

# Becsapódási kráterek a Földön

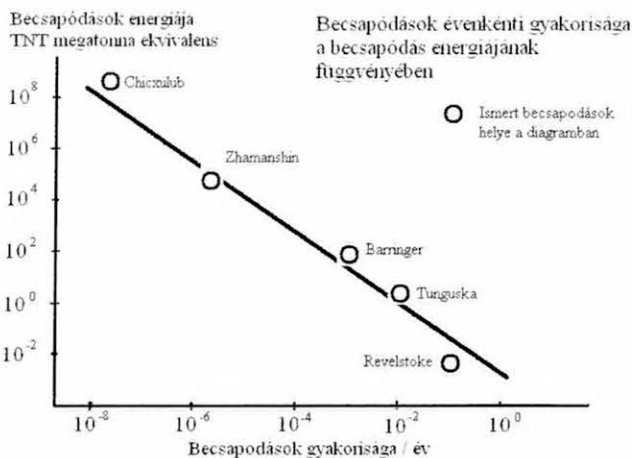
Ha közelebről megnézzük a Holdat, különösen a Hold túlsó, a Földről nem látható oldalát, akkor ott olyan bombázás nyomait találjuk, amelyhez képest a II. világháborús amerikai szőnyegbombázások, a „futottak még” kategóriába sem sorolhatók. Az ott látható nagyszámú és különböző méretű kráter, persze, nem is a „Szabadítók” (Liberator-ok) tevékenységének, hanem egy kozmikus méretekben zajló folyamatnak az eredménye. A kráterek úgynevezett „becsapódási kráterek” (*impact crater*), amelyek különböző méretű kozmikus testeknek a Holddal történő ütközése, a Holdba történő becsapódása révén keletkeztek. Pályáik kereszteszték a Hold pályáját és, mert méretük kisebb volt a Holdnál, ma a Holdon látható az általuk okozott, és nem egy nagyobb égitesten a Hold által okozott becsapódási kráter.

A Holdnak a Föld felé forduló oldalán kevesebb ilyen kráter van. Ennek magyarázata, hogy a Föld irányából érkező kozmikus bombák egy részét felfogta a Föld, vagyis ezek a Földbe csapódtak. A Föld ugyanúgy ki van téve a kozmikus bombázásnak, mint a Hold. Hogy miért nem látjuk akkor itt is a kráterrengeteget, arra a kérdésre a két égitest felszínének eltérő jellege adja a magyarázatot. A Hold felszíne gyakorlatilag halott, egy-egy morfológiai elemet, egy krátert akár évmilliárdokig is megőriz. A Föld felszíne ezzel szemben él és a bombázás üteméhez képest gyorsan változik, a hegységképződés és az erózió hamar leradírozza, a szubdukció és az üledékképződés hamar elsüllyeszti, letakarja a pillanatnyi morfológiai elemeket. Éppen ezért sokáig nem is ismerték fel a földi becsapódások (*terrestrial impact structures*) létét és jelentőségét. Igazán csak a XX. század második felében kezdtek a témával foglalkozni. A következőkben a becsapódási kráterekkel kapcsolatban felgyűlt ismereteket szeretném geofizikai szemmel röviden összefoglalni.

## A becsapódások gyakorisága

A Föld és a Hold a kialakulását követő időszakban a becsapódások gyakorisága igen magas, a mainak legalább százszorosa volt. A Hold felszínének legidősebb területei arról tanúskodnak, hogy akkoriban a felszín alakításának ez volt a legfontosabb tényezője. A jelenkortól visszafelé számított 4,6 és 3,9 milliárd év között a becsapódások gyakorisága gyorsan csökkent és körülbelül 3,8 milliárd évvel ezelőtt beállt a jelenlegi szintre. Azóta nagyjából állandónak tekinthető [GRIEVE 1990].

A becsapódások jelenlegi gyakoriságát GRIEVE nyomán az 1. ábra mutatja be. Látható, hogy a becsapódások energiája és az adott energiával jellemzett becsapódások gyakorisága fordítottan arányosak, minél nagyobb katasztrófát okoz egy esemény, annál kisebb bekövetkezésének valószínűsége. Vagyis olyan nagy energiájú becsapódás, mint amelyek a mexikói Chicxulub krátert létrehozta és amelyek a földi klímára és légkörre gyakorolt hatása a kréta végi nagy kihalásért felelős, 50–100 millió évenként egyszer várható, ugyanakkor az 1908-as szibériai Tunguzka meteor robbanásához hasonló események 100–200 évenkénti gyakorisággal ismétlődhetnek.



1. ábra. A kozmikus testek becsapódásának várható gyakorisága a becsapódáskor felszabaduló energia függvényében (GRIEVE adatainak felhasználásával)

## A becsapódási kráter kialakulása

A becsapódási kráter kialakulásának folyamata nagyon nagy mértékben függ a becsapódó test (*projectile*) Földhöz viszonyított sebességétől és tömegétől, hiszen ez a két tényező határozza meg azt a mozgási energiát, ami a becsapódáskor becsapódási energiaként jelentkezik.

Az aszteroidák átlagos, Földhöz képesti sebessége a szakirodalom szerint körülbelül 15–25 km/s [GRIEVE 1990], tehát rettenetesen gyors. Tömegük széles skálán változhat, ez a testet felépítő anyag minőségétől és a test méretétől függ.

A kisebb tömegű testek rendszerint el sem érik a földfelszínt, már a légkörben elégnak, felrobbannak. Az 1908-as szibériai Tunguzka meteorit méretét például négyszázötven méterre teszik és a becslések szerint körülbelül tíz kilométer magasan robbant a földfelszín felett. Ha eléri a földfelszínt valószínűleg az arizonai Barringer kráterhez hasonló méretű üreget üt.

A nagyobb meteoritok, ha tömegük nem haladja meg a 100 tonnát, energiájuk jelentős részét elveszíthetik a légkörön való áthaladáskor. Végül az 1000 tonnát meghaladó tömegű testek gyakorlatilag fékeződés nélkül törnek át a légkörre.

A földfelszínt elérve a becsapódó test mozgási energiája nyomássá és hővé alakul. A becsapódás helyének (*target area*) közeire (*target rocks*) és, természetesen magára a becsapódó testre is, a test energiájától függően akár 100 gigapaszkált meghaladó nyomás és több ezer °C-os hőmérséklet is hathat. Ez a becsapódó test és a célterület közeteinek robbanásszerű megolvadását és gőzzé alakulását eredményezi. Ez a robbanás alakítja ki a becsapódási krátert.

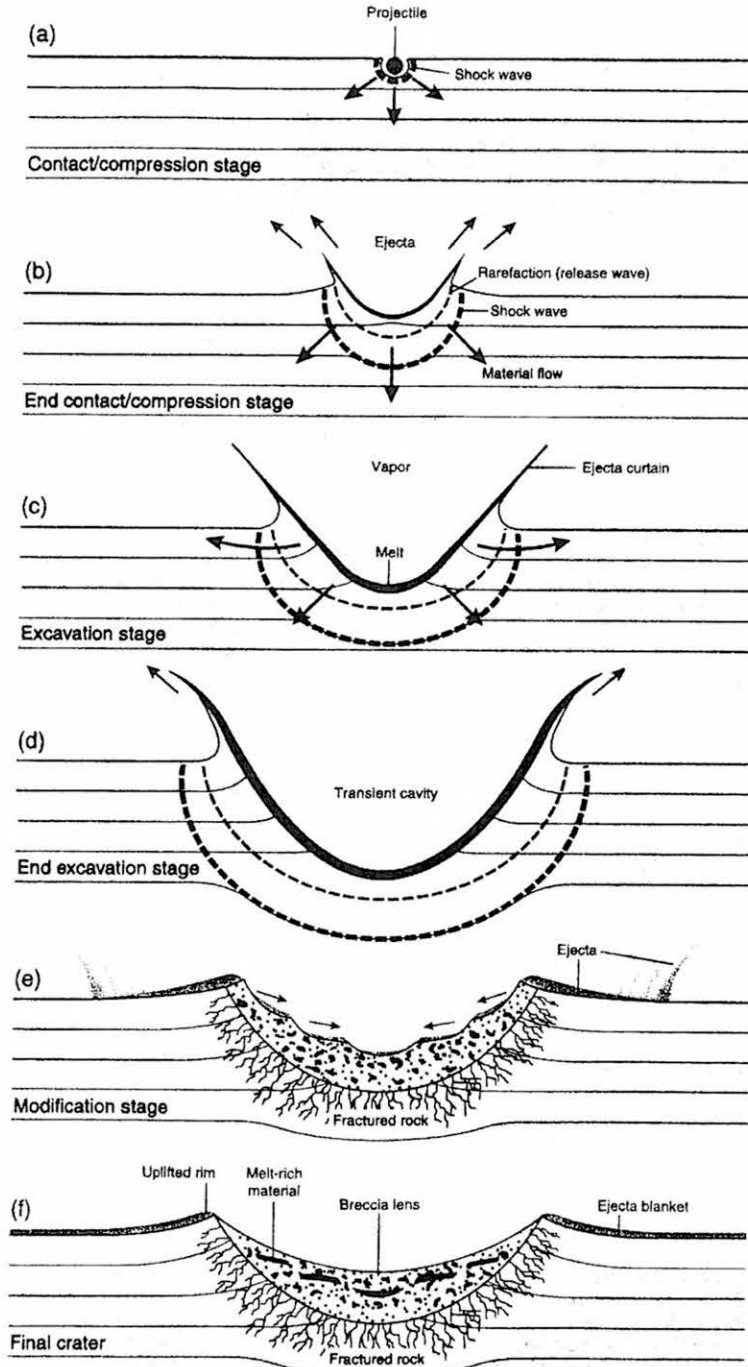
Ez a folyamat az oka annak, hogy a kráter, függetlenül a becsapódás irányától, mindig kerek. A kráterképző robbanás utólag eltörli egy viszonylag lapos szögben érkező test aszimmetrikus becsapódásának nyomát. És ez az oka annak is, hogy az ismert becsapódási kráterekben sokáig hiába

keresték a becsapódó testet, elgőzölt, illetve megolvadt anyaga elkeveredett a célterület kőzeteinek hasonló átalakulásán, illetve mechanikai felaprózódáson átment anyagaival.

A szakirodalom általában egyszerű (*simple*) és összetett becsapódási krátereket (*complex impact structures*) különböztet meg. A kettő között a kráterképző robbanás energiá-

jának mérete a különbség.

Egyszerű kráterek általában azok, amelyek átmérője nem haladja meg a 3–4 km-t. Jól ismert és alaposan megkutatott példa erre a kb. 1 km átmérőjű Barringer meteor-kráter Arizonában. Az egyszerű kráterek képződésének folyamatát a 2. ábra mutatja be:



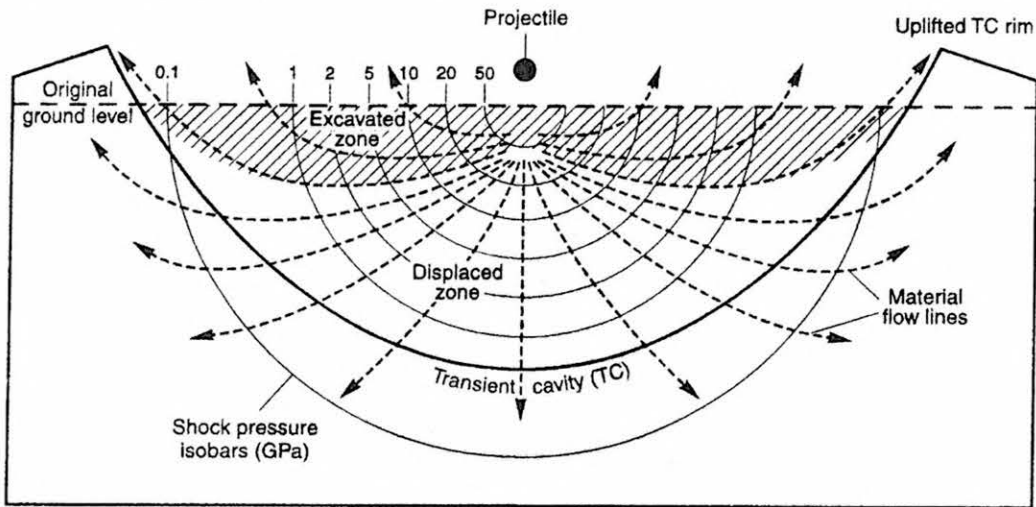
2. ábra. A kráterképződés folyamata egyszerű kráter esetén (FRENCH nyomán, courtesy LPI)

- (a) az érintkezés pillanata (*contact/compression stage*): a becsapódó test egy nyomáshullámot (*shock wave*) indít el a célterület kőzeteiben és ezzel ellentétes irányban önmagában is;
- (b) a kráterképződés kezdete (*end contact/compression stage*): a test hátoldaláról visszaverődő nyomáshullám (*rarefraction* vagy *release wave*) hozzáadódik a lefelé

- indított nyomáshullámhoz és ekkor a becsapódó test felrobban, a robbanás a célterület kőzeteit részben megolvasztja, részben összetöri és mind az olvadékat mind a törmelék egy részét kihajítja;
- (c) a kráterképződés (*excavation stage*): a robbanás energiája folyamatosan olvasztja és töri a kialakuló kráter alját, dobja ki az olvadékat és a törmelékét, ezzel egyre

jobbán kimélyítve a krátert, a kráterből kirepülő anyag (*ejecta*) valóságos függőnyt képez (*ejecta curtain*), a

kráter peremeit (*rim*) a nyomás megemeli (3. ábra);



3. ábra. A kráterképződés erőhatásainak mozgásainak és nyomásviszonyainak részletesebb képe (FRENCH nyomán, *courtesy LPI*)

- (d) a kráterképződés vége (*end excavation stage*): a kráterképzés felemészttette az energiát, a kráter mélyülése leáll és megindul a kidobott anyag visszahullása részben magába a kráterbe, részben a megemelt kráterperemekre (*uplifted rim*), az eredeti kőzetekben képződött, még visszatöltődés nélküli üreget nevezük átmeneti üregnek (*transient cavity*);
- (e) a kráterképződés utómozgásai (*modification stage*): a kialakult kráter környezetében erősen repedezett kőzetek (*fractured rock*), a kráter belsejében olvadéktörmelék durva breccsa képződik, amit a kidobott anyag egyre finomabb szemcsés visszauledő (*fallback*) rétegei takarnak be, a visszauledés a kráteren kívül is folytatódik, a krátertől távolodva egyre vékonyabb leplet (*ejecta blanket*) hozva létre, a kráter így kialakult nagyon meredek, de laza falai suvadásszerűen leomlanak, tovább növelve a kráter átmérőjét és csökkentve mélységét;
- (f) végállapot (*final stage*): a leírt folyamatok eredményeképpen a becsapódás helyén egy kerek, talszerű mélyedés áll elő, amelynek a peremei kiemelkednek a térszínből, ezt hívjuk kráternek, a krátert és környékét a visszahulló finom anyagok fedik, ez alatt a kráteren belül olvadék lencsékkel kevert breccsa, majd törmelék következik, míg legvégül az eredeti kőzet erősen repedezett zónája veszi körül az egésztest.

Az (a)–(d) szakasz eseményei mindössze néhány másodpercet vesznek igénybe, míg az (e)–(f) szakasz néhány óra alatt játszódik le.

A 4 km-nél nagyobb átmérőjű kráterek általában úgynevezett összetett kráterek. Képződésüknél nagyobb energia működik, mint az egyszerű kráterek esetében, a kráterképződés folyamata során így mélyebb átmeneti üreg keletkezik és a nagy nyomás és hőmérséklet hatására plasztikussá válnak az üreg alatt lévő kőzetek. Emiatt az üregképző energia elhasználódása után a környező kőzetnyomás hatására az üreg talpán megindul a kőzetek visszarámlása. Az egész folyamat rendkívüli módon emlékeztet a vízbe dobott kavics esetére, azzal a különbséggel, hogy itt a kőzeteket plasztikussá tévő energia szétsugárzik, a plasz-

tikussá vált kőzetek viszkozitása ezért igen gyorsan nő és egy ponton megállítja a folyamatot. Hogy a folyamat hol áll meg, ez a robbanásakor felszabadult energia mértékétől függ. Általában ez a leállás nagyon hamar bekövetkezik, ezért az összetett kráterek közepén van egy központi kiemelkedés (*central uplift*) és így maga a kráter már nem tál, hanem gyűrű alakú (*ring graben*). Nagyon nagy becsapódásoknál azonban a folyamat még ennél is tovább mehet, a központi kiemelkedés túlemlelkedik, majd visszaesik és mint egy vízgyűrű, elindul kifelé. A Holdon olyan krátert is ismernek, amelynek három ilyen gyűrűje is van, az ilyet többgyűrűs krátereknek (*multiring craters*) nevezik. Az összetett kráterek képződésének az egyszerű kráterekétől eltérő fázisait a 4. ábra mutatja be:

- (a) a kráterképződés: eddig minden ugyanúgy zajlik, mint a 2. ábrán bemutatott egyszerű kráterek esetében;
- (b) a kráterképződés végén a plasztikussá vált kráterfenéken megindul az emelkedés;
- (c) a kráterfenék emelkedése az utómozgások során is folytatódik, ugyanakkor megindul az erősen túlemlített kráterperemek leomlása is;
- (d) a végállapotban a kráter vízszintes kiterjedéséhez képest sekély, gyűrű alakú kráter jön létre, amely leginkább egy lapos kuglófsütőre emlékeztet.

### A becsapódási kráterek geofizikai jellemzői

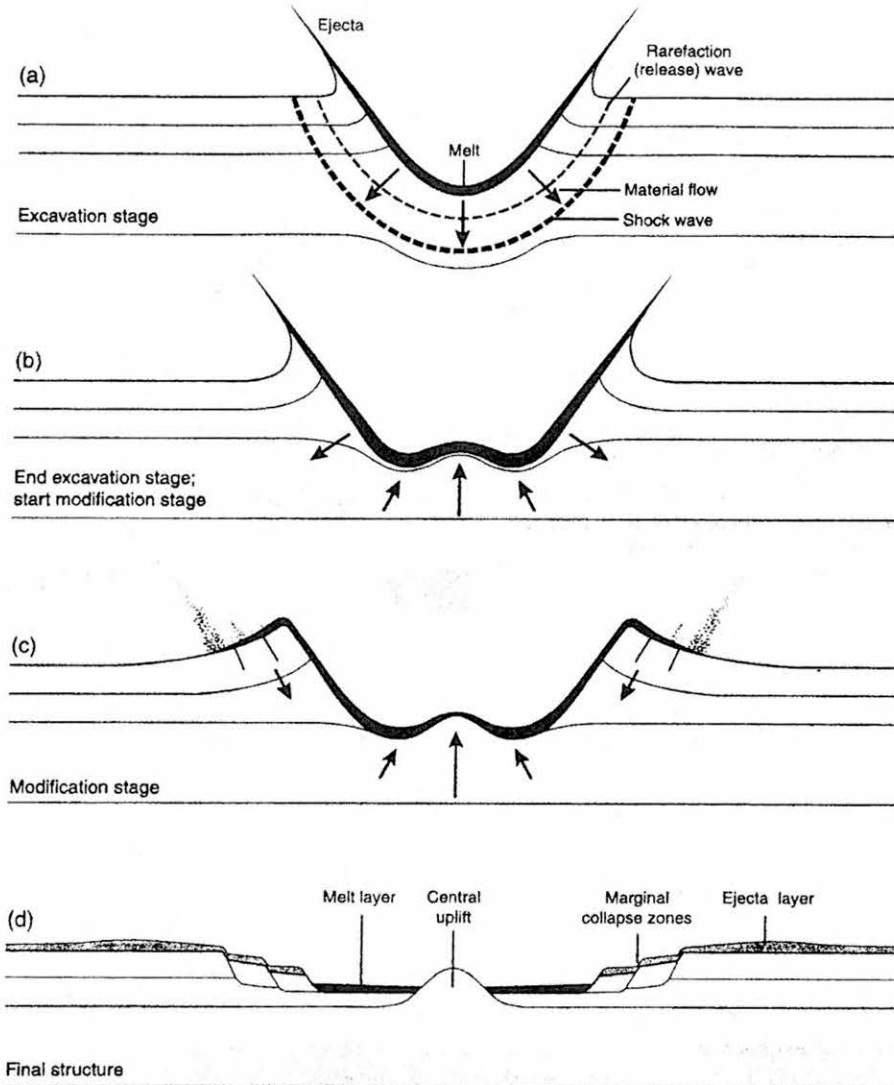
A becsapódási kráterek geofizikai jellemzőit PILKINGTON és GRIEVE 1992-ben az akkor ismert összes becsapódási kráter adatait figyelembe véve összefoglalta és közreadta, a következőkben elsősorban az ő adataira támaszkodom.

#### Gravitációs kép

A becsapódási kráterek általában negatív gravitációs anomáliával jelentkeznek, ennek oka egyrészt a krátert kitöltő lazább törmelékes anyag, másrészt a kráter alatti összetöredezett és fellazult zónának a környezeténél alacsonyabb sűrűsége. Az anomália mérete és amplitú-

dója azonban, természetesen, nagyon függ a kráter méretétől és helyzetétől. Egy, a felszínen lévő kráter lényegesen markánsabb anomáliát fog okozni, mintha ugyanaz a kráter egy 1 km vastag üledéktakaró alatt helyezkedik el. De függ az anomália észlelhetősége az adott terület gravitációs felmértésének sűrűségétől is, ha a mérés sűrűsége már nem teszi lehetővé annak a frekvenciának a kiemelését, amivel egy kisebb kráter hatása jelentkezik, akkor a kráter gravitációs anomáliája észrevétlen marad. PILKINGTON és GRIEVE nyomán az

ismert kráterek átmérője és gravitációs hatása közötti összefüggést a 5. ábra mutatja be. A diagramon látható, hogy míg a kisebb átmérőjű (<10 km) kráterek várható gravitációs minimuma, erős szórással ugyan, de mGal-ban megegyezik az átmérő km-ben számított méretével, addig a 100 km-t meghaladó átmérővel rendelkező kráterek hatása sem haladja meg a mínusz 20 mGal-t. Vagyis összefoglalva, a becsapódási kráterek egy sokszor az észlelhetőség határán mozgó negatív gravitációs maradékanomáliával jelentkeznek.



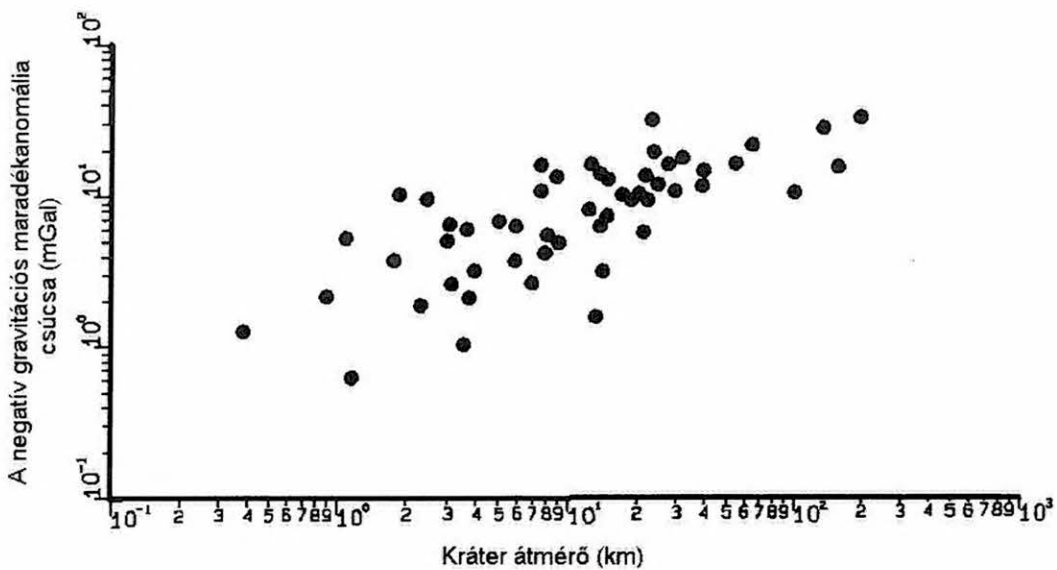
4. ábra. Az összetett kráter képződésének folyamata (FRENCH nyomán, courtesy LPI)

#### Mágneses hatás

A kőzetek mágneses viselkedésének összetettebb volta miatt a mágneses anomáliákat nem hozhatjuk a becsapódási kráterekkel olyan egyszerű kapcsolatba, mint azt a gravitációs hatások esetében megtehettük. Sok esetben a krátereknek nincsen felismerhető mágneses hatásuk, de ha van, akkor ez is általában egy kis amplitúdójú negatív anomália. A leginkább jellemző azonban, hogy a becsapódás megzavarja a célterület mágneses anomália képének jellegzetes lefutását, ha van ilyen. Természetesen itt is igaz, hogy ha van hatás, az csak megfelelően sűrű mérési hálózat (mintavételezés) esetén ismerhető fel.

#### Elektromos hatás

A célterület kőzeteinek breccsásodása, összetöredezése, felrepedezése közvetlenül nagy változásokat okozhat ezen kőzetek elektromos tulajdonságaiban is, mert a kőzetek vezetőképessége igen erősen függ víztartalmuktól. Kevesebb, mint 1% változás a víztartalomban több, mint egy nagyságrendnyi változást okozhat a vezetőképességben, így a kráterek töredezett és repedezett zónájának megnövekedő folyadéktartalma miatt az elektromos módszerek általában jól használhatók a becsapódási kráterek térképezésére.



5. ábra. A negatív gravitációs anomália csúcserőértéke a kráter átmérő függvényében (PILKINGTON és GRIEVE adatainak felhasználásával)

### Szeizmikus kép

A kráteren belüli törmelékes és az alatta lévő repedezett zóna a szeizmikus mérésekben mint egy csökkent sebességű zóna kell jelentkezzen. Ha a kráter a felszínen van, vagy fedett ugyan, de egy refrakciós határfelülethez kötődik, akkor ezt szeizmikus refrakciós mérésekkel ki lehet mutatni, illetve térképezni lehet.

Kellő mélységben lévő eltemetett kráterek a szeizmikus reflexiós szelvényekben geometriájuk révén ismerhetők fel. Ha a krátert jól harántolja a mérés, akkor a reflexiós szelvényben meg kell jelenjenek a kráter végállapotának jellegzetes geometriai formái.

### Geológiai bizonyítékok

Összefoglalva a becsapódási kráterek geofizikai jellemzőit, azt kell megállapítanunk, hogy néhány igazán szerencsés esetet kivéve ezek többnyire csak jelezhetik, valószínűsíthetik egy szerkezet becsapódási kráter voltát, de általában perdöntő bizonyítékot nem szolgáltatnak. Különösen igaz ez az eltemetett kráterek esetében. Éppen ezért bizonyítottan becsapódási szerkezetnek csak azokat a krátereket fogadják el, amelyekben megtalálhatók a becsapódás okozta óriási nyomás és hő hatására (*shock metamorphic effects*) metamorfizálódott jellegzetes úgynevezett becsapódási kőzetek és ásványok (*impactites*). Vagyis egy szerkezetről a végszót csak a fúrómagok kőzet- és ásványtani vizsgálata mondhatja ki.

A becsapódási krátereket katalogizálják, ezek a katalógusok a kráterek jellemzőivel és sok esetben fényképeivel megtalálhatók a világhálón.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti a *Lunar and Planetary Institut* (Houston, USA) nagylelkűségét, amellyel hozzájárult a 2. 3. és 4. ábra felhasználásához és újra publikálásához.

*The author thanks the Lunar and Planetary Institute (Houston, USA) for permitting the use and republication of figures 2, 3 and 4.*

### HIVATKOZÁSOK

- FRENCH B. M. 1998: *Traces of Catastrophe: a Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. LPI Contribution No. 945, Lunar and Planetary Institute, Houston
- GRIEVE R. A. F. 1990: *Impact Cratering on the Earth*. Scientific American April, p. 44–51
- PILKINGTON M., GRIEVE R. A. F. 1992: *The Geophysical Signature of Terrestrial Impact Craters*. *Reviews of Geophysics* 30, p. 161–168

Bodoky Tamás