött szeizmométerből, akár távoli, az Interneten megtalálható adatforrásból. A program az alábbi helyről tölthető le: <https://www.iris.edu/hq/inclass/software-web-app/jamaseis>.

Új adatforrást felvehetünk a File menü alatt megtalálható varázslóval, vagy az installálási könyvtárból (alapértelmezésben „C:\Program Files\jAmaSeis”) indított parancsfájl segítségével.

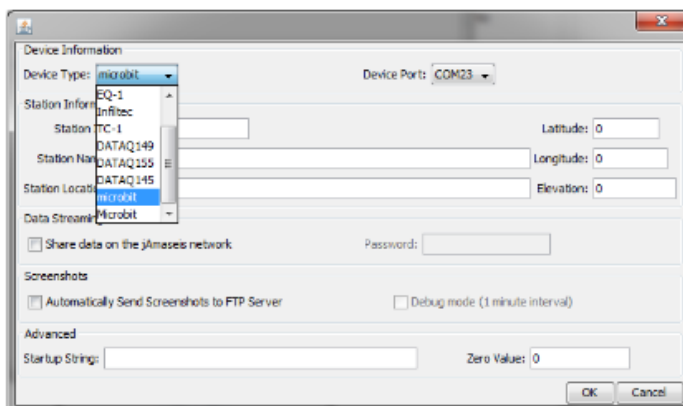
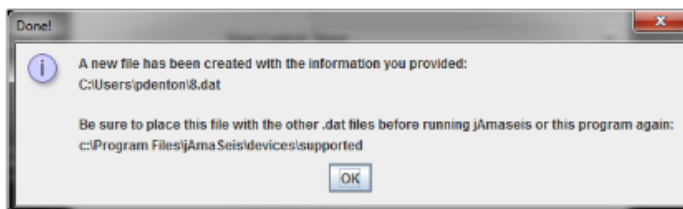
A döntő paraméter a baud rate = 115200, ez hozza létre az új eszközfájl: 8.dat, amelyet, ha máshol jött létre át kell másolni a megfelelő mappába:

„C:\Program Files\jAmaSeis\devices\supported”

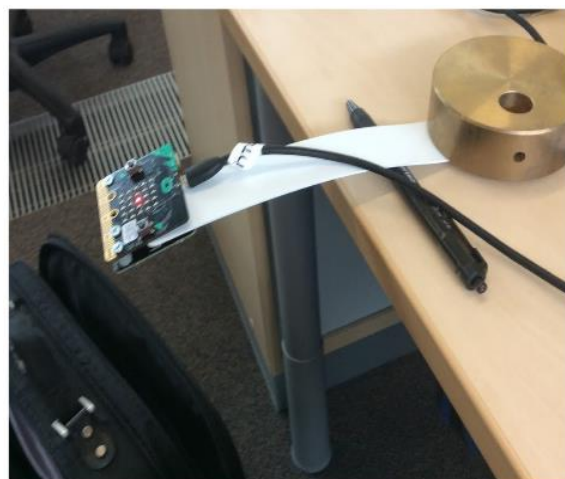


```
c:\>cd c:\program files\jamaseis
c:\Program Files\jAmaSeis>
c:\Program Files\jAmaSeis>java -cp jamaseis.jar edu.iris.epo.jamaseis.device.DeviceCreator
```

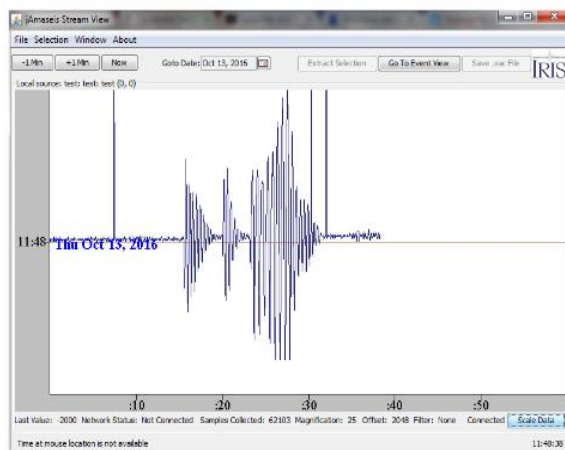
A jAmaSeis legközelebbi futtatásakor hozzá lehet adni a micro:bit egységet, mint helyi eszközt (ne felejtjük el a micro: bit eszközt kiválasztani).



A micro:bit gyorsulásmérőjének felbontása csak 1 mili-g. Ezért (remélhetően) nem igazán használható valódi földrengések mérésére. Azonban rezgő rendszerek rezonancia frekvencia méréséhez megfelelő, és tananyagként jól használható a szeizmométerek működésének megismeréséhez.



Kísérletünkben az jAmaSeis-el egy egy percnyi adatfolyamot rögzítve világosan látjuk, hogy épp mi történik



Micro:bit gyorsulásmérővel felvett adatok a jAmaSeis adatrögzítő szoftverrel



