

Az impakt szerkezetek helye a földtudományokban I.: A földi meteoritkráterek általános jellegzetességei és eloszlási jellemzői

MIHÁLYI Krisztián¹, GUCSIK Arnold^{2,3}, SZABÓ József¹, HARGITAI Henrik⁴, KERESZTURI Ákos^{5,6},
BÉRCZI Szaniszló⁷, NAGY Szabolcs⁸

¹Debreceni Egyetem, Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék, H-4032, Debrecen, Egyetem tér 1., Pf. 9., e-mail: k.mihalyi@freemail.hu

²Max Planck Institute for Chemistry, Department of Geochemistry, Joh.-J.-Becherweg 27., Mainz, D-55128, Germany

³Nyugat-Magyarországi Egyetem, Savaria Egyetemi Központ, Természetföldrajzi Tanszék, H-9700, Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4.

⁴ELTE TTK, Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkatató Csoport, 1117, Budapest, Pázmány P. st. 1/a

⁵Collegium Budapest, Institute for Advanced Study, 1014, Budapest, Szentháromság u. 2.

⁶Magyar Csillagászati Egyesület, 1114, Budapest, Bartók Béla út 11–13.

⁷ELTE TTK, Általános Fizika Tanszék, 1117, Budapest, Pázmány P. st. 1/a

⁸ELTE TTK, Kézeltani és Ásványtani Tanszék, 1117, Budapest, Pázmány P. st. 1/c

Role of impact structures in earth sciences I: General features of terrestrial impact structures and their distributions

Abstract

Impact craters are among the most common surface elements on the surfaces of the Earth-type planets, moons, asteroids and even on the comets. Morphological characteristics of these craters are well known, but their recognition on Earth is problematic because of erosional processes and vegetation cover of the surface. Their distributions are also important because crater-distributions show relative ages of different planet surfaces, which are comparable to other planet surfaces. Generally, it can be said that the larger the numbers of impact craters, the older the surface (assuming nearly continuous and similar cratering rates on different planet surfaces). Geographical distribution of meteorite craters on Earth's surface not only determined by cratering rates, but also modified by continent drifting (plate tectonics) and various post-impact erosional mechanisms (fluvial and aeolian processes, mass movements, sediment covering, etc.). Crater morphology also useful to study surface geology and other surface conditions of the planets.

Unequal distributions (different crater/area ratios on different surfaces) of terrestrial meteorite craters (by diameter and age) on different continents implies undiscovered meteorite craters (assuming similar cratering rates), or different rates of crater erosion.

Keywords: meteorite craters, impact structures

Összefoglalás

A becsapódási kráterek a legközönségesebb felszíni morfológiai elemek közé tartoznak a Föld-típusú bolygókon, a holdakon, a kisbolygókon, sőt, még az üstökösökön is. Ezen kráterek morfológiai jellegzetességei jól ismertek, de kimutatásuk a Földön nehézkes, a viszonylag gyors eróziós folyamatok és a felszín növényborítottsága miatt. Az eloszlásuk ugyancsak fontos, mert a krátereloszlások utalhatnak a különböző bolygófelszín-részletek relatív korára, amelyek összehasonlíthatóak más bolygók felszíneivel. Általánosságban elmondható, hogy minél több kráter van egy felszínen, annál idősebb (nagyjából állandó és hasonló mértékű kráterképződési intenzitást feltételezve a különböző égitesteken). A földi meteoritkráterek földrajzi eloszlását azonban nem csak a kráterképződési intenzitás határozza meg, módosítják azt a kontinensvándorlás (lemeztektonika), valamint a változatos eróziós folyamatok, amelyek a képződött kráterre hatnak (fluvialis és eolikus lepusztulás, tömegmozgások, üledékkel történő betemetődés stb.). A krátermorfológia segítséget nyújthat továbbá a bolygók felszíni geológiájának és egyéb jellegzetességeinek tanulmányozásához is. A földi meteoritkráterek nem-egyensúlyi eloszlásai (eltérő kráter/felületegység arányok a különböző felszíntípusokon) utalhatnak továbbá még fel nem fedezett meteoritkráterek léteire (egységes kráterképződési intenzitást feltételezve), vagy eltérő mértékű krátererózióra.

Tárgyszavak: meteoritkráterek, impakt-szerkezetek

Bevezetés

A meteoritkráterekkel kapcsolatos kutatások a 20. század második felétől, az űreszközök terjedésével párhuzamosan lendültek fel, habár már az ezt megelőző évtize-

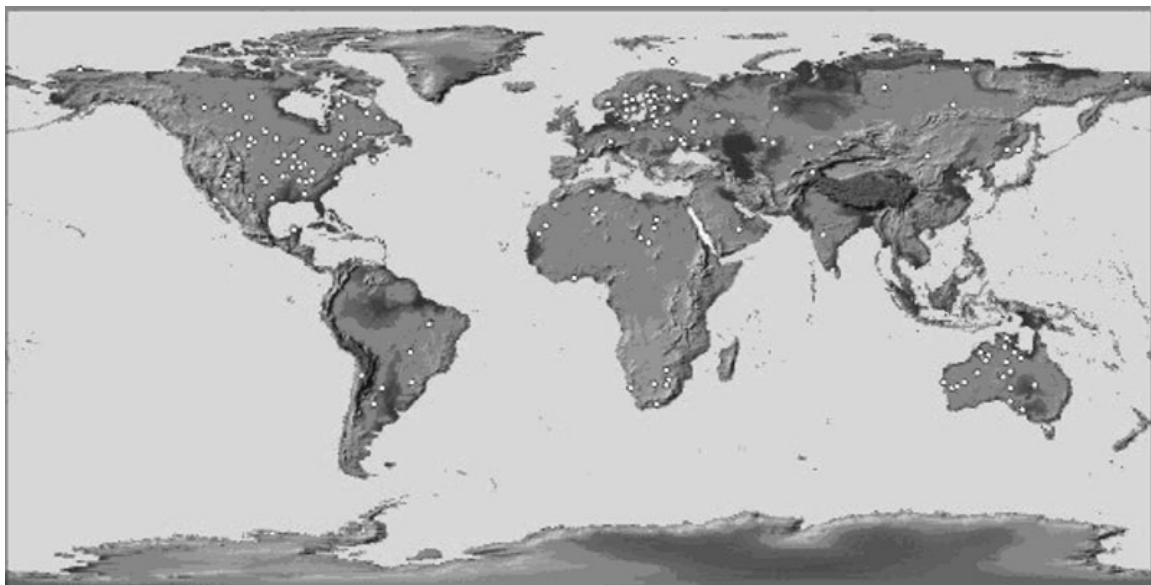
dekben (sőt, évszázadokban) is foglalkoztak érintőlegesen a témával. A legelső magyarázatok a 17. században születtek a kráterek eredetére vonatkozóan: az angol fizikus, Robert HOOKE megfagyott, majd pedig beomlott gázbuborékoknak tartotta a holdi krátereket (BÉRCZI et al. 2005). Utána pedig

az a nézet terjedt el, hogy a holdi kráterek vulkáni eredetűek. Ennek a nézetnek még a 20. század első felében is voltak hívei. Az 1870-es évek második felében merült fel először ezen körszimmetrikus formák esetén az esetlegesen becsapódásos eredet (BÉRCZI et al. 2005). A 20. század második felében egyre részletesebb laborkísérletek (pl. Ames Vertical Gun Range), fotogeológiai elemzések, valamint az egyes égitesteken (Vénusz, Merkúr, Mars, Hold) végrehajtott helyszíni mérések, ill. a földre visszahozott holdi kőzetminták bizonyítékot szolgáltatottak arra, hogy a becsapódásos folyamatok jelentős szerepet játszottak az égitestek korai fejlődéstörténetében. Ezzel párhuzamosan a földi meteoritkráterek tudományos jelentősége is megnőtt, amely együtt járt a felfedezett földi kráterek számának emelkedésével is: az 1930-as években még tíznél kevesebb becsapódásos kráter volt ismert a Földön, 1966-ra azonban már több mint 30 meteoritkráter tartottak nyilván (GREELY 1985). A további kutatások eredményeként, amelyek által meghatározhatóvá váltak a meteoritkráterek legjellemzőbb ismérvei, gyorsan nőtt a felfedezések száma: jelenleg 176 darab, bizonyítottan becsapódásos eredetű kráter ismert a Földön (Earth Impact Database 2009, SPRAY 2009 — 1. ábra). Mindezek mellett az egyéb adatbázisok (pl.: *SEIS database*; *omzg.sccc.ru*) még kb. 600–700 formát tartanak számon, amelyek kapcsán a becsapódásos eredet sem zárható ki teljesen. Azonban ennek bizonyításához jól meghatározott ásványtani és geokémiai bizonyítékok kellene.

Az 1970-es és az 1980-as évek fordulóján olyan feltevések és eredmények is napvilágot láttak, amelyek arra utaltak, hogy a becsapódások nem csak a bolygók (konkrétan a Föld) korai fejlődéstörténetében játszottak szerepet, és nem csak geológiai-geokémiai szempontból jelentősek. ALVAREZ et al. 1980 júniusában publikálták a *Science*-ben, a napjainkig is alapvetésnek számító cikküket, amelyben a kréta-tercier határán (rövidítve: K–T határ, ma kréta-paleocén), 65 millió éve bekövetkezett tömeges kihalást

összefüggésbe hozták egy globális hatású és katasztrofális meteoritbecsapódással (amely kihalásnak legismertebb vonatkozása a dinoszauruszok 65 millió évvel ezelőtti eltűnése és az emlősök diverzitásának egyidejű növekedése). Itt azonban hozzá kell tenni rögtön azt is, hogy a becsapódáson kívül egyéb lehetséges kiváltó/befolyásoló tényezők is közrejátszhattak a kihalásban. Elméletüket a Föld több, egymástól távoli pontján (pl.: Dánia, Olaszország, Franciaország, Tunézia, Mexikó), a K–T határokon fellelhető, sokszor csak centiméteres vastagságú agyagrétegek nagyon magas iridiumtartalmára alapozták. Véleményük szerint ilyen magas iridiumkoncentráció (még hozzá globális elterjedésben) csakis kozmikus eredetű test becsapódásából származhatott. Ez a kráter a kb. 180 km átmérőjű, 65 millió éves Chicxulub-meteoritkráter, félig a Yucatán-félszigeten, félig a Mexikói-öbölben található, amely kapcsán először Glen PENFIELD utalt a lehetségesen becsapódásos eredetre az 1970-es évek végén (olajkutatások során fedezték fel a szerkezetet), majd pedig az 1990-es évek elején kötötték egyértelműen a K–T réteghatár agyagrétegeit (és a K–T kihalást is) a chicxulubi becsapódáshoz. Mindezek után az addig sokat támadott elmélet jobbra elfogadást nyert tudományos körökben és felhívta a figyelmet arra, hogy a becsapódások, habár a jelenlegi valószínűségük rendkívül csekély (főleg a Chicxulub nagyságúaké: statisztikailag 100 millió évente), még akár napjainkban is drasztikus behatásként érhetik a bolygókat, köztük a Földet is, annak ellenére, hogy az ilyen események főleg az égitestek korai fejlődéstörténetére voltak jellemzőek (SAUNDERS & WHITE 2005).

Ezzel párhuzamosan fontos eredmények születtek az egyéb földi meteoritkráterek geológiai-geokémiai jellegzetességeit illetően is. A becsapódásos formák geomorfológiai vonatkozásainak vizsgálatai azonban háttérbe szorultak. A jelen tanulmány sorozatnak célja pont ezen hiányosságok részbeni pótlása, amely remélhetőleg egy hosszú kutatási sorozatnak csupán az első lépéseit jelenti majd,



1. ábra. A jelenleg ismert földi meteoritkráterek (Earth Impact Database 2008)

Figure 1. The currently known terrestrial impact structures (Earth Impact Database 2008)

mert napjainkra egyértelműen bebizonyosodott, hogy ez a téma sok új eredménnyel gazdagíthatja úgy a geomorfológiát, mint a geológiát, sőt még akár az evolúcióbiológiát is.

A becsapódásos kráterek a Naprendszer szilárd felszínrel rendelkező égitesteknek nagy részén a legáltalánosabb felszíni formaelemnek tekinthetők. Közös jellemzőjük a körszimmetrikus megjelenés, amely azonban nem feltétlenül szükséges: a ferdeszögű becsapódások (kb. 5–10 fok alatt) (SCHERLER et al. 2006), illetve a becsapódás utáni (poszt-impakt) geológiai folyamatok, amelyek nem kizárólag a becsapódás következményei vagy utóhatásai (de amelyekre az impakt szerkezet jellegzetességei is befolyással lehetnek), módosíthatják ezt a körszimmetrikus megjelenést, ovális vagy elliptikus krátert eredményezve. Azokon az égitestfelszíneken és felszínrészleteken, ahol a felszín-újraformálódás és az eróziós hatások nem jelentősek, a krátereloszlások utalhatnak az adott felszíndarab relatív korára.

A földi impakt szerkezetek, esetében is kimutathatóak bizonyos törvényszerűségek a földrajzi helyzet-, méret (átmérő)-, ill. a kor szerinti eloszlásokat illetően (MIHÁLYI & GUČSIK 2008), annak ellenére, hogy bolygónk geológiailag igen aktív, illetve jelen ismereteink szerint meteoritkráterekben rendkívül szegény égitestnek számít. Ebben a kráter-szegénységben bolygónk geológiai aktivitása mellett a légkörnek is jelentős szerepe van: közegellenállásával felemészti a kisebb meteorokat, vagy szétdarabolódásra (fragmentálódás) készíti őket a lefelé egyre sűrűbbé váló atmoszférán való áthaladás alatt. Ez az ún. *cut off size*, magyarul a *levágási mérethatár* (BÉRCZI et al. 2005), amely alatt a meteorit nagy valószínűséggel már nem éri el egy darabban a felszínt (ez a mérethatár nagyban függ a becsapódó test anyagi minőségétől). Ennek eredményeként a kisebb meteoritok elégnak a légkörben, vagy felszínt érnek (ez igazából még nem nevezhető becsapódásnak, inkább csak lehullásnak, a valódi becsapódások sebessége néhány km/s-nél kezdődik és egészen 72 km/s-ig emelkedhet), de nagyon lelassul és széttöredezve. Az így keletkező törmelék pedig sok, de igen kisméretű krátert hoz létre (méteres, ill. néhányszor tíz- vagy százméteres átmérőjű kráterekből álló krátermezők, ~5–100 kráterrel), amelyek erózióval szembeni ellenálló képessége kisebb, mint ha az adott meteorit egy darabban csapódott volna be, egyetlen, nagyobb méretű meteoritkrátert alakítva ki ez által. Ilyen krátermezők a Földön is ismertek: a Kaali-járv (Észtország), Morasko (Lengyelország), Henbury (Ausztrália), Szihote Aliny (Oroszország). Ezek mellett meg kell még említeni a kettős kisbolygók (kisbolygó és „holdja”) becsapódása által kialakított kettős krátereket is, pl.: Kara- és Ust Kara-kráter (Észak-Oroszország), Clearwater West- és East (Kanada), Nördlingen-Ries- és a Steinheim-kráter (Németország).

Habár bolygónk becsapódásos kráterekben rendkívül szegény (a Naprendszer ismert, szilárd felszínrel rendelkező égitestjei közül az egyik leggyérebben kráterezett), az a lehetőség, hogy impakt formái testközlelől tanulmányozhatóak (helyszíni vizsgálatokkal), nagymértékben segíti a kráterképződés és kráterlepusztulás mechanizmusának a

megértését, amely mechanizmusok (illetve azok nyomai) azután összevethetőek az egyéb égitestek krátereinek jelenleg megfigyelhető jellegzetességeivel, tovább bővítve és finomítva ez által az ismereteket.

A becsapódások alkalmával lejátszódó fizikai és geokémiai folyamatok kísérleti vizsgálatára a hidegháborús kísérleti atomrobbantások megfigyelése adott elsőként lehetőséget.

A becsapódási kráterek leginkább sajátos lepusztulási formája a légkör nélküli égitesteken a mikrometeorit-becsapódások okozta ún. „kozmosz erózió”, mely lassan és egyenletesen pusztítja le formájukat. Itt tehát a kráterek lepusztulását más kráterek kialakulása okozza. A Marson a krátereket erodáló defláció, a folyóvízi vonalas és areális erózió, illetve a száraz és fluidizált tömegmozgási folyamatok mellett a becsapódási erózió (a kisebb kráterek hatása) is megtalálható, mivel az egyes kráterek felszíni kitettségi kora igen nagy, így statisztikailag említésre méltó esély van rá, hogy újabb impaktorok (meteoritok) hulljanak területére; másrészt a kráter számtalan éghajlati periódust is a felszínen maradvá élhet át.

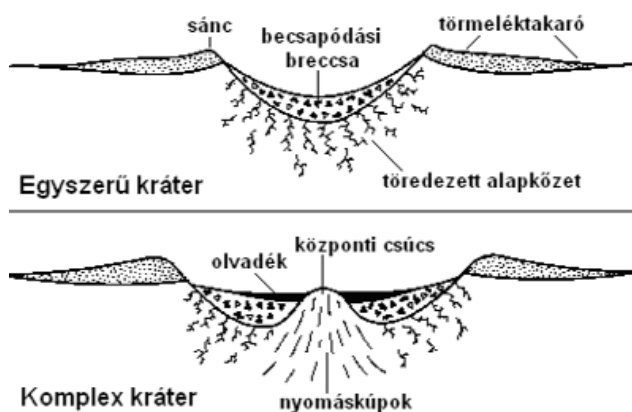
A Földön a becsapódás után egy ideig a felszabadult hő (amely nem csak az olvadékképződésben nyilvánulhat meg, hanem hidrotermális aktivitásban is), valamint hosszabb távon az eróziós-akkumulációs folyamatok jellemző együttese alakítja ezen formák utótörténetét, amelyet poszt-impakt fázisnak nevezhetünk.

A következő fejezetek célja egy általános áttekintés nyújtása a kráterképződés mechanizmusáról, valamint néhány földi meteoritkráter geológiai és geomorfológiai jellegzetességének bemutatása.

Morfológiai jellegzetességek

A meteoritkráterek legjellemzőbb tulajdonsága a körszimmetrikus megjelenés, amelyet az alapvető ásványtani jellemzőkhöz hasonlóan, szintén a kis területre koncentrálnak, majd onnan pillanatszerűen szétterjedő, igen nagy energia alakít ki. Ez a körszerű-koncentrikus energiaterjedés csak a ferdeszögű becsapódások esetében módosulhat ellipszissé. Mindezen folyamatoknak különféle alaktani, geológiai és geofizikai megnyilvánulásai lehetnek.

Geomorfológiai-geológiai jellegzetességek: a körszerű megjelenés mellett a legfeltűnőbb tulajdonság a környezeténél mélyebben fekvő *kráter aljzat*, amely kisebb átmérőjű (földi körülmények között 3–4 km alatti) kráterek esetében homorú (tál alakú kráterek), nagyobb kráterek esetében fokozatosan erősödik az aljzat síkság jellege (sík aljzattal rendelkező kráterek) (2. ábra). Az aljzat és a környező, eredeti felszín közötti szintkülönbség az idős és/vagy erősen lepusztult kráterek esetében minimálisra csökkenhet vagy el is tűnhet: az elegyengetésben a kráter sánca lepusztul, medencéje feltöltődik. A kráterek belső medencéje üledékfogadóként szolgál, így az a belekerült üledék és a sánc anyagának csuszamlásai miatt lassan feltöltődhet. A Földön szárazföldi környezetben a kráterben



2. ábra. Egyszerű és komplex meteoritkráterek keresztmetszete (DRESSLER & REIMOLD 2001, módosítva)

Figure 2. Cross sections of simple and complex meteorite craters (DRESSLER & REIMOLD 2001, modified)

esetlegesen megjelenő tó lakusztikus üledékei töltik fel a medencét, vagy annak egy részét. Ezt a folyamatot a tó eltűnése után (vagy a helyett) a folyók feltöltő tevékenysége is helyettesítheti. A jég letaroló tevékenysége is csökkenti a szintkülönbségeket. Nagyméretű meteoritkrátereknél (földi viszonyok között 100 km-es nagyságrendű átmérőnél) szerepet játszhat az izosztatikus emelkedés is: a kráter kivájdásával egyidejűleg (annak egyenes következményeként) akár több száz vagy ezer méteres vastagságban robbanhat le a fedőréteg, akár néhány száz km-es átmérőjű területről is. Ennek eredményeként a krátermedencére érdemben hathat az asztenoszféra izosztatikus felhajtóereje. A kráter szűkebb környezete pedig süllyedésnek indulhat, például a sánc és a törmeléktakaró súlya miatt.

A medence pereménél kezdődik a *kráterfal*, amely a medence felé lejtő, rézsútós térszínként határozható meg. A kráteraljzat és a környező, eredeti térszín közötti kapcsolatot teremti meg. A kráterfal magasabbra nyúlik, mint az eredeti térszín. Ez a túlmagasodó rész a krátertől távolodva, konkáv lejtővel újra belesimul az eredeti felszínbe. Ez a meteoritkráter *sánca* vagy más néven a *pereme* (2. ábra). A sánc rétegzettsége gyakran inverze az eredeti rétegsornak (GREELY 1985), ami arra utal, hogy nem csak kidobott anyagról van szó, hanem egy átfordított rétegsorként is értelmezhető.

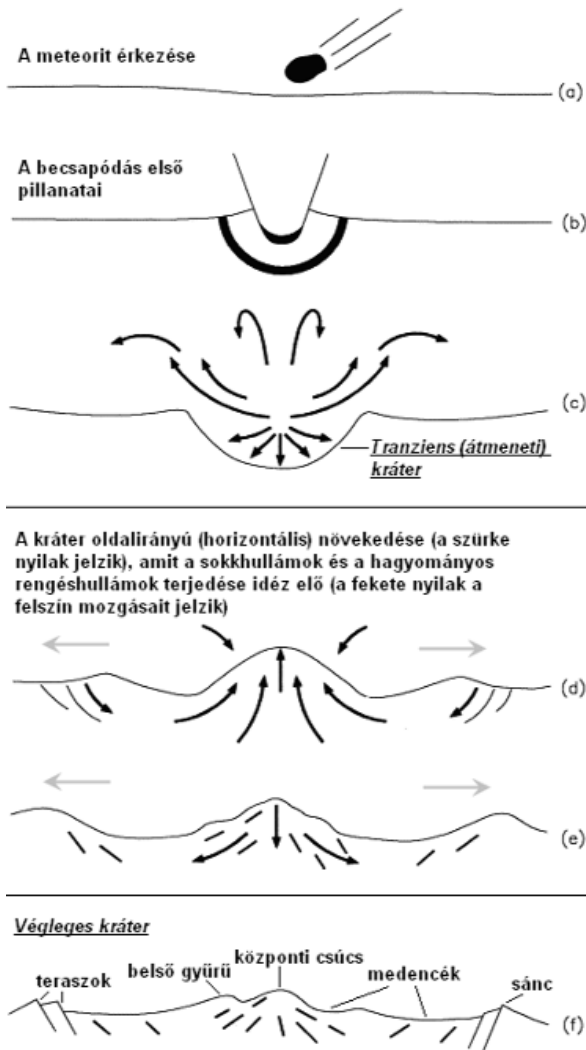
A sánctól kifelé haladva következik a *törmeléktakaró* (kidobott és visszahullott anyag) (2. ábra). A kráterhez közelebbi része vastagabb, összefüggő takarót képez, neve is innen ered: *közeli* (*proximális*)-, avagy *folyamatos törmeléktakaró*, amely a sánc folytatásának tekinthető. A krátertől távolodva a törmeléktakaró egyre vékonyabb lesz és szét is szakadozik: ez a *távoli* (*disztális*)-, más néven *szakadozott törmeléktakaró*. A törmeléktakaró alkotja a kráter legtávolabbra nyúló és egyben legkönnyebben lepusztuló morfológiai egységét. A földi meteoritkrátereknél csak a közeli törmeléktakaró maradhat meg hosszabb ideig. A pillanatszerűen keletkező, nagy területet borító törmeléktakaró korjelző réteggént a sztratigráfiában is fontos lehet, pl. a Hold esetén (sugársávós kráterek) (HARGITAI et al. 2008).

A fentebb tárgyalt formaelemek (medence, fal, sánc, törmeléktakaró) minden frissen képződött meteoritkráterre jellemzőek. Azok a kráterek, amelyek csak ezekkel a formaelemekkel rendelkeznek, összefoglaló nevükön az *egyszerű kráterek*. Földi körülmények között kb. 3-4 km átmérőig terjednek (2. ábra — GREELY et al. 1981, 1985; CARR et al. 1984; FRENCH 1998; GUČSIK 2003; BÉRCZI et al. 2005). Az egyszerű kráterek másik fő jellegzetessége az, hogy a képződött *végleges kráter* átmérője és a kráterképződés első fázisában kialakuló, ún. *átmeneti* (*tranzien*s) *kráter* átmérője viszonylag közel áll egymáshoz (akár egyezhet is, azaz a tranzien kráter egyben a végleges kráter is).

A fent említett átmérő-kategóriánál (~3-4 km) nagyobb meteoritkráterek azonban egyéb formaelemekkel is rendelkezhetnek, amelyek nem feltétlenül teljesen új folyamatok eredményei, hanem annak következményei, hogy a kisebb becsapódásoknál is már többé-kevésbé meglévő folyamatok sokkal erősebben jelentkeznek, amely így már a formákban is megnyilvánul. Tehát ezek a jellegzetességek is a hirtelen bekövetkező kompressziós-dekompressziós fázisokkal és a sokk-hullámokkal, ill. azok különféle interferenciáival hozhatóak összefüggésbe. Ezek az ún. *komplex kráterek*. Az az átmérőhatár, amely elválasztja az egyszerű és a komplex meteoritkrátereket, mindenek előtt az adott égitest felszíni gravitációs gyorsulásának a függvénye: minél kisebb a felszíni gravitációs gyorsulás, annál nagyobb lesz ez a határ-átmérő. Legjobb példa erre a Hold, ahol a felszíni gravitációs gyorsulás kb. hatoda (1,6 m/s²) a földinél, a két krátertípus közötti határ-átmérő pedig durván hatszorosa a földinél (20–30 km). Mind-ezen okok miatt nem lehet az egész Naprendszerre vonatkozó, egységes határ-átmérőt meghúzni az *egyszerű* és a járulékos formákkal jellemezhető *komplex* kráterek között. A *komplex kráterekre* jellemző járulékos formaelemek (GREELY et al. 1981, 1985; CARR et al. 1984; FRENCH 1998; GUČSIK 2003; BÉRCZI et al. 2005 — 2., 3., 4. és 5. ábrák):

— *Központi csúcs*: a krátermedence központi aljzatának rugalmas visszapatannása miatt alakul ki. Formálódása a becsapódás utáni pillanatokban kezdődik. Instabil formának számít, a gravitáció hatására a kiemelkedés után nem sokkal (percek, órák) összeomlásnak indul, de még így is jelentős hegytömegekként magasodhat ki a kráterek medencéjének közepén.

— *Gyűrűív(ek)*: ha a becsapódáskor felszabaduló energia nagyobb, mint ami a központi csúcsos kráterek kialakulásához kell, a krátermedence külsőbb régióiban (de még a faltól beljebb eső területeken) egy vagy több koncentrikus gyűrűív futhat körbe. Kialakulásukban a túl magasra fejlődő központi dóm részleges vagy teljes összeomlásának, a szétterjedő sokk-hullámoknak, illetve az általuk létrehozott vetőknek és gyűrődéseknek van fő szerepe. Szintén a kráter képződésével egy időben jönnek létre. Ezek a központi gyűrűs kráterek. Ha a felszabaduló energia még nagyobb, a gyűrűívek (tektonikus hatásra) a sáncon kívül is megjelenhetnek (főleg a jéggel borított égitesteken): ezek már akár több száz km átmérőjűek is lehetnek. Ilyenek a többgyűrűs medencék (FRENCH 1998). Jellemzően a jéggel fedett holdakon alakulnak ki.



3. ábra. A komplex meteoritkráterek képződésének elvi vázlata (DRESSLER & REIMOLD 2001, módosítva)

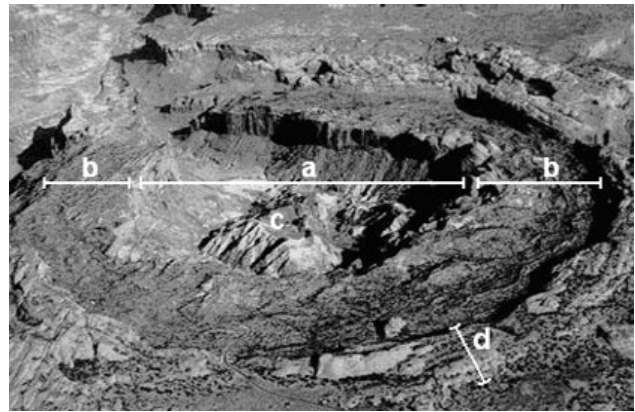
Figure 3. Theoretical sketch for the formation of complex meteorite craters (DRESSLER & REIMOLD 2001, modified)

— *Teraszos fal*: ez a formaelem a kráter peremi területein alakul ki, lépcsős kiemelkedések, ill. csuszamlásos folyamatok hatására, a magasabb kráterfal instabilitása miatt. A becsapódás után hosszabb idő elteltével is létrejöhet (pl. földrengés hatására), egyben a kráterfal hátrálását, a kráter



5. ábra. A Steinheim-meteoritkráter, Dél-Németország (Earth Impact Database 2008, módosítva)

Figure 5. Steinheim meteorite crater, South Germany (Earth Impact Database 2008, modified)



4. ábra. Az Upheaval Dome-meteoritkráter, Utah, U.S.A. (Earth Impact Database 2008, módosítva)

Kora: <170 millió év, átmérője: 10 km. Ezen a komplex impakt formán jól megfigyelhetők a különböző morfológiai egységek: a – tranziens kráter; b – a sokk-hullámok által kialakított végleges kráter további kiterjedése; c – központi csúcs; d – sánc

Figure 4. Upheaval Dome meteorite crater, Utah, U.S.A. (Earth Impact Database 2008, modified)

Age: <170 my, diameter: 10 km. This crater has well preserved morphological elements: a – transient crater; b – final crater formed by shock-waves; c – central uplift; d – rim

kiszélesedését is okozhatja (beomlások, csuszamlások miatt).

Az első két formaelem (központi csúcs, gyűrűív) előfordulhat együtt vagy külön-külön is, és arra szolgálnak bizonyítékkul, hogy becsapódáskor a felszín közelítőleg a vízcsépp-modellnek megfelelő mozgást végez (nem a kőzetek megolvadása miatt, hanem a jobbra koncentrikus, impakt eredetű vetők által kijelölt translációs síkok és gyűrődési zónák mentén — 3. ábra).

A kráterek lepusztulása

A Földön az erózió mértékét alapvetően meghatározza az éghajlat és a szerkezeti mozgások. Ez igaz a többi, légkörrel- és (egykori) geológiai aktivitással rendelkező égitestre is: modellszámítások alapján a kráterek erodáltsága arra utal, hogy a marsi felföldek a nagy bombázási időszak (más néven: LHB — 1. a „A földi meteoritkráterek eloszlási jellemzői” c. fejezetet) óta, az utolsó 3,8–4 milliárd évben átlagosan ~1 km-t erodálódtak (kb. 25 cm/millió év)

(KARGELL 2004). Összehasonlításként: a Földön az erózió egymillió évente kb. 25–30 méternyit pusztít le átlagosan a felszínből (TAYLOR & McLENNAN 1985). A földi, néhány km-es átmérőjű kráterek így néhány millió év alatt eltűnnek. Egy 1 km átmérőjű kráter a Földön, csapadékos éghajlaton, 40–50 ezer év alatt eltűnhet, ha a felszíne kiegyenlítődik, a növényzet pedig beborítja. A törmeléktakaróra és a sánkra települő növényzet azonban akár csökkentheti is az eróziót.

A becsapódáskor keletkezett, légkörből visszahullt por az első, amely eltűnik a kráter környezetéből. A Vénuszon azonban ez is megmaradhat (az ún. radarsötét „haló”-k). Ennek feleltethető meg a tengeralatti becsapódások területére a vízből kihulló finomszemcsés üledékanyag (pl. pliocén végi, ún. *Eltanin-tengeri becsapódás* üledékzavarai az Atlanti-óceán déli részén — KYTE 2002).

A kráterek lepusztulásának a sorozata idealizált esetben a következő: sugársávnak — mint a távoli törmeléktakaró egyik fajtájának — eltűnése; a törmeléktakaró határának fokozatos elmosódása, ill. a távoli törmeléktakaró további pusztulása; a krátersánc magasságának csökkenése; a kráterfal/kráterfenék határának elmosódása a csuszamlások miatt; a szerkezeti elemek (kráterfal: terasz; kráteraljzat: csúcs, gyűrű) jellegtelenné válása; a mélyedésen kívüli összes jellemző eltűnése; illetve legvégül a feltöltődés vagy relaxáció.

Tengeri környezetben létrejött kráterek

A Naprendszerben egyedül a Földre jellemző, hogy kráterek vízi környezetben is keletkezhetnek, habár a korai Marson is előfordulhattak ilyen kráterek. A Földön ismert 176 meteoritkráterből 27-ről bizonyosodott be, hogy vízborítású felszínen képződtek. Ezek a kráterek ugyanakkor jobban megőrződhetnek, hiszen létrejöttük után nem erózió, hanem üledékakkumuláció hat rájuk, mely eltemeti, és ezzel konzerválja őket (TSIKALAS & FALEIDE 2006).

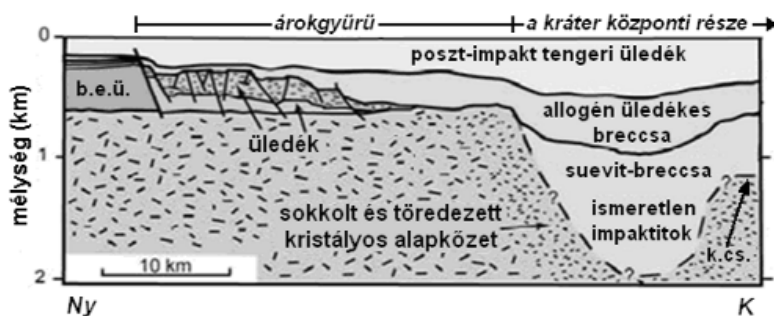
A vízbe csapódó meteoritok esetében már a kráter kialakulásakor eltérő folyamatok hatnak. A célkőzet is más: kevésbé konszolidált üledék, nagy porusvíz-tartalommal. A

kráter üregének létrejötté után annak formáját nem a kráterbe ballisztikus pályán visszahulló kőzetanyag, hanem inkább a vízben képződött átmeneti üregbe visszazúduló víz és az iszapcsúszások alakítják. A tengerfenéken csak az az impaktor hagy nyomot, amely azt eléri, azaz melynek átmérője összemérhető a vízmélységgel. Ellenkező esetben az időleges „becsapódási kráter” csak a vízben keletkezik, annak nyoma a partmenti cunamik üledékében és a víz fenekére ülepedő extraterresztrikus anyagban lesz fellelhető (DYPVIK & JANSÁ 2003).

Ferdeszögű becsapódás esetén a kráterbe a becsapódás irányától függően eltérő mértékben visszazúduló víz kifejtettebb nyomokat hagy, mint szárazföldön, különösen a törmeléktérítő esetén, ami a Vénusz sűrűbb légkörében is jól látható aszimmetrikus nyomokat eredményez (szegmenshiányos törmeléktérítőjű kráterek). A sánctól lecsuszamló anyag teraszképző folyamata itt víz alatti zagyarakat (turbidit) hozhat létre, melyek a kráter belsejében keletkeznek, részben a perem irányából, részben a gyorsan összeomló központi csúcsból kiindulva (ORMÖ & LINDSTRÖM 2004).

A víz alatti becsapódásokban létrejött kráternek morfológiai jellemzője, hogy nincs sánca, ehelyett széles, sekély árokgyűrű veszi körbe (pl. Montagnais-, Mjřlnir- és Chesapeake Bay-meteoritkráterek) (6. ábra). A kráter körüli árokgyűrű a kráter körül visszahullt/lerakódott, gyengén konszolidálódott iszapos-törmelékes üledék összeomlásával keletkezik. Az összeomlás a kráterbe annak létrejöttékor elpárologó víz helyére visszazúduló víz okozza. A folyamat során a visszaáramlásban völgyek, törmelékárak, turbiditok jönnek létre. A kráterfal (sánc) és a központi csúcs jelentős része is összeomlik és anyaga szétterül.

A fluidizált törmeléktakaró a krátert körülvevő árokgyűrűben található (angolul: *annular trough* vagy *brim*, azaz karima — mivel a Chesapeake Bay-kráter szombréró-alakúként említi a szakirodalom), amely nem kiemelkedés, hanem a környezetéhez képest bemélyedés, ellentétben az ennek megfelelő szárazföldi forma, a törmeléktakaró kiemelkedő domborzatával (6. ábra). A porózus, illógazdag üledékbe történő becsapódáskor hasonlóan kiterjedt beomlással (fluidizált anyag csuszamlásával) kiszélesedő



6. ábra. A Chesapeake Bay-meteoritkráter, U.S.A. (HORTON et al. 2005, módosítva)

Átmérője: 90 km; kora: 35,3 mill. év) nyugati felének nyugat-keleti irányú keresztmetszete. Az ábra túlmagasított, a magassági torzítás mértéke 10-szeres. b.e.ü.: becsapódás előtt lerakódott üledék; k.cs.: központi csúcs (a nyíl a csúcs teteje felé mutat)

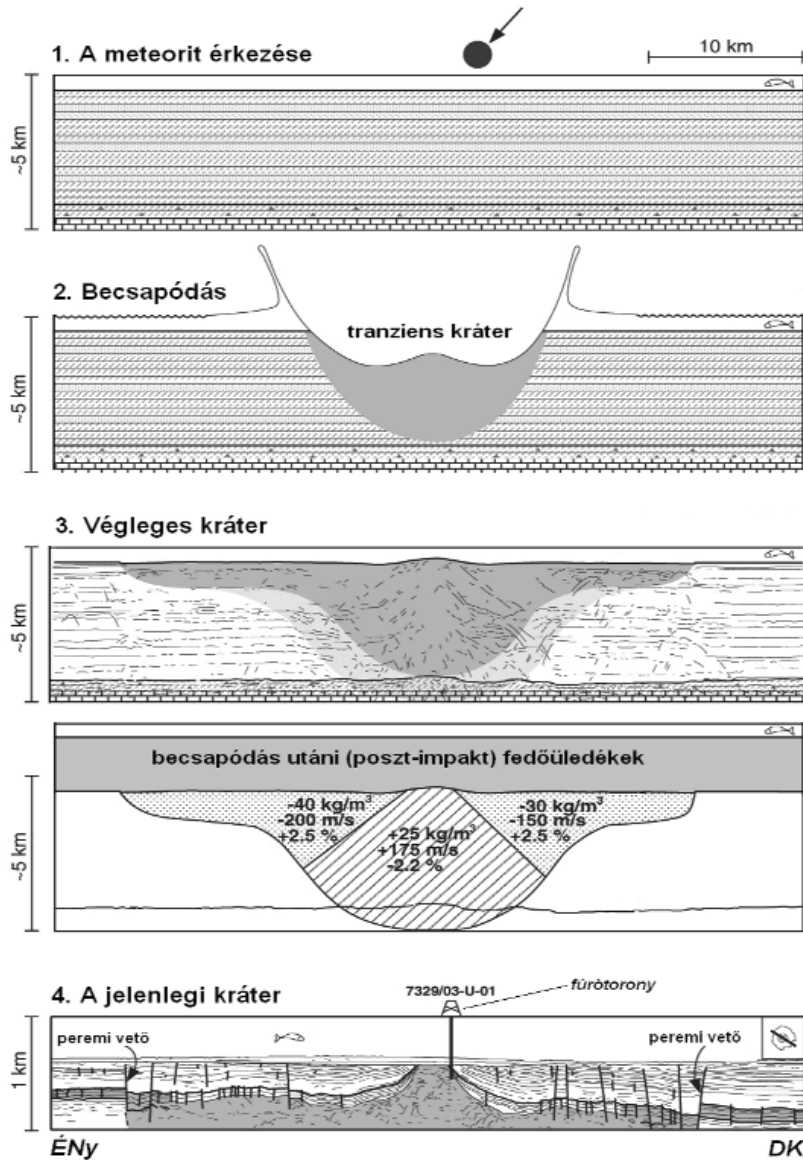
Figure 6. W-E cross-section of the western half of Chesapeake Bay impact structure, U.S.A. (HORTON et al. 2005, modified)

D=90 km; age: 35.3 million years). Vertical exaggeration is 10×. b.e.ü.: pre-impact sediments; k.cs.: central uplift (arrow shows top of the uplift)

medencéjű krátereket a Marson is megfigyeltek (*wide-brimmed impact structures*) az ún. káoszterületeken (HORTON et al. 2005).

A vízben keletkezett és keletkezése után is víz alatt lévő krátereket a továbbiakban párhuzamos rétegzettségű üledék fedi be. A keletkezés utáni eltemetés során a kráter domborzati különbségei kihangsúlyozódhatnak (a csúcs kiemelkedhet, az árokgyűrű tovább süllyedhet), melyek oka részben a kőzetanyag területenként különböző mértékű porozitása (pl. a Mjilnir-kráter esetén vizsgált *differenciált kompaktió* — 7. ábra) (DYPVIK et al. 2004).

Mindez azt is eredményezheti, hogy az eredeti kráterforma geomorfológiai inverzió megy keresztül: először gyorsan lepusztul a krátersánc, ezután a kráter belsejében összegyűlt, majd az alatta a becsapódáskor visszahullt, porózus, nem cementálódott kőzetanyag pusztul le. Ez alatt viszont a kráter középpontjában lévő olvadékok, ill. az alatta lévő, a lökéshullám hatására az erózióknak ellenálló — megolvadt és összetömörödött — kőzetek már lassabban pusztulnak környezetüknél, azaz a kráter medencéje egy idő után kerekasztal táblahegyként (egyfajta tanúhegyként) kiemelkedik környezetéből. Ilyen, differenciális erózióval



7. ábra. A Mjilnir-meteoritkráter, Norvégia, Barents-tenger (TSIKALAS & FALEIDE 2007, módosítva) Átmérője: 40 km; kora: 142 mill. év) képződésének vázlata, ill. a jelenleg megfigyelhető kráter északnyugat-délkeleti irányú keresztmetszete. Fentről a 4. szelvény számadatai azon fizikai jellemzők változásait mutatják, amely változásokat a becsapódás okozott (modellelés alapján): sűrűség értékek (kg/ml); szeizmikus sebességek (m/s); porozitás-anomáliák (%)

Figure 7. Schematic sketch for the formation of Mjilnir meteorite crater, Norway, Barents Sea (TSIKALAS & FALEIDE 2007, modified)

D=40 km; age: 142 million years, and NW-SE cross-section of the present crater. 4th panel from top showing modelled impact-induced physical property changes: density-contrasts (kg/ml); seismic velocities (m/s) and porosity anomalies (%)

keletkezett, invertált kráterekre a Marson találunk példákat: az ún. lépcsős (pedestal) krátereket.

A Manicouagan-kráter (Quebec, Kanada) gyűrűje esetében az impakt breccsa glaciális erózióval lepusztult, míg a központi, metamorf és magmás kőzetekben keletkezett olvadékpajzs kevésbé, így az kiemelkedik és ma tó veszi körbe. A Gosses Bluff-kráter (Northern Territory, Ausztrália) ma csak egy gyűrűszerkezet, melyet síkság vesz körbe. Ez azonban nem a kráterperem, amely rég elegyengetődött, hanem a kráter központi gyűrűje, mely szerkezeti kiemelkedéssel keletkezett, azaz nem visszahullt vagy akkumulálódott, hanem az eredeti alapközet elmozdulása által jött létre.

Amint a törmeléktagaró lepusztul, az ebben található, hullással idekerült olvadékblokkok kireparálódnak, és mint a glaciális vándorló erraticus tömbök, de ezúttal autochton genetikával, jelzik a becsapódáskor kivetett törmeléktagaró valamikori helyét (pl. a kanadai New Quebec-kráter esetén: 2 km távolságban)

A jég szerepe a kráterek lepusztulásában

Mivel a Földön eleve csak a pajzsokon maradhettek meg a több milliárd éves kráterek, ezen területek történetével a kráterek története is összekapcsolódik. A pajzsterületek (pl. balti, kanadai) jelentős eljegesedést szenvedtek, ami felszínre hozta és egyben le is gyalulta a kőzettestükben már eltemetve megőrzött idős krátereket (MIHÁLYI & GUČSIK 2008).

A glaciális lepusztulás a kráterek alakját is módosíthatja, pl. elnyújthatja (Mistastin-kráter, Labrador, Kanada).

A periglaciális éghajlaton a szoliflukció befolyásolja a lejtős területek tömegmozgását.

Más égitesteken a jég szublimációja is eróziós tényező: a jégdús rétegbe csapódáskor a mélyből felszínre került jég szublimál.

A jégholdakon, ill. sok jeget tartalmazó anyagú környezetben a kráterek lepusztulásában a jég relaxációja sem elhanyagolható tényező (Marsi poláris környezet, Ganymedes, Callisto, Europa). Ilyen környezetben a kráter domborzata a jég (ill. jégdús talaj) képlékeny folyása következtében kiegyenlítődik, elsimul.

A földi meteoritkráterek eloszlási jellemzői

A Földön lévő meteoritkráterek (úgy a felszínen lévőké, mint az eltemetetteké) átmérő-, ill. kor szerinti eloszlása arra utal, hogy az ismert földi meteoritkráterek jelenkori elhelyezkedése nem véletlenszerű és nem tükrözi a meteoritok becsapódásának földrajzi szélesség szerinti valószínűségét sem. Ezt azért kell kiemelni, mert a kisbolygók és üstökösök jelenkori térbeli eloszlását, ill. pályáit vizsgálva valószínűsíthető, hogy a Föld egyenlítői régióiban kb. 10 százalékkal nagyobb az esélye egy becsapódásnak (azaz,

egy kráter képződésének), mint a poláris területeken (LE FEUVRE & WIECZOREK 2008). Ha ez így is van, a kontinensvándorlás folyamatosan torzíja ezt az elméletileg kalkulált eloszlást. Azonban ettől a feltevéstől eltekintve is lehet bizonyos összefüggéseket találni az eloszlásokban, amelyeket három fő szempontból érdemes vizsgálni: meteoritkráterek földrajzi elhelyezkedése-, átmérője-, ill. kora szerint.

Az ismert kráterek *jelenkori földrajzi helyzetére* vonatkozóan az alábbi jellegzetességek említhetők meg (l. az 1. ábrát):

— Nagy részük az északi féltekén található, annak is a ~10. és a ~60. szélességi fokai között. A déli féltekén is hasonló területen, de keskenyebb zónában tömörülnek.

— Az egyenlítő környékén, ill. az attól északra és délre lévő ~10-10 fokos zónákban nagyrészt hiányoznak (rejtve vannak?). Ez leginkább az erős trópusi növényborítottsággal, valamint az e területre jellemző gyors felszín-újraformálódással lehet összefüggésben.

— Afrika (Szahara) és Ausztrália sivatagjaiban nagy számban találhatóak, amely a sivatagi klíma formakonzerváló hatásával magyarázható.

— Legnagyobb koncentrációjukat Európában (Balti- és Ukrán-pajzs) és Észak-Amerikában (Kanadai-pajzs) érik el. Mivel ezen területek krátereit túlnyomórészt jóval pleisztocén előtt keletkeztek és ősi kontinensmagokon vannak, valószínűsíthető, hogy a jég exhumálta őket.

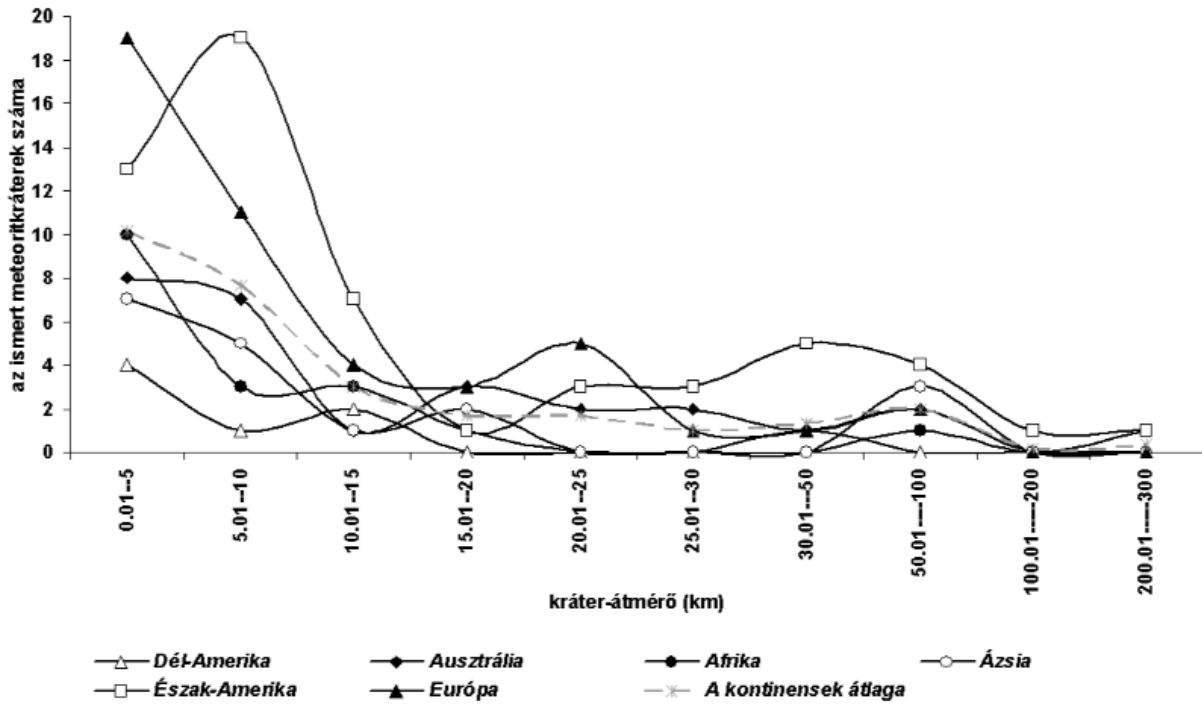
— A poláris területek krátermentesek, de ez nem a fenntebb említett becsapódási valószínűségekkel van összefüggésben, hanem azzal, hogy a poláris jégtakarók fiatalok (a pleisztocén óta léteznek), ill. az esetlegesen jégen képződő kráterek valószínűleg gyorsabban is pusztulhatnak, habár ennek tisztázásához még további vizsgálatok szükségesek.

— A tengerek és óceánok aljzatáról sem ismert kráter, ennek három oka van: (a) Egyrészt a több ezer méter vastag vízréteg közegellenállásával még a vízben haladva felémésztheti a becsapódó meteoritot. Erre jó példa a kb. 2 millió éves és ~500 km átmérőjű, ún. *Eltanin-rétegzavar*, az Atlanti-óceán déli medencéjéből, amely egy, még a vízben haladva felrobbanó és hatalmas örvényeket és szökőárakat keltő kisbolygó nyoma. (b) Az óceánok és tengerek aljzatának domborzata ma még viszonylag kevésbé ismert. (c) Az óceáni kéreg folyamatos elnyelődése miatt, juránál idősebb óceáni kéreg nincs.

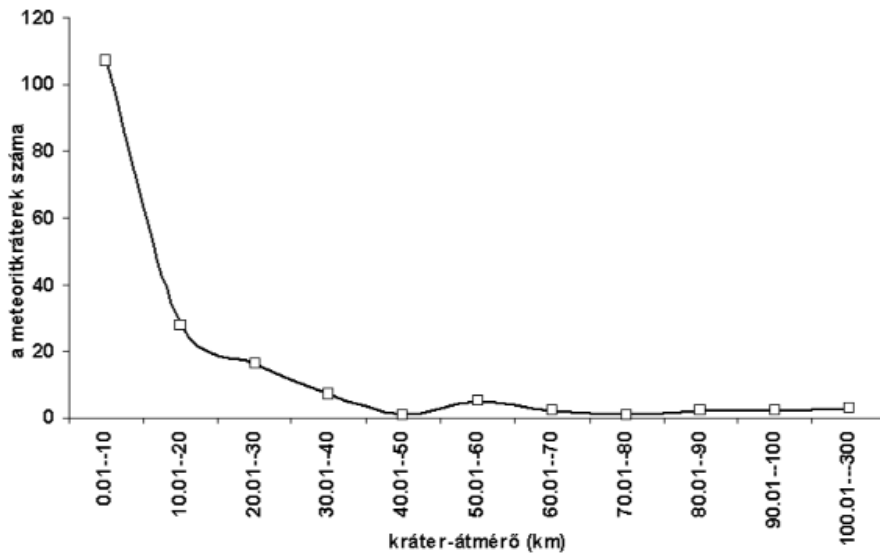
A jelenleg ismert földi meteoritkráterek *átmérő szerinti eloszlási jellemzői* (8. és 9. ábrák):

— A legegyszerűbb, legkisebb meteoritkráterek kb. 10–15 méter átmérőjűek a Földön (az ennél kisebb krátert létrehozó testeket a légkör nagy valószínűséggel felemészti), míg a legnagyobb, komplex (többgyűrűs) földi becsapódásos forma 300 km átmérőjű (Vredefort-szerkezet, Dél-Afriai Köztársaság).

— A Naprendszer kis égitesteinek (kisbolygók, szikladarabok, üstökösök stb.), mint potenciális becsapódó testeknek a méret-eloszlásai, valamint az égitestek krátereinek megfigyelése alapján adódik az egyik alapvető kráterképződési szabály, amely szerint minél kisebb egy kráter,



8. ábra. Átmérők szerinti összesített krátereloszlás a Földön (Earth Impact Database, 2008 adatok alapján)
 Figure 8. Cumulative distribution of craters by diameter on Earth (based on Earth Impact Database, 2008 data)



9. ábra. Átmérők szerinti meteoritkráter-eloszlás a Földön, kontinensenként (Earth Impact Database, 2008 adatok alapján)
 Figure 9. Meteorite crater distribution by diameter on Earth by continents based on Earth Impact Database, 2008 data

annál több van belőle (ez a szabály azonban helyenként csorbulhat).

— A kontinensenként vett átmérő-eloszlás alapján két kontinenscsoport különíthető el: (a) Észak-Amerika és Európa csoportja; ill. (b) Ausztrália, Afrika, Ázsia és Dél-Amerika csoportja. A fő különbség a két kontinenscsoport között az, hogy a első csoportot (nagy számú, 5–17 km-es átmérők közötti meteoritkráterrel a Kanadai- és a Balti-paj-

zsonkon) jelentős jégtakarók borították a pleisztocén idején, míg a második csoport négy kontinensét (kevesebb kráterrel) nem. Ez a jégtakarók krátert exhumáló szerepére utal.

A jelenleg ismert földi meteoritkráterek kor szerinti eloszlási jellemzői:

— Meteoritkráterek napjainkban is képződhetnek, legfeljebb nem szerzünk róla tudomást (ha ez így is van, ezek legnagyobb valószínűséggel igen kisméretűek). A legidő-

sebb ismert földi meteoritkráter ~2,4 milliárd éves (Suavjärvi, Oroszország karéliai része). Az ennél idősebbeket az óceáni kéreg szubdukciója valószínűleg eltüntette, habár léteznek izotóp-geokémiai nyomok ennél idősebb becsapódásokra vonatkozóan is. A holdi analógiák pedig arra utalnak, hogy a legnagyobb (akár ezer km-es nagyságrendű óriásmedencéket létrehozó) becsapódások kb. 4,2–3,8 milliárd éve zajlottak (ezt az időszakot nevezik a *Late Heavy Bombardment* [LHB] korszakának).

— A kor szerinti eloszlásoknál bizonytalanságok adódnak, amelynek oka az, hogy sok földi meteoritkráter korára csak becscült adatok vannak.

— A bizonytalanságok ellenére valószínűsíthető, hogy az elmúlt 3–3,5 milliárd évben a becsapódások jelentősen lecsökkentek (egyes becslések szerint az LHB korszak becsapódási fluxusának húszezred részére), és nagyjából állandó fluxusúak voltak. Kivétel ez alól a kréta kor, ahol valószínűleg megnövekedett az időegység alatti becsapódások száma, és amely végén (65 millió éve) bekövetkezett a chicxulubi becsapódás a Mexikói-öbölben, amely aktív szerepet játszhatott a kréta végi globális kihálásban (ALVAREZ et al. 1980). Az eocénben szintén megnőtt az időegységre jutó becsapódások száma, és itt is volt egy kisebb kihálás, de a két esemény közötti kapcsolat nem bizonyított.

— A Kanadai- és a Balti-pajzs pleisztocén jégborítású felszínén pleisztocén korú meteoritkráter alig található. Ez pedig arra utal, hogy az egykori jégtakaró pajzsként védte a felszínt a becsapódásoktól.

Az eloszlások összefoglalásaként az mondható el, hogy a földrajzi elhelyezkedés-, az átmérő- és a kor szerinti eloszlások összefüggő rendszerbe foglalhatóak, ahol a kor-

értékek bizonytalanságainak a kiküszöbölése a legfontosabb feladat.

Összefoglalás

A meteoritkráterekkel kapcsolatban az alábbi, főbb kutatási irányok léteznek: (1) a kráterképződés mechanizmusa, amely főleg geológiai és fizikai módszerekkel dolgozik; (2) a meteoritkráterek eloszlási jellemzőinek vizsgálata. Itt statisztikai módszerek alkalmazása indokolt: érdemes összehasonlítani a megfigyelhető kráterek kor-, méret- és elhelyezkedés szerinti eloszlásait a különböző égitesteken (kalkulálva az utólagos módosító tényezőkkel is, mint pl. tektonika, légkör stb.), majd ezeket összevetni a Naprendszer kis égitestjeinek méret és térbeli helyzet szerinti eloszlásaival; (3) újabb meteoritkráterek azonosítása; (4) az előbbi három módszer segítségével közelebb kerülhetünk annak megválaszolásához, hogy a becsapódások milyen környezeti hatásokkal járnak és milyen szerepük volt a földi élet megjelenésében, ill. utána az öt nagy és a hét kisebb globális kihálásban.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a tanulmány lektorainak, RÓZSA Péternek (Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék) és SOLT Péternek (Magyar Állami Földtani Intézet), hasznos észrevételeikért.

Irodalom —References

- ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F. & MICHEL, H. V. 1980: Extraterrestrial Cause for the Cretaceous–Tertiary Extinction. — *Science, New Series*, Vol. **208**, No. 4448., pp. 1095–1108.
- BATES, L. R. 1980: Glossary of geology. — American Geological Institute, p. 21., 23., 24., 25., 79., 102., 134., 166., 168., 181., 319., 430., 477., 516., 523., 531., 624., 663.
- BÉRCZI SZ., HARGITAI H., GUCSIK A., HORVAI F., ILLÉS E., KERESZTURI Á. & NAGY SZ. J. 2005: A Naprendszer kisenciklopédiája: a Naprendszer formakincse (1) – Becsapódások folyamata, nyomai és hatásai, — *ELTE TTK – MTA Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport (KAVÜCS)*, p. 2., 5., 11., 17.
- CARR, M. H., SAUNDERS, R. S., STROM, R. G. & WILHELMS, D. E. 1984: The geology of the terrestrial planets. — NASA, Washington DC, pp. 115–126.
- DRESSLER, B. O. & REIMOLD, W. U. 2001: Terrestrial impact melt rocks and glasses. — *Earth-Science Reviews* **56**, pp. 205–284.
- DYPIK, H. & JANSÁ, L. 2003: Sedimentary signatures and processes during marine bolide impacts: a review. — *Sedimentary Geology* **161**, 309–337.
- DYPIK, H., SANDBAKKEN, P. T., POSTMA, G. & MØRCK, A. 2004: Early post-impact sedimentation around the central high of the Mjølfrir impact crater (Barents Sea, Late Jurassic). — *Sedimentary Geology* **168/3–4**, 227–247.
- FRENCH, B. M. 1998: *Traces of catastrophe — A handbook of shock metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures.* — Lunar and Planetary Institute, Houston, pp. 17–30.
- GREELY, R. 1985: *Planetary Landscapes.* — Allen & Unwin, London, pp. 39–44.
- GREELY, R., MALIN, M. C. & MURRAY, B. 1981: *Earthlike planets (Surfaces of Mercury, Venus, Earth, Moon, Mars).* — W. H. Freeman and Company, San Francisco, pp. 70–88.
- GUCSIK, A. 2003: Terrestrial impact cratering and shock metamorphism: A review. — *The Bulletin of Research Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science* **29**, p. 29., 30., 33., 34.
- HARGITAI H., CSÁSZÁR G., BÉRCZI SZ. & KERESZTURI Á. 2008: Földön kívüli égitestek geológiai és rétegtani tagolása és nevezéktana. — *Földtani Közlemény* **138/4**, pp. 445–468.

- HORTON, J. W., POWARS, D. S., GOHN, G. S. & ORMÓ, J. 2005: Chesapeake Bay impact structure: morphology, crater fill, and relevance for impact processes on Mars. — *Role of Volatiles and Atmospheres on Martian Impact Craters 2005 conference, abstract #3024*
- KARGELL, J. S. 2004: *Mars — A Warmer Wetter Planet*. — Springer, pp. 245–246.
- KYTE, F. T. 2002: Composition of impact melt debris from the Eltanin impact strewn field, Bellingshausen Sea. — *Deep-Sea Research II* **49**, pp. 1029–1047.
- LE FEUVRE, M. & WIECZOREK, M. A. 2008: Nonuniform cratering of the terrestrial planets. — *Icarus* **197**, pp. 291–306.
- MIHÁLYI, K. & GUCSIK, A. 2008: Distributions of the currently known terrestrial impact structures. — *71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, abstract #5012* (printed in *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 43, Supplement, A98)
- ORMÓ, J. & LINDSTRÖM, M. 2004: The influence of a deep shelf sea on the excavation and modification of a marine-target crater, the Lockne crater, Central Sweden. — *35th Lunar and Planetary Science Conference, #1283*
- SAUNDERS, A. D. & WHITE, R. V. 2005: Volcanism, impact and mass extinctions: incredible or credible coincidences? — *Lithos* **79**, pp. 299–316.
- SCHERLER, D., KENKMANN, T. & JAHN, A. 2006: Structural record of an oblique impact. — *Earth and Planetary Science Letters* **248**, pp. 43–53.
- SPRAY, J. (passc director), 2009: Earth Impact Database (EID). — Website: <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>
- TAYLOR, S. R. & MCLENNAN, S. M. 1985: *The continental crust: its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. — Blackwell, Oxford 312 p.
- TSIKALAS, F. & FALEIDE J. I. 2006: Quantification of the significance of post-impact crater deformation through the study of Mjǫlnir and Chesapeake Bay craters: differential compaction, changes in geophysical signature response, and reconstruction of the original crater relief. — *Geophysical Research Abstracts* **8**, 07132
- Kézirat beérkezett: 2008. 12. 15.