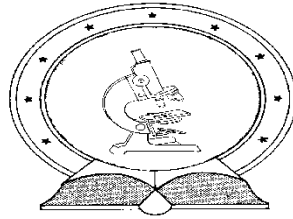


DE TTK



1949

**A földi meteoritkráterek eloszlási, geomorfológiai és
hidrogeográfiai jellemzői**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Mihályi Krisztián

Témavezetők: Dr. Szabó József és Dr. Gucsik Arnold

DEBRECENI EGYETEM
Természettudományi Doktori Tanács
Földtudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2013

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Földtudományok Doktori Iskola „A lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai” programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2013. 10. 07.

*Mihályi Krisztián
doktorjelölt*

Tanúsítom, hogy Mihályi Krisztián doktorjelölt 2008-2012 között a fent megnevezett Doktori Iskola „A lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai” programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2013. 10. 07.

*Dr. Szabó József
témavezető*

Tanúsítom, hogy Mihályi Krisztián doktorjelölt 2008-2012 között a fent megnevezett Doktori Iskola „A lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai” programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2013. 10. 07.

*Dr. Gucsik Arnold
témavezető*

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés – Az ember viszonya a meteorjelenségekhez	5
2. A témaválasztás indoklása és a dolgozat célkitűzései	10
3. Tudománytörténeti előzmények és szakirodalmi áttekintés	11
3.1. A külföldi kutatástörténet	11
3.2. A téma szakirodalmának és kutatásának magyar vonatkozásai	16
4. Az alkalmazott módszerek	20
5. A becsapódó test (impaktor)	22
5.1. A meteorok-, az aszteroidák (kisbolygók) és az üstökösök főbb jellemzői és típusai	22
5.2. Anyagi összetétel szerinti csoportosítás	24
6. A meteorit-becsapódás folyamata és a kráterképződés mechanizmusa, valamint a meteoritkráterek morfológiai jellegzetességei	25
6.1. A becsapódás fázisai és folyamata	25
6.2. A légkörbe lépés és a légköri áthaladás	25
6.2.1. Kis sebességű meteorit-hullások: penetrációs kráter-, ill. krátermező képződése	29
6.2.2. Nagy sebességű meteorit-becsapódások: egyszerű-, valamint komplex meteoritkráterek képződése, közös tranzienst (átmeneti) kezdőfázissal	30
6.2.2.1. A tranzienst fázis és a tranzienst kráter	30
6.2.2.2. A becsapódás célterületének impakt-hidrodinamikai jellegű mozgása	32
6.2.2.3. Egyéb makro- és mikrodeformációs jelenségek	40
6.2.2.4. Geomorfológiai-geológiai jellegzetességek	42
7. Az ismert földi meteoritkráterek eloszlási jellemzői	49
7.1. A kráterképződés alapvető törvényei légkör nélküli, geológiaiilag inaktív felszínű égitesteken	49
7.2. A kráterképződés alapvető törvényeinek érvényessége és módosulásai a Föld esetében	53
7.3. A kráterek jelenkori földrajzi helyzete	54
7.4. A kráterek átmérője	61
7.4.1. Eltemetett meteoritkráterek	63
7.5. Krátermezők	65

7.6. A földi meteoritkráterek átmérő szerinti eloszlása	66
7.7. A kráterek kora és a kor szerinti eloszlásuk	70
7.8. Az ismert korú földi kráterek adatai alapján számolható energiafelszabadulás jellege az egyes földtörténeti koregységekben – az (F)/(B) hányadosok –; valamint a földtörténeti kihalások lehetséges kapcsolatai	77
7.9. A negyedidőszaki jégtakarók és a glaciális erózió hatása a kráterképződésre és a kráterek jelenlegi eloszlására (a jégpajzsok kettős szerepe)	83
8. A földi meteoritkráterek hidrogeográfiai jellemzői	86
8.1. Rövid áttekintés a vízhálózati rajzolat típusokról	86
8.2. A meteoritkráterek vízhálózatának kialakulását leginkább befolyásoló folyamatok: a hátravágódó erózió és az ezt kísérő kapturás folyóeltérítések	90
8.3. Néhány földi meteoritkráter hidrogeográfiai jellemzése	92
8.3.1. Átfolyó vízrendszerrel jellemezhető meteoritkráterek vízhálózati rajzolatai	93
8.3.1.1. Popigai meteoritkráter	93
8.3.1.2. Manicouagan meteoritkráter	96
8.3.1.3. Siljan meteoritkráter	97
8.3.1.4. El' gygytgyin meteoritkráter	99
8.3.1.5. Haughton meteoritkráter	100
8.3.1.6. Boltysh meteoritkráter	103
8.3.1.7. Mistasin meteoritkráter	104
8.3.1.8. Nördlingen-Ries meteoritkráter	105
8.3.1.9. Vredefort impakt szerkezet	106
8.3.2. Nem-átfolyó vízrendszerrel jellemezhető meteoritkráterek vízhálózati rajzolatai	110
8.3.2.1. Charlevoix meteoritkráter	110
8.3.2.2. Suavjärvi meteoritkráter	112
8.3.2.3. Acraman meteoritkráter	113
8.3.2.4. Clearwater West és East meteoritkráterek	117
8.4. A meteoritkráterek lehetséges vízhálózati rajzolat típusai	118
9. Összefoglalás/Summary	120
10. Köszönetnyilvánítás	126
11. Irodalomjegyzék	127

1. Bevezetés – *Az ember viszonya a meteorjelenségekhez*

A Föld kialakulása óta hullik felszínére kozmikus anyag a világűrből. Sőt, némi képzavarral élve mondhatjuk: már jóval a kialakulása előtt elkezdődött ez a folyamat, hiszen az ősi földgolyó fokozatosan növekvő, majd pedig lassan planétává összeálló bolygócsírái (az ún. *proto-planetezimálok*) is apró porszemcsék és közetszilánkok ütközéseiből (ha közel azonos méretű testek találkoztak), ill. becsapódásaiból (ha viszonylag nagy volt köztük a méretkülönbség) jöttek létre. A mai értelemben vett meteorithullások- és becsapódások, valamint az őket sok esetben, de nem feltétlenül mindig kísérő kráterképződések tulajdonképpen ezeknek az ősi, bolygóképző ütközéseknek és becsapódásoknak a rendkívüli mértékben megritkult, a földi légkör által alaposan „kirostált”, becsapódásokká szelídült változatai. Becsapódásokká szelídültek, ugyanis arra a jelenlegi ismereteink szerint nincs esély, hogy a Föld egy hozzá hasonló méretű égitesttel ütközzön össze, de a földfejlődés korai szakaszában egyes elméletek szerint erre is lehetett egy alkalommal példa: körülbelül 4,5 milliárd évvel ezelőtt, tehát nem sokkal az ősi Föld kialakulása után egy kb. Mars méretű bolygó ütközött planétánknak az elgondolás szerint. Az ekkor földközeli pályára kerülő ütközési olvadékból és törmelékből állt össze (kondenzálódott) a Hold, 4,5 milliárd éve. Mindezt a Hold szelenológiájának (holdi geokémia) és a Föld geokémiájának bizonyos párhuzamai és egységes rendszerbe foglalhatóságuk támasztja alá. Ez az ún. „*Giant Impact Hypothesis*” (Jones, 1998). A jelenleg természettudományos alapon vizsgálható meteorit-becsapódással kapcsolatos kérdések egy részét a dolgozat hátralévő részében tárgyalom részletesen, azonban itt, a bevezetés kevésbé kötött formai és tartalmi kereteit kihasználva szeretnék szólni egy olyan dologról is, amely a természettudományi vonatkozások mellett történettudományi, tudománytörténeti aspektusokkal is rendelkezik: ez a téma pedig az ember viszonya a meteorithullásokhoz. A kiszámíthatatlanul, látszólag a semmiből a légkörbe lépő, nagy tűzgolyóval és erős fényjelenséggel, gyakran éles robajjal (hangrobbanás) is járó meteorok érkezése sohasem hagyta hidegen az emberek képzeletét. Eredetük rejtélyes volta miatt számos mítosz tekeredett köréjük. Szinte mindig társítottak hozzá szerencsét vagy szerencsétlenséget hozó hiedelmeket. Ha pedig frissen hullott darabjait is megtalálták, az még tovább borzolta a kedélyeket. Helyenként szerencse-talizmánként gyűjtötték össze őket (pl. az 1492. november 7.-ei, ensisheimi meteorithullás darabjait), máshol pedig a

gonosz hírnökeként tekintettek rájuk. – A legenda szerint pl. az 1886 szeptemberében a szibériai Novo Urey mellett lehullott meteorit annyira rossz érzést kellett a vidék lakóiban, hogy a helyi lakosok állítólag elkezdték a meteoritot összezúzva, vízzel elkeverve megenni. Ennek ellentéte a mindmáig a leghíresebb meteorit (ill. meteoritnak vélt kőzet), a mekkai Kába szentélyben őrzött Fekete-kő, mely fontos vallási jelképpé nőtte ki magát (megjegyzendő azonban, hogy az utóbbi évtizedekben egyre valószínűbbnek látszik az, hogy a kábai Fekete-kő nem valódi meteorit, hanem egy meteorit-becsapódás következtében földi kőzetből kialakult impakt kőzetmódosulat) (Thomsen, 1980).

A meteoritok hullásának emberi-történelmi aspektusaival kapcsolatban beszélhetünk legrégebbi írott feljegyzésekről, amelyek valószínűleg a fellelhető leghitelesebb, s nem pedig a valóban legősibb meteorészlelések. A jelenleg ismert legrégebbi, feltételezhetően meteorhulláshoz köthető írott emlékek a Kr.e. 9. századi Egyiptomba vezetnek. A *Hajótörött története* című legenda egy, a Vörös-tengeren hajótörést szenvedő egyiptomi csapat kis szigetre történő eljutását meséli el, ahol először a hajótöröttek mondták el odakerülésük történetét, majd pedig a sziget kígyótestű ura írja így le a szigetet korábban ért súlyos csapást: *„Elmondok hát neked valami hasonlót, mely ezen a szigeten történt, ahol a testvéreimmel laktam, gyermekeim is közöttük voltak. Összesen hetvenöten voltunk kígyók, gyermekeimmel és testvéreimmel együtt... Egy csillag zuhant le, s meggyulladtak azok, akik közelében voltak. Mikor ez történt, nem voltam velük, mikor elégték, nem voltam közöttük.”* (Csizmadia, 2004, szó szerint átvett idézet). Habár a szöveg mitologikus jellegű, a benne elbeszélteknek lehet valóságalapja, mind minden mítosznak. Ez után már csak az marad kérdéses, hogy a lezuhanó csillag valóban meteor lehetett-e.

Szintén Egyiptomba nyúlik vissza egy egyiptomiak és szírek által vívott csatának a története, melyet talán egy meteor becsapódása dönthetett el, III. Thotmesz fáraó uralkodása (kb. Kr. e. 1479-1425) idején: *„Halljátok meg emberek, a Tiszta Hegy vidékének lakói... ismerjétek meg Amon-Rének azt a csodáját, mely az egész kétország előtt történt... Az örök éppen jöttek, hogy találkozzanak éjszaka, hogy elvégezzék az előírás szerű virrasztást. A második óra volt, amikor egy csillag jött délről felőlük (ti. az ellenség felől). Sohasem történt ehhez hasonló. Rájuk csapott szemből, egy sem tudott megállni ott.”* (Csizmadia, 2004, szó szerint átvett idézet). A leírások szerint ez az esemény segítette győzelemre a fáraót.

A fenti két leírás, valamint néhány, Kr.e. 2050 körüli, Egyiptom területéről előkerült fém amulett, melyek a nikkeltartalom alapján

meteorikus eredetűek, arra utalnak, hogy ismerhették a csillaghullás, a tűzgömbök, sőt esetleg a kisebb becsapódások jelenségét, valamint a meteoritokat, mint fém-nyersanyagot. Azt nem lehet tudni biztosan, hogy felismerték-e a kapcsolatot a két jelenség (a felfogásukban mitologikusként kezelt égi fénycsóvák, valamint a fémtartalmuk miatt hasznosított meteoritok) között. A vas óegyiptomi elnevezése *bia en pet* (kopt hangzással: *benipe*), amely magyarra fordítva *égi érc*-et jelent, ami arra utal, hogy tudhattak a jelenség és az anyag közti kapcsolatról (Csizmadia, 2004).

Az ókori Görögországban az Aigoszpotamoi-ban Kr.e. 476-ban történt égi kőhullás keltette fel a filozófusok érdeklődését a téma iránt. Még az idősebb Plinius (Kr.u. 23-79) is megemlékezik róla, a közel fél évezreddel későbbi *Historia Naturalis* című enciklopédiájában: „*Szekér nagyságú, égett színű volt*”, írja, és „*a lehullott követ még mostanában is mutogatják.*” (Csizmadia, 2003, szó szerint átvett mindkét idézet). Apollóniai Diogenész, a Kr.e. 5. században élt filozófus meglepően előremutató magyarázattal szolgált a jelenségre (ismeretlen ókori szerző összefoglalója): „*A látható égítetekkel együtt láthatatlan kövek keringenek együtt, amelyeknek ezért nincs nevük. Gyakran lehullanak a Földre és elégnak, mint az a kőcsillag, amely Aigoszpotamoiban hullott alá.*” (Csizmadia, 2003, szó szerint átvett idézet). Diogenész a kő legvalószínűbb eredete mellett azt is jól látta, hogy a származási helyén még sok ilyen kő keringhet.

Arisztotelész (Kr.e. 384-322) másként közelített a kérdéses jelenséghez: ő a megfigyelést próbálta az elmélethez igazítani. Szerinte a lehullott kő a Földről származik, amelyet egy nagy szélvihar emelhetett előzőleg a magasba (a becsapódás időpontjában egy üstökös is feltűnt az égen, amelyhez hagyományosan az erős szelek megjelenését kötötték). Arisztotelész ezt a nézetét *Meteorologia I.* című könyvének 7. részében fejtette ki (Csizmadia, 2003; Webster, 2009). A fent említettek mellett több görög filozófus és gondolkodó is elmélkedett a jelenség háttéréről, Apollóniai Diogenész és Arisztotelész eltérő megközelítési módjai azonban jól reprezentálják a vélemények többrétűségét az ókorban.

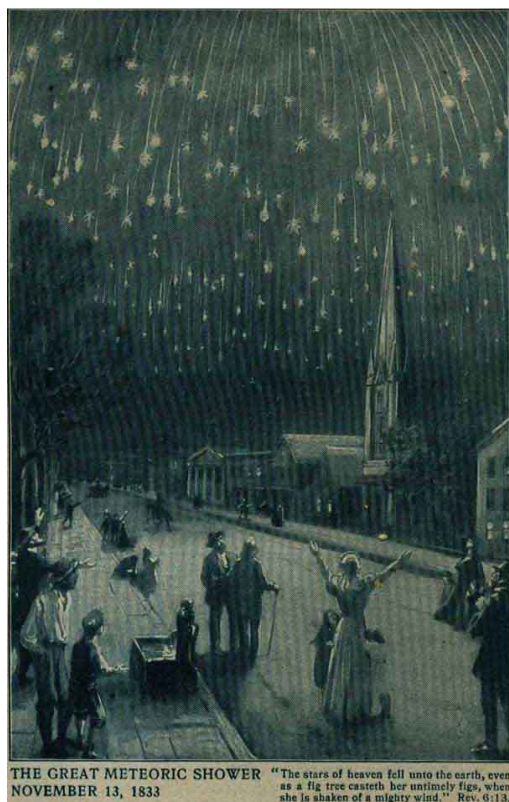
Indonéziában, Tibetben, Indiában, Mongóliában, Ausztráliában, Grönlandon, valamint Közép- és Dél-Amerikában is sok helyről írtak le ókori, vagy azt megelőző korokból származó, meteorvasból készült használati eszközöket (dárdahegyeket, késeket, ékszereket, rituális eszközöket). A vaskor előtt leginkább csak így lehetett tiszta fémhez jutni (www.meteoris.de; www.bibliotecapleyades.net).

A középkori Európában kettősség jellemezte a meteorjelenségekhez való hozzáállást. Az egyház tiltotta ugyanis a pogány hagyományok

szerinti értelmezésüket (www.meteoris.de; www.bibliotecapleyades.net). Bizonyos esetekben pedig az épp hatalmon lévő uralkodó maga döntötte el, hogy jó vagy rossz ómen az adott jelenség. Az 1492-es *ensisheimi meteoroső* után pl. I. Miksa német-római császár a helyszíntre utazott, és jó ómenként definiálta a jelenséget (ebben valószínűleg közre játszhatott a közelgő háború a franciák és a törökök ellen) (www.meteoris.de; www.bibliotecapleyades.net). Mindezen, meteorithullásokkal kapcsolatos vélemény-nyilvánítási korlátozások, és önkényes kinyilatkoztatások ellenére valószínűleg a nép ekkor is alkotott saját véleményyt. A modern korban is gyakran illették vallási színezettel ezeket a jelenségeket, jó példa erre az 1833. november 13.-ai nagy meteoroső, amelynek képi illusztrációját Bibliai témájú képaláírással látták el egy korabeli ábrázoláson (1. ábra). A szemtanúk beszámolóit szerint is sokan vallási jelenséggént, az Isteni harag megnyilvánulásaként értelmezték a látottakat. A 18-19. század fordulóján azonban főleg egy német fizikus-feltaláló, Ernst Florens Friedrich Chladni munkássága tudományos útra terelte a meteoritok eredetének vizsgálatát, amely út az elmúlt kb. 210 évben jelentősen kiszélesedett, és sok egyéb tudományág felé ágazott el. Pont Chladni meteoritok kozmikus eredetét felvázoló könyvének megjelenése után két hónappal történt a híres *siena-i meteorithullás* (Olaszország, 1794. június 16.), amely megfigyelésen alapuló nyomatékot adott Chladni elméletének (Marvin, 1995).

A meteorit-becsapódások témakörére az utóbbi években egyre intenzívebb tudományos érdeklődés és egyre szélesebb körű társadalmi figyelem is összpontosul, amely mögött annak mind világosabb felismerése áll, hogy bolygónk még napjainkban is ki van téve akár nagyobb erejű becsapódások veszélyének is. Százezres-milliós nagyságrendben vándorolnak a világűrben olyan szikladarabok és aszteroidák, amelyeknek ma még nem ismert pályája (sőt, akár a léte sem még), de amelyek akár a Földdel is ütközőpályára kerülhetnek. S habár erre a statisztikai esély nem túl magas, de pl. az 1908. június 30.-ai Tunguzka-meteorrobbanás; vagy a még sokkal aktuálisabb, Cseljabinszk felett 2013. február 15.-én történt magaslégköri meteorrobbanás körülbelül 1500 sérülttel, és mintegy 1 milliárd orosz rubeles anyagi kárral kellően nyomatékosítja azt, hogy a jelenkori becsapódások lehetőségét és az ebből eredő veszélyeket nagyon komolyan kell venni. Habár kis statisztikai valószínűséggel és időben rendezetlenül elszórva történnek is ezek az események, azonban már egy, a becsapódási események skáláján rendkívül gyengének számító (sőt igazából még csak becsapódásnak sem nevezhető) magaslégköri meteorrobbanás is lokálisan

súlyos következményekkel járhat az élővilágra (s benne az emberre) nézve.



1. ábra. Az 1833. november 13.-ai nagy meteoreső illusztrációja, ahogyan Észak-Amerikából látták. A kép aláírása: „Az égnek csillagai a Földre lehulltak, mint mikor egy fügefa hullatja le éretlen gyümölcseit, ha erős szelek támadnak.” [Jelenések könyve, 6:13]

(<http://www.historylecture.org/starsfell.html>)

2. A témaválasztás indoklása és a dolgozat célkitűzései

A meteorit-becsapódások és a kráterképződés folyamata, csak úgy, mint a kialakult impakt formák utólagos története, összetett folyamatok egymásra-hatásából ered. Emiatt kutatása magában foglal olyan, egymástól eltérő kutatási irányzatokat is, mint pl. a fizika, a kémiai elemzések és a legkülönbözőbb földtudományi kutatómódszerek, ezen belül is dolgozatom egyik kiemelt szempontja, a földrajzi-, még pontosabban pedig a természetföldrajzi szemléletű megközelítés. A téma kiválasztásának háttérben az áll, hogy a földrajzi szempontok sokszor háttérben maradnak a meteoritkráterek kutatásában és szakirodalmában, s ha előkerülnek, leginkább akkor is az egyes kráterek szűkebb-tágabb környezetének bemutatására szorítkoznak csupán. A kráterek földi előfordulásainak jellegzetességeit (azaz az eloszlásaikat), illetve a lepusztulás-történetüket eddig nem igazán kutatták az egységes rendszerbe foglalás szándékával. Jelen dolgozatomban ezt a rendszerbe foglalást tartom a fő célkitűzésnek. Ismertetem a kráterek kialakulásának mechanizmusát és a kialakuló becsapódási forma morfológiai jellegzetességeit, mint a későbbi lepusztulási mechanizmusok kiindulási feltételeit; bemutatom az ismert kráterek jelenkori földrajzi eloszlásait; valamint felvázolom az egyik legjelentősebb kráter-erodáló tényezőnek, a folyóvízi erózióknak a jellegzetességeit a kráterekre vonatkoztatva. Érintőlegesen szeretnék utalni a meteorit-becsapódások és a földtörténeti kihalások lehetséges kapcsolatára is.

A dolgozat célkitűzése négyes tagolódású:

- Egyrészt igyekszem átfogó rendszerbe foglalni a meteoritkráterek képződését, a kialakult forma morfológiai jellemzőit, a kráterképződés mechanizmusát és az azt esetlegesen módosító speciálisan földi jellegzetességeket.
- A második céлом a földi meteoritkráterek eloszlási összefüggéseinek vizsgálata, mindenekelőtt annak tükrében, hogy milyen tényezők összjátéka határozza meg a jelenleg ismert földi becsapódásos formák jelenkori földrajzi helyzet-; átmérő-; valamint kor szerinti eloszlásait. Ebben a részben szeretnék érintőlegesen utalni olyan, a meteorit-becsapódásokkal tágabb összefüggésben értelmezhető jelenségekre is, mint a földtörténeti kihalások és a becsapódások esetleges kapcsolatának a kérdése, az

ezt megelőző fejezetekben ismertetett eloszlási jellegzetességek alapján.

- Harmadik céloknak tekintem modellt alkotni a meteoritkráterek földi körülmények között lehetséges lepusztulási módozataira, különös tekintettel a fluviális folyamatokra, majd pedig ennek tükrében felvázolni a lepusztulás gyakori velejárájaként létrejövő forma-specifikus folyóhálózatok típusait és azok kialakulási mechanizmusait.
- Az összegzésben a cél annak körüljárása, hogy a becsapódás következtében kialakuló forma miért marad meg a felszínen, vagy mért marad meg felfedezhető állapotban, akár évmilliárdokon keresztül is, és hogyan történik a kráterek folyóvízi (fluviális) lepusztulása. Ez az összegzés felhívja a figyelmet azokra a tényezőkre is, amelyek figyelembe vétele az újabb meteoritkráterek felfedezését is elősegítheti.

3. Tudománytörténeti előzmények és szakirodalmi áttekintés

3.1. A külföldi kutatástörténet

Bár a meteoritok tudományos igényű vizsgálatát Ernst Florens Friedrich Chladni már a 17. század végen elkezdte, az általuk kialakított kráterek földi létének felismerése és kutatása csak később kezdődött el. Mondhatjuk, hogy a meteoritkráterekkel kapcsolatos kutatások igazából csak a 20. század második felétől, az űreszközök terjedésével párhuzamosan lendültek fel, habár már az ezt megelőző évtizedekben (sőt, évszázadokban) is foglalkoztak esetenként 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). Ez után az a nézet terjedt el, hogy a holdi kráterek vulkáni eredetűek. Ennek a megközelítésnek 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). Először Daniel Moreau Barringer feltételezte egy földi formáról a becsapódásos eredetet (ez a híres Barringer-kráter) (McCall, 2009). A 20. század

második felében egyre részletesebb laborkísérletek (az amerikai holdraszállással összefüggésben, pl. az Oklahomában található Ames Vertical Gun Range-ben), fotógeológiai elemzések, valamint az egyes égitesteken (Vénusz, Merkúr, Mars, Hold) végrehajtott helyszíni mérések, ill. a földre visszahozott holdi kőzetminták már egyértelmű bizonyítékot szolgáltatottak arra, hogy a becsapódásos folyamatok jelentős szerepet játszottak az égitestek korai fejlődéstörténetében. Ezzel párhuzamosan a földi meteoritkráterek tudományos kutatása is egyre intenzívebb lett, amely együtt járt a felfedezett kráterek számának emelkedésével is: az 1930-as években még tíznél kevesebb becsapódásos kráter volt ismert a Földön, 1966-ra azonban már több mint 30 meteoritkrátert tartottak nyilván (Greely, 1985). A további kutatások eredményeként, amelyek által meghatározhatóvá váltak a meteoritkráterek legjellemzőbb ismérvei, gyorsan nőtt a felfedezések száma: jelenleg 183 darab, bizonyítottan becsapódásos eredetű kráter ismert a Földön (az Earth Impact Database, 2013. február 20.-i adatai alapján). Az elkövetkező fejezetekben ismertetésre kerülő statisztikai vizsgálatokban azonban csak 182 kráter adatai szerepelnek, ugyanis a kb. 25 km átmérőjű, 130-450 millió éves korúra becsült kanadai Prince Albert kráter csak a vizsgálatok lezárása után került fel az Earth Impact Database listájára). Mindezek mellett az egyéb online adatbázisok még kb. 600-700 formát tartanak számon, amelyek kapcsán a becsapódásos eredet sem zárható ki teljesen, de nem is bizonyított. Ezek eldöntéséhez azonban jól meghatározott ásványtani és geokémiai bizonyítékok kellenek.

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 Föld korai fejlődéstörténetében játszottak szerepet, és nem csak geológiai-geokémiai szempontból lehetnek jelentősek. Amerikai szerzők 1980 júniusában publikálták azt a tanulmányukat (Alvarez et al., 1980), amelyben a kréta-tercier határán (rövidítve: K-T határ), 65 millió éve bekövetkezett tömeges fajkihalást összefüggésbe hozták egy globális hatású és katasztrófális meteoritbecsapódással. Ennek a kihalásnak legismertebb vonatkozása a dinoszauruszok 65 millió évvel ezelőtti eltűnése és az emlősök egyidejű előretörése. Itt azonban hozzá kell tenni rögtön azt is, hogy a becsapódáson kívül egyéb lehetséges kiváltó/befolyásoló tényezők is közrejátszhattak a folyamatban. 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 iridium-tartalmára alapozták. Véleményük szerint ilyen magas iridium-koncentráció (még hozzá globális elterjedésben) csakis

kozmosz eredetű test becsapódásából származhatott. Ez a kráter a jelenlegi ismereteink szerint, a kb. 150 km átmérőjű, 65 millió éves Chicxulub meteoritkráter, félig a Yucatán-félsziget alatt, a Mexikói öbölben, 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 agyagrégeit (és a K-T kihalást is) a Chicxulub 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 száz millió évente), még akár napjainkban is drasztikus behatásként érhetik a bolygókat, köztük a Földet is. Annak ellenére így van ez, hogy az ilyen események főleg az égitestek korai fejlődéstörténetére voltak jellemzőek (Saunders és 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. Sokáig nem is tudtuk, hogy a becsapódási folyamatok és a becsapódásos formák mennyire alapvető jelentőségűek a Naprendszerben, és emiatt a holdi krátereket is valami különös jelenségnek gondoltuk. A nézet megváltozásához a Mariner-4 Marsról készült felvételei adták az első fontos lökést (Szabó, 1988a). Így változott meg fokozatosan egy korábban elfogadott nézet a meteoritkráterekkel kapcsolatban: még a megelőző évtizedekben-évszázadokban az volt az általános vélekedés, hogy a Föld az etalon a kráterezettség szempontjából, azaz például a Hold számított kivételnek a maga sok millió kráterével, addig az űrszondák vizsgálatokkal kiderült, hogy inkább a Föld lóg ki a sorból, a maga 183 darab, jelenleg ismert kráterével. Így bizonyosodott be, hogy az impakt formák a Naprendszer legelterjedtebb formaelemei közé tartoznak.

A becsapódásos kráterek leginkább közös jellemzője a körszimmetrikus (vagy ahhoz közeli) megjelenés. Ez azonban nem feltétlenül szükségszerű: a ferdeszögű becsapódások (kb. 5-10 fok alatt) (Scherler et al., 2006), illetve a becsapódás utáni (poszt-impakt) geológiai folyamatok (pl. a tektonika), 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 égitest felszíneken és felszín-részleteken, ahol

a felszín-újraformálódás és az eróziós hatások nem jelentősek, a kráter eloszlások 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 és Gucsik, 2008), annak ellenére, hogy bolygónk geológiailag igen aktív, illetve jelen ismereteink szerint meteoritkráterekben rendkívül szegény égitestnek számít. Ebben a kráterszegénységben bolygónk geológiai aktivitása mellett a légkörnek is jelentős szerepe van: közegellenállásával felemészti a kisebb meteorokat, vagy szétdarabolódásra (abláció, 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 ugyan, de nagyon lelassulva és széttöredezve. Ezt a folyamatot ezért igazából még nem nevezhetjük becsapódásnak, inkább csak kis sebességű behullásnak, a valódi becsapódások sebessége ugyanis néhány km/s-nél kezdődik és egészen több tucat km/s-ig emelkedhet. A fentiekben vázolt, kis sebességű behullások eredményeként keletkező és esetleg földet is érő törmelék pedig sok, de igen kisméretű krátert hoz létre (ún. penetrációs krátermezőt: méteres, ill. néhányszor tíz- vagy százméteres átmérőjű kráterekből álló krátermezők, nagyságrendileg kb. 5-100 kráterrel), amelyek erózióval szembeni ellenálló képessége kisebb, mint ha az adott meteorit egy darabban csapódott volna be, egyetlen, de nagyobb méretű meteoritkrátert alakítva ki ez által. Ilyen krátermezők a Földön is ismertek: a Kaalijärv (Észtország), Morasko (Lengyelország), Henbury (Ausztrália), Sikhote Alin (Oroszország). Ezek mellett meg kell még említeni a kettős kisbolygók (kisbolygó és „holdja”) becsapódása által kialakított kettős krátereket is, pl.: Clearwater West és East (Kanada), Nördlingen-Ries és a Steinheim kráter (Németország).

Habár bolygónk becsapódásos kráterekben rendkívül szegény (a Naprendszer ismert, szilárd felszínnel rendelkező égitestei közül az egyik leggyéribben kráterezett), az a lehetőség, hogy impakt formái testközelsből 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 Naprendszerben a becsapódásos (impakt) formák általánosan elterjedt formaelemnek tekinthetők a szilárd felszínű égitesteken (bolygók, holdak, kisbolygók, üstökösök). Az olyan ősi, a Naprendszer keletkezése óta szinte változatlan égitesteken, mint pl. a szén-kondritos kisbolygók, ezek a becsapódási nyomok egyben az égitestek ütközéses kialakulási mechanizmusának az emlékei is. A Föld esetében azonban ritka formaelemnek számítanak, részben a légkör és az eróziós folyamatok miatt, részben pedig a jelentős geológiai aktivitás következtében (az egyes kéregdarabok újraformálódása a lemeztektonikai ciklus által). Az antropogén folyamatok nem játszanak közvetlenül jelentős szerepet a földi becsapódásos formák módosulásában és eltűnésében (feltöltődésében). Kultúrtörténeti jelentőségük a becsapódáskor képződő jellegzetes közettársulások építőanyagként történő felhasználásában (pl. Nördlingen-Ries és Steinheim, Németország); valamint természetes víztározókként való alkalmazásukban (pl. Lonar, India és Manicouagan, Kanada) nyilvánul meg a legmarkánsabban. Legjelentősebb jelenkori társadalmi és gazdasági hasznuk a nagyobb becsapódásokhoz köthető ásványi vagyon kitermeléséből származik (pl. Vredefort, Dél-Afrika és Sudbury-medence, Kanada) (French, 1998). Kisebb mértékben turisztikai és ismeretterjesztési vonatkozásai is vannak ezeknek a formáknak

A becsapódási folyamatok és kráterek témakörének szakirodalma a kapcsolódó tudományterületek és kutatási módszerek (geomorfológia, geológia, geofizika, geokémia, fizika, statisztika) sokrétűsége miatt igen szerteágazó és gyakran specifikus témákat ölel fel (pl. egy-egy kráter valamely morfológiai egységének, vagy azon belül is meghatározott mintavételi pontoknak a részletes elemzése valamely módszer segítségével). A témához kapcsolódó konferenciák (pl. az évente megrendezett *Lunar and Planetary Science Conference*; vagy az *Annular Meeting of the Meteoritical Society*) keretében megjelenő abstractok, rövid beszámolók száma több százas, ezres nagyságrendet ér el. Külön tárgyalandóak a különböző internetes források, melyek jelentős része ismeretterjesztési célokat szolgál, de amelyek között megtalálható az ismert földi meteoritkráterek hivatalos listája is, az Earth Impact Database. Előnye, hogy jól áttekinthetően, táblázatos formában foglalja össze a kráterek főbb jellemzőit (név, földrajzi koordináták, átmérő, kor, a célközet típusa, és néhány esetben a becsapódó meteorit összetétele).

Hátránya, hogy a kontinensenkénti besorolások Európa és Ázsia tekintetében nem teljesen pontosak; illetve hogy az ún. krátermezők átmérőadatait pontatlanul adja meg.

A tudományos igényű tanulmányok és cikkek vonatkozásában kiemelhetőek azok, a kráterképződést és az egyes kráterek általános jellemzését taglaló (akár földrészenként), jobbra áttekintő jellegű munkák, amelyek elsősorban a korábbi kutatások és tanulmányok összefoglalásaként értelmezhetőek, kevésbé dominál bennük egy-egy specifikus kutatási módszer (pl. French, 1998; Koeberl, 1994; McCall, 2009).

3.2. A téma szakirodalmának és kutatásának magyar vonatkozásai

A magyar tankönyvek már az 1850-es évektől megemlítték a holdi krátereket, de azokat a földi morfológiai analógiák alapján még vulkáni eredetűnek tartották (in: Bérczi et al., 2005). A döntően vulkanikus eredetet valószínűsítő nézet az 1950-es évekig megfigyelhető a magyar tankönyvekben (in: Bérczi et al., 2005), habár a lehetséges meteorikus eredetet is egyre inkább teret nyert. Az 1960-as, és '70-es évektől pedig már a külföldi szemlélethez hasonlóan hazánkban is (az Apollo-missziók holdi megfigyeléseivel összefüggésben) egyre jobban felerősödött ezen holdi formák impakt eredete.

A földi kráterek magyar vonatkozású, tudományos igényű feldolgozása és a hazai kötődésű kutatások gyökerei az 1970-es évekre vezethetőek vissza: a kanadai állampolgárságú geológus, Dojcsák Győző 1974 júniusában tartotta meg Budapesten kandidátusi értekezését, „*A meteoritkráterek morfogenezise és gazdasági jelentőségük*” címmel. A főleg külföldi (Kanada, USA) kutatásokat végző kutató téziseiben feldolgozott témakörök és a megközelítés alaposan körbejárta a becsapódások kérdéskörét. A geológiai és természetföldrajzi szempontok mellett olyan, – főleg azokban az időkben még kevésbé vizsgált – kérdéseket és jövőbe mutató problémákat is felvet, mint pl. az óceánokba történő becsapódások, vagy az impakt események lehetséges társadalmi hatásai (Dojcsák, 1974).

Szintén az 1970-es évekre nyúlik vissza Jakucs László becsapódási kráterekkel kapcsolatos munkásságának kezdete. A hetvenes évek első felében vetette fel két nagy földi formának (a Kaszpi-tó és a Fekete-tenger) a lehetségesen becsapódásos eredetét (Jakucs, 1975), amely

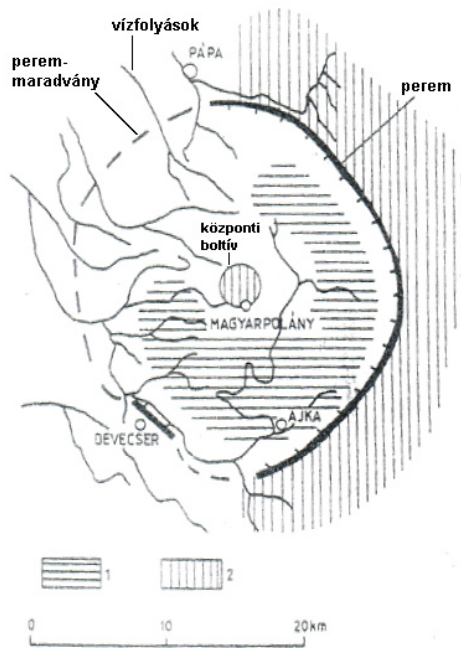
elmélet egyik esetben sem nyert a későbbiekben tudományos megerősítést. A kráterekkel kapcsolatos későbbi munkái azonban már tudományosan jobban alátámasztható témákat vizsgálnak: nevezetesen a földi meteoritkráterek műholdfelvételek alapján történő kimutatását (Jakucs, 1979), amely előremutató elképzelés, s ma is széles körben használt eszköz a kráterkutatók körében, de óvatosan kezelendő, elsősorban a kráter-felfedezések kezdeti stádiumában használatos eszköz, amely csak egy forma becsapódásos eredetének a lehetőségét veti fel, de nem bizonyítja azt. A végleges bizonyításhoz mára már elég pontosan definiált ásványtani, geokémiai és geofizikai bizonyítékok, ill. módszerek kellene (French, 1998). Ezek a bizonyítékok/módszerek viszont még az 1970-es évek végén sem voltak olyan általános érvénnyel elfogadottak (bár maga a szerző is utal a fontosságukra), mint manapság, ezért azokban az időkben még az űrfelvételeket is elfogadták bizonyító erejűnek esetenként. Ennek szellemében Jakucs László olyan, az űrfelvételen körszimmetrikus formát mutató képződményekről is kijelentette, hogy becsapódásos eredetű (pl. a kb. 55 km átmérőjű, mauritániai Richat-szerkezet; vagy a dél-afrikai Pilanesberg-szerkezet – in: Jakucs, 1979), amelyeknek a meteorikus eredetét már egy évtizeddel korábban megcáfolták ásványtani vizsgálatokkal (Dietz et al., 1969; Fudali, 1969). Mindezek mellett Jakucs László jól kihangsúlyozza a kráterek felfedezésének egy nagyon fontos módszertani lépését, az űrfelvételek kielemezésének fontosságát, habár néhol azt túlhangsúlyozva, egyben becsapódásos eredetet bizonyító szerepet is tulajdonít azoknak (illetve az űrfelvételeken látható körszimmetrikus alaknak). Jelenlegi ismereteink tükrében is jól látta azonban becsapódásos kráterek alapvető morfológiai szerepét a Naprendszer szilárd felszínű égitesteinek a felszínén; valamint az évmilliárdok óta stabil állapotú ősi pajzsterületek szerepét kráterek felhalozódásában a Földön, valamint az intenzívebb kráterpusztulást az egyéb területeken (Jakucs, 1979).

A következő fontos dátum 1977, a már kifejezetten hazai vonatkozású kutatásokat illetően: az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet munkatársa, Varga Gábor ekkor tett először említést egy érdekes, mindmáig tisztázatlan eredetű geofizikai jelenségről, a Mecsek déli lábánál fekvő Magyarmecske település környékén. A geofizikai anomália a mélyben fekvő, karbon korú kőzetek elektromos-vezetőképességét mutató izovonalak koncentrikus elrendeződésében nyilvánul meg (ez az ún. *magyarmecskei tellurikus anomália*), ami egy eltemetett, közel körszimmetrikus (pontosabban: egy kb. 6x8 km-es, enyhén ellipszoid alakú) medence-szerkezetre utal (Bodoky et al., 2007). A további

geofizikai vizsgálatok (reflexiós szeizmikus mérések) a közel körszimmetrikus, medence-jellegű megjelenés mellett egy sánc-jellegű képződményt, ill. egy központi boltívet is kimutattak (Bodoky et al., 2007). Ezek a morfológiai elemek akár egy eltemetett, ún. komplex-szerkezetű meteoritkráterre is utalhatnak. Az egyértelmű bizonyításhoz azonban további ásványtani és geokémiai vizsgálatokra is szükség van.

A magyarországi kutatások közül időrendben haladva még egy érdekes fejezetet érdemes kiemelni, amely a Bakony északi részén (a Pápa-Ajka-Devecser háromszögben) már korábban leírt koncentrikus vetőrendszerhez (magyarpolányi szerkezet) kötődik (Moldvay, 1981). E szerkezet kapcsán 1981-ben említette meg Moldvay Lóránd egyik tanulmányában (Moldvay, 1981), hogy ilyen geológiai képződmények akár becsapódások következtében is kialakulhatnak az ősi pajzsterületeken, de az adott esetben ezt kriptovulkáni képződménynek tartotta (Moldvay, 1981). Ugyanez a szerző 1987-ben pedig már egyértelműen impakt eredetűnek vélte a formát, a területen található, az általa ún. „*benyomatos kavicsok*”-nak nevezett jelenség miatt (a szerző benyomatos kavicsoknak nevezte azokat a kisméretű, pár mm-es, cm-es nagyságú kőzetdarabkákat, amelyek egy nagyobb kőzettestbe vájtt csatornán át benyomulva, és ott kis fülkét kialakítva ültek). Moldvay szerint ezek a kőzet-benyomódások csakis egy becsapódás energiája által jöhettek létre, fizikai mechanizmus alapján (Moldvay, 1987). A kutató maga is elismeri, hogy más, addig (1987-ig) felfedezett kráternél ilyen nem írt le sem a hazai, sem a külföldi szakirodalom (megjegyzés: 2013 elejéig az óta sem említettek hasonló jelenséget bizonyítottan becsapódásos eredetű krátereknél). Morfológiai elemeket (központi boltív jellegű képződmény) és izotóp-anomáliákat vonultat még fel a szerző a becsapódásos eredet bizonyítása ügyében (Moldvay, 1987). Szederkényi Tibor újabb vizsgálatai mind morfológiai, mind ásványtani-geológiai vonatkozásban cáfolták a meteorit-becsapódás elméletét a magyarpolányi-szerkezet esetében (Szederkényi, 1996). A Gyenizse Péter - Nagyvárad László - Pirkhoffer Ervin alkotta szerzőgárda kísérletei sem támogatták a becsapódásos eredetet (pontosabban fogalmazva: bebizonyították, hogy nem feltétlenül kell a becsapódás energiája ilyen képződmények létrejöttéhez). Modellkísérlettel igazolták, hogy a Moldvay által felvonultatott egyik fő érv az impakt eredet mellett, azaz a „benyomatos kavicsok” kialakulása hagyományos, szénsavas oldási mechanizmus által is lehetséges (Gyenizse et al., 2002), ami a karsztos kőzetekből álló magyarpolányi mélyedésnél nagy valószínűséggel bekövetkezhetett. A szerkezet vízhálózati rajzolata (2. ábra) sem

támogatja a becsapódásos elméletet, ugyanis a meteoritkrátereknek a legtöbb esetben csak egy lecsapoló folyójuk van (v.ö. a 77. ábrával). Az enyhén elnyúlt, elliptikus forma sem általánosan jellemző a meteoritkráterekre.



2. ábra. A magyarpolányi-szerkezet vízhalózata.
(Szederkényi, 1996)

Az egyéb magyar meteoritkráter-szakirodalmi vonatkozások tekintetében inkább az összefoglaló jellegű munkák emelhetők ki. Ezek közül is a legérzletesebb és legátfogóbb az ELTE TTK Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Csoportja által készített *Naprendszer kisenciklopédiája - A Naprendszer formakincse sorozatból a Becsapódások folyamata, nyomai és hatásai* című kiadvány (Hargitai et al., 2003). A magyar kiadású ismeretterjesztő könyvek közül a leginkább téma-specifikus a Kereszturi Ákos és Sárneczky Krisztián által megírt *Célpont a Föld? – Kisbolygók a láthatáron* címmel napvilágot látott kiadvány (Kereszturi és Sárneczky, 2003), amely az aszteroidák és kutatástörténetük ismertetését, valamint néhány földi kráter bemutatását tűzte ki célul. A Gábris Gyula – Marik Miklós – Szabó József szerzőgárda fémjelezte *Csillagászati földrajz* című egyetemi tankönyv (Gábris et al., 1991) a planetológiai fejezetekben ismerteti a meteorokat, és utal a

becsapódások alapvető formaképző szerepére is a Naprendszerben. Az egyes bolygók (Merkúr, Mars) valamint a bolygók holdjai, ill. a Föld holdjának tárgyalásakor külön kiemeli a becsapódási formák sokszínűségét a különböző égitesteken, utal a kráter-eloszlások szerepére az egyes felszíndarabok relatív kormeghatározásának kérdésében. Külön fejezetet szentel a földi krátereknek, néhányat ismertet is közülük. A planetológiai rész összefoglalójában pedig még egyszer visszatér a kráterek általános szerepére és arra, hogy milyen tanulságok vonhatóak le vizsgálatuk által, úgy az egyes égitestekre, mint a Földre. Az egyetemi jegyzetek közül a Bérczi Szaniszló által írt *Planetológia* című jegyzet (Bérczi, 1993) nyújt betekintést a meteoritok felépítésébe, ill. a kráter-kronosztratigráfiába, azaz a kráter-eloszlások statisztikai vizsgálatával meghatározható ún. dátum-síkok rendszerébe a Hold, a Merkúr és a Mars példáin. További részletes ismertetés található a meteorit-becsapódásokról az egyetemi földrajz-oktatásban használt *Geomorfológia II. – Földfelszíni folyamatok és formák* című egyetemi tankönyv második kötetében (Gyenizse, 2008, in: Lóczy [szerk.]). A hazai megfigyelések vonatkozásában megmlíthető még a magyar videometeoros hálózat is, amely az ország több pontján felállított nagy érzékenyséű kamerával pásztázza az éjszakai ébort, vizuálisan azonosítva a behulló meteorokat. Több kamera szerencsés megfigyelési adatai alapján akár az esetlegesen földet érő törmelék lehullási helye is megadható.

4. Az alkalmazott módszerek

A dolgozat célkitűzéseivel összhangban az alkalmazott módszerek leginkább természetföldrajzi megközelítésűek. Az első rész kráterképződési paramétereinek kiszámolásához az online alkalmazható Earth Impact Effects programot (Marcus et al. 2010) használtam, amely habár a jelen tudásunk szerint vett legpontosabb fizikai összefüggéseket alkalmazza a különböző becsapódási körülmények modellezéséhez, azonban mégis a valós értékek közelítő pontosságú becslésére alkalmasak csupán.

Az eloszlások vizsgálatánál az Earth Impact Database adatait tekintettem elsődlegesnek, helyenként egyéb, szakirodalomból átvett adatokkal kiegészítve (mindenekelőtt a kráterek átmérőadatait illetően). Ezen elsődleges adatokból származtattam további, másodlagos adatokat is, valamint bevezettem két új mérőszámot: a *kráterképződési intenzitást*, illetve a *közvetett energia-fel szabadulási intenzitást*. Mindkét mérőszám

kontinensekre; ill. az egyes földtörténeti koregységekre lett meghatározva. Fontosnak tartottam továbbá, hogy a lehető legtöbb statisztikai mérőszámot meghatározott idő- és területegységekhez kössem (azaz fajlagos mérőszámokat dolgozzak ki), az összehasonlíthatóság érdekében. Ennek tükrében a *kontinensenként vett* (azaz terület-alapú) eloszlásoknál millió négyzetkilométerekre határoztam meg a kráter-statisztikai értékeket; a *földtörténeti kor szerint vett* (azaz idő-alapú) eloszlásoknál pedig millió évekre vonatkoztatva számoltam ki azokat. Az idő alapú eloszlások földtörténeti korszaklájának beosztásaihoz az International Stratigraphic Chart 2009-es adatait tekintettem mérvadónak. Az elsődleges adatok (a kráterek jelenkori földrajzi koordinátái; átmérő; kor; a becsapódási alapkőzet; valamint a kráterek jelenkori földrajzi koordinátáinak Köppen-Geiger féle éghajlati típusa) alapján globális térképi ábrázolásokat készítettem, a térbeliség különböző aspektusaiból vett esetleges összefüggések és szabályszerűségek jobb felismerhetősége érdekében.

Az adatok feldolgozása és a statisztikai elemzések, valamint a hozzájuk kapcsolódó diagramok, ill. grafikonok Microsoft Excel program segítségével készültek; az eloszlásokhoz tartozó térképi ábrázolások pedig ArcGis szoftverrel. A 3D-s morfológiai ábrák elsődleges adatforrása a Google Earth és az SRTM adatbázisa volt, a további feldolgozást Global Mapper szoftverrel végeztem el. A vízrajzi térképek alapjai a Microsoft Encarta World Atlasból kerültek kivágásra és további feldolgozásra, melynek keretében a vízvásztók alapján, ill. a kráter középpontjához viszonyított futásirányok meghatározása alapján a térképek módosításával végeztem a folyóhálózati rajzolat jellemzőinek a kimutatását és a vízrajzi elemzéseket. A különböző folyamatok szemléltetésére további ábrákat szerkesztettem. Az ábrák grafikai programmal készültek (Paint, Paint Shop Pro). Terepi vizsgálatokra is sor került 2009 szeptemberében: a délnémetországi Nördlingen-Ries (Bajorország) és a Steinheim (Baden-Württemberg) szimultán-becsapódásos meteoritkrátereknél végeztem terepi megfigyeléseket és mintagyűjtést. Az alkalmazott módszerek, valamint a kapott eredmények kiértékelésénél és értelmezésénél figyelembe veendő tényezők (pl. a bizonytalansági faktorok) a vonatkozó vizsgálati fejezeteknél kerülnek részletes tárgyalásra.

Módszertanilag még egy fontos problémával szembesültem az adatok elemzése és a térképek szerkesztése során. Nevezetesen azzal, hogy a vizsgálatoknál mi az a legmélyebb részletességi szint, amelynél a kinyerhető következtetések még kellően informatívak és megalapozottak, illetve ahol még az adott szint fontosabb bizonytalansági tényezőit is meg lehet objektíven fogalmazni. Két példával szeretném ezt megvilágítani: az

eloszlásoknál olyan földtörténeti kor-, és terület-intervallumokat kellett találnom, amelyek a lehető legrészletesebb felbontást teszik lehetővé, azonban az elemszámokat (azaz az így megalkotott kategóriákba besorolt kráterek számát) ne aprózza szét olyan szinten, ami lehetetlenné teszi a főbb statisztikai trendek kiolvasását. A *vízhalózáti vizsgálatoknál* pedig arra kellett figyelni, hogy lehetőleg a vízhalózat azon elemei kerüljenek vizsgálatra, amelyek kialakulását a kráterek specifikus szerkezeti egységei (pl. sánc, medence, impakt vetődések) befolyásolták, elkülönítve tehát őket a másodlagosan kialakuló, általánosabb jellegű eróziós vízhalózatoktól.

5. A becsapódó test (impaktor)

5.1. A meteorok-, az aszteroidák (kisbolygók) és az üstökösök főbb jellemzői és típusai

A becsapódó meteorokat, aszteroidákat és üstökösöket összefoglaló névvel impaktornak nevezzük.

A világűrben keringő meteorok (Földet érés után nevezzük őket meteoritnak), aszteroidák és üstökösök leginkább egy mérettartományi alapon elkülönített égitest-kategóriaként értelmezhetőek. Anyagi összetételük tetszőlegesen tartalmazhatja (ld. még a 3. ábrát):

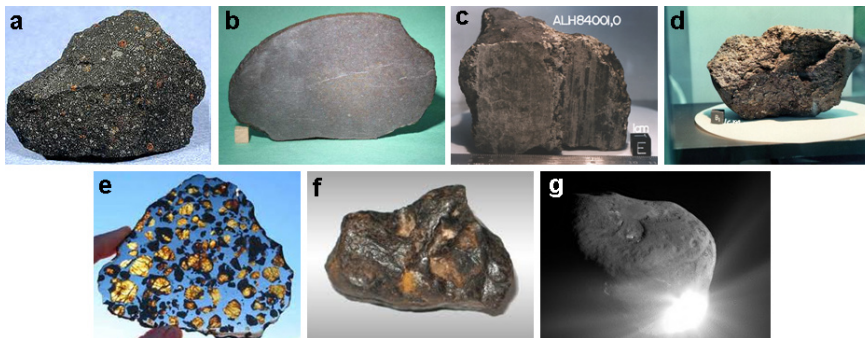
- A Naprendszer differenciálatlan szilikátos őanyagát (a kondritos-meteorok különböző típusai).
- A bolygók és holdak differenciált szilikátközetait és az ásványait (ezek az ún. akondritos- és a vas-nikkel meteoritok).
- A könnyen-illók kondenzációja által keletkezett vízjeget (üstökösök).
- Valamint a fentiek keverékét.

Méretkategória alapján Naprendszer kis égitestei közé sorolhatóak az impaktorok, az alábbi – meglehetősen szubjektív – al-kategóriákkal (*1. táblázat*):

1. táblázat. A mérettartományi alapon elkülöníthető főbb impaktor-kategóriák. (Bérczi et al. 2005; French, 1998; Carr, et al., 1984 alapján saját szerkesztés)

<i>megnevezés</i>	<i>mérettartomány</i>	<i>jellemzői</i>
mikrometeoritok; kozmoszpor	mikrométeres és milliméteres	Többnyire szilikát-, ill. vas-nikkel törmelékek. Eredetüket tekintve lehetnek elsődleges inszolációs- és ütközési törmelékek, ill. az üstökösök csóvájában lévő porszemcsék. Becsapódási szempontból a Földön nincs jelentőségük a földi légkör ablációs hatása miatt. Nagyobb példányok optikai megnyilvánulása a hullócsillag-jelenség. A légkör nélküli égitesteken (és a mesterséges űreszközök felületén) azonban a szám szerinti leggyakoribb becsapódási forma a mikrometeorit-kráter.
kisméretű meteorok; meteor-törmelékek	centiméterestől a kb. méteres-tíz méteres átmérő-kategóriáig	Legnagyobb részt szilikát- és vas-nikkel darabok. Kisebb példányainak (deciméteres nagyságrendben) látványos légköri megsemmisülése az ún. bolidá (tűzgömb) – a hullócsillagoknál jóval nagyobb fényességű, de még jobbára a légkör felső részében elhamvadó meteor.
meteoritok; kisbolygók; üstökösök	a néhány száz tízméterestől terjed az akár több tíz- vagy száz kilométeresig	A földi meteorit-becsapódások és a kráterképződés szempontjából a legfontosabb méretkategória. A meteorit elnevezés magában foglalja azt, hogy az adott égitest egy kis darabja már földet ért, azaz egy akár csak minimális méretű (néhány száz tíz centis vagy 1-2 méteres) krátert már hagy maga után.

A fenti kategóriák nem egységesek, pontos mérethatárok meghúzása az egyes kategóriák között objektív alapon nem is igazán lehetséges (pl. már az gondot jelenthet, hogy az esetek döntő többségében nem szabályos gömbszerű a test, és ilyen esetekben több tengely mentén lehet egymástól jelentősen eltérő átméreteket mérni). Alkalmazásuk, nevezéktanuk még a szakirodalomban is sok esetben meglehetősen szubjektív, a téma tárgyalása szempontjából azonban ez általában nem jelent értelmezési problémát.



3. ábra. A Földet érő kozmikus objektumok főbb típusai. a – kondrit; b – akondrit; c – Marsról származó meteorit; d – a Holdról származó meteorit, e – kő-vas meteorit; f – vasmeteorit; g – üstökösrag (vízjég).

(internetes források alapján)

5.2. Anyagi összetétel szerinti csoportosítás

Anyagi felépítés szempontjából már egzaktabb osztályozás lehetséges. A becsapódó meteorit anyaga nagyban befolyásolja a kráterképződés mechanizmusát, mindenekelött a szilárdsága és a sűrűsége által. Minél nagyobbak ezek a szilárdsági és sűrűségi értékek, adott (gömb-szerűnek feltételezett) meteorit-átmérő, becsapódási sebesség és becsapódási szög esetén a képződő kráter annál nagyobb lesz. A négy legfőbb anyagtypust a 2. táblázat ismerteti, azokkal a tájékoztató jellegű, közelítőleges sűrűség-értékekkel, és relatív szilárdságokkal, amelyek alapján a 6.2. alfejezetben látható szimulációs számítások alapját képező Earth Impact Effects Program (Marcus et al. 2010) is használ.

2. táblázat. Az impaktorok anyagi összetétel szerinti főbb típusai. (Marcus et al., 2010; Greely, 1985; Carr, et al., 1984 alapján saját szerkesztés)

anyag	átlag-sűrűség (kg/m ³)	relatív szilárdság	eredet	fő előfordulási helyük a Naprendszerben
vízjég	kb. 1000	kicsi	a Nap által a Naprendszer peremvidékére kifújtt könnyű illó-elemek és vegyületek (mindenekelött a víz) kifagyásos kondenzációja által. Gyakran szilikáttal szennyezett	a belső- és a külső Oort-felhő
kondrit	kb. 1500	közepes	a kőzetbolygók és holdak őanyagának elsődleges, még differenciálatlan változata. Koruk: ~4,5 mrd év	(1), a Mars és a Jupiter közötti fő-kisbolygóöv (a Földbe csapódó meteoritok és kisbolygók nagy része innen származik);
akondrit	kb. 3000	nagy	a kőzetbolygók és holdak őanyagának valamekkora fokú utólagos differenciálódásával és az ezt esetlegesen követő ütközéses szétaprózódással. Koruk: <4,5 milliárd év	(2), a Neptunuszon túl található Edgeworth-Kuiper öv;
vas-nikkel	kb. 8000	nagyon nagy		(3), az eredeti pályájukról kiszórt, ill. elszórtan vándorló kisbolygók, meteorok

6. A meteorit-becsapódás folyamata és a kráterképződés mechanizmusa, valamint a meteoritkráterek morfológiai jellegzetességei

6.1. A becsapódás fázisai és folyamata

A meteoritok becsapódási folyamata a légkörbe lépéssel indul meg, a kráterképződés pedig a meteor földet érésével veszi kezdetét. A kráterképződés folyamata különböző fázisokon át megy végbe, melynek főbb állomásai a 3. táblázatban olvashatóak:

3. táblázat. A meteorit-becsapódás, valamint a kráterképződés folyamatának főbb fázisai. (Bérczi et al. 2005; French, 1998 alapján saját szerkesztés)

a kráterképződési fázis	jellemzői	a kialakuló formák
(1), a légkörbe lépés és a légköri áthaladás	fékezés; felizzás; ionizáció; esetleges abláció és/vagy felrobbanás	nagy erejű légköri robbanás esetén a lökéshullám felszíni nyomai (pl. letarolt erdő)
(2), átmeneti (tranzien) fázis	a becsapódás kezdeti stádiuma és a kráterképződés megindulása; a meteorit még nem semmisül meg teljesen, de kellően nagy becsapódási energia esetén elkezdődik a felrobbanása és elpárolgása	a meteor elsődleges mozgási energiája által kivált tranziens kráter; ill. az ún. távoli törmelékterelő legkorábbi képződési fázisa
(3), a kráter oldalirányú (horizontális) növekedése	a hidrodinamikai-jellegű mozgás megindulása a becsapódás célterületén, jelentős függőleges és oldalirányú elmozdulások kíséretében; a kráterképződés kiteljesedése	az ún. közeli törmelékterelő és a sánc; központi boltív; központi gyűrűív(ek); vetődések; gyűrődések; csuszamlások; teraszos kráterfal
(4), becsapódás utáni (poszt-impakt) fázis,	a kráter kialakulása után meginduló erózió a pozitív formaelemek (sánc, központi boltív- vagy gyűrűív); valamint a medence feltöltődése	a sánc fluvialis feldarabolódása; kapturák; jellegzetes völgyrajzat; eróziós és akkumulációs formák

Az alábbi fejezetek a főbb fázisokat és azok jellemző folyamatait ismertetik.

6.2. A légkörbe lépés és a légköri áthaladás

A Földet övező légkör jelenti az első akadályt a felszín felé közeledő meteor számára, és mivel a légkör fizikai szerkezete a jelen téma szempontjából közel azonosnak tekinthető a földfelszín bármely pontja felett, ezért a légköri áthaladás jellegét mindenekelőtt a belépő

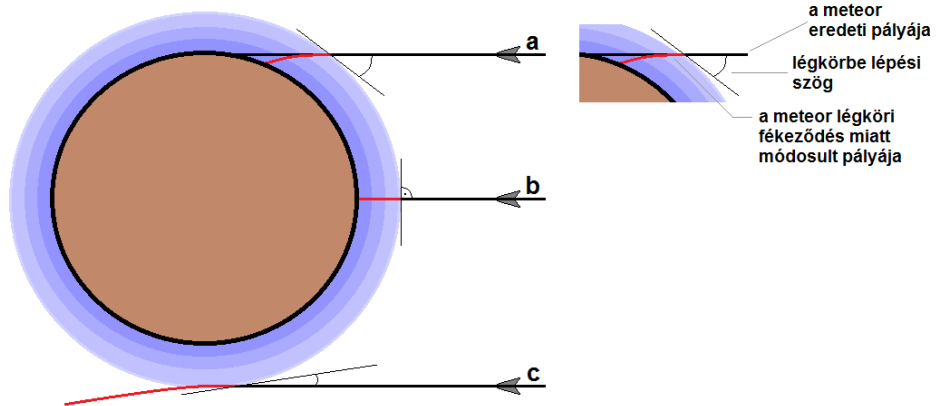
meteor tulajdonságai fogják meghatározni, úgy, mint a tömeg, az anyagi minőség, a sebesség, az alak és a belépési szög. Az atmoszféra akár magát a becsapódást is meghiúsíthatja, mert a kisméretű (pár méteres, vagy annál kisebb) testeket a légkör a közegellenállásával felemésztheti (hullócsillag; bolida) (7. ábra). Az ekkor látható fényjelenséget nem elsősorban a meteortest felizzása okozza, hanem az, hogy a röppályája mentén az útjába kerülő légköri gázokat ionizálja (ioncsatornát hoz létre), és az e mentén kialakuló ún. rekombinációs zóna bocsájtja ki a fényt.

Nagyobb meteor-átmérő esetén, de alacsony belépési szögnél pedig a meteor lepattanhat a légkör külső részéről (4. ábra). A légkörön történő megpattanás és a világtűrbe való távozás azonban ritka jelenségnek számít, legismertebb példája az ún. Teton-kisbolygó 1972-es magaslégköri lepattanása.

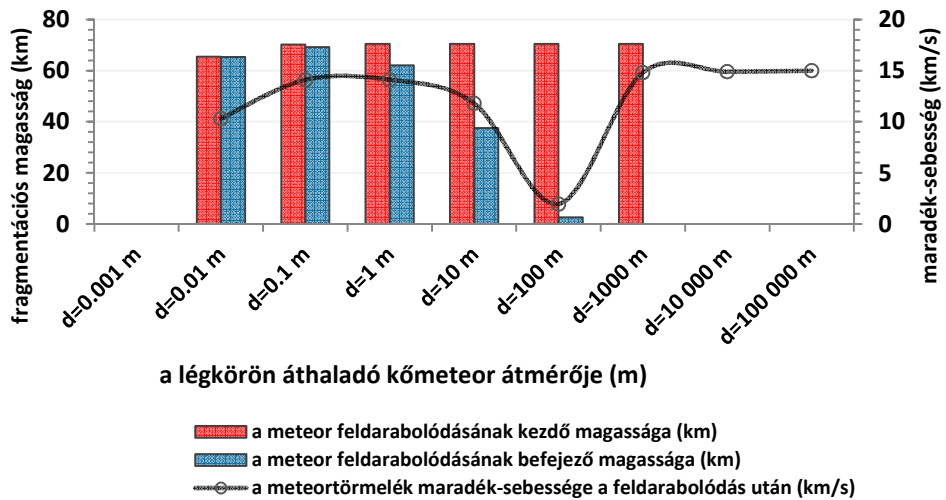
Minél kisebb szögben lép egy meteor az atmoszférába, annál hosszabbá, s ez által fokozatosabbá válik a mozgási energia átadása a környező légtömegnek, azaz a fékeződése és energia-leadása kiegyenlítettebb lesz, nem pedig olyan robbanásszerű, mint 90°-os (vagy ahhoz közeli) belépési szögnél. Ez azt jelenti, hogy azonos belépési sebesség, meteorméret és anyagi minőség mellett a kisebb szögben érkező meteor kisebb valószínűséggel fog a túl hirtelen energia-leadás következtében felrobbanni és darabokra szakadni, és egyben nagyobb valószínűséggel fog a földet érése előtt jelentősen lefékeződni és/vagy elégni.

A légkörön történő megpattanásnál sokkal gyakoribb jelenség az, amikor a nagy sebességgel érkező meteor a hirtelen növekvő sűrűségű légköri rétegeken történő áthaladás miatt darabokra szakad (abláció, fragmentáció) (5., 6. és 7. ábrák). Ha elég nagy volt a meteor légkörbe lépési mérete-, tömege és szöge, ill. megfelelő volt a sebessége is, akkor a törmelékek nem hamvadnak el a légkörben, hanem darabjai földet érnek, krátermezőt hozva létre.

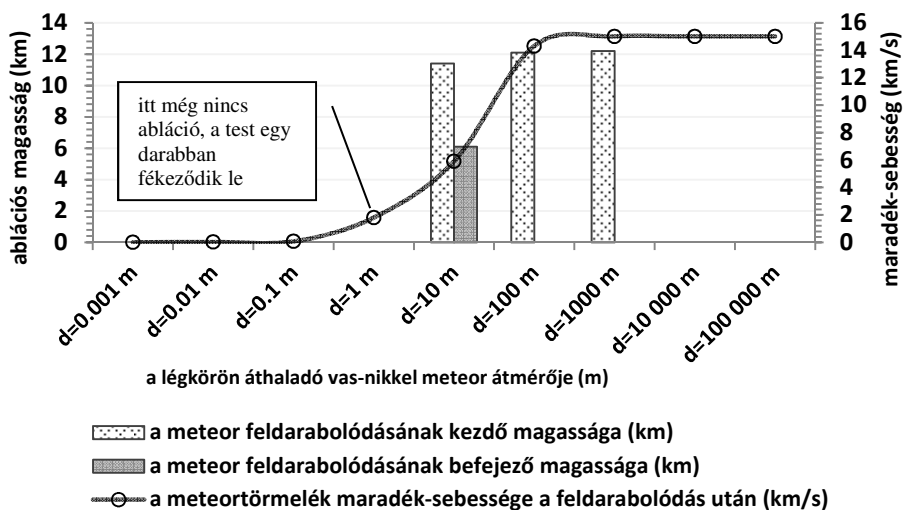
Az alább látható impakt paraméter-számítások az *Earth Impact Effects Program* (Marcus et al. 2010) alkalmazásával készültek, amely paraméterek kiértékelésénél figyelembe kell venni azt, hogy habár a jelenlegi legjobb tudásunk szerinti fizikai modellek és összefüggések alkalmazásával készültek (Collins et al., 2005), a valós becsapódási paramétereket azonban még ennek ellenére is csak megközelítik, de nem teljesen pontosan írják le azokat. Ezek alapján a kapott adatok nem tekinthetőek abszolút érvényűeknek.



4. ábra. A légkör pályamódosító hatása közepes szögű (a); derékszögű (b) és alacsony szögű (c) légkörbe lépés esetén. Az ábra nem méretarányos. (saját szerkesztés)



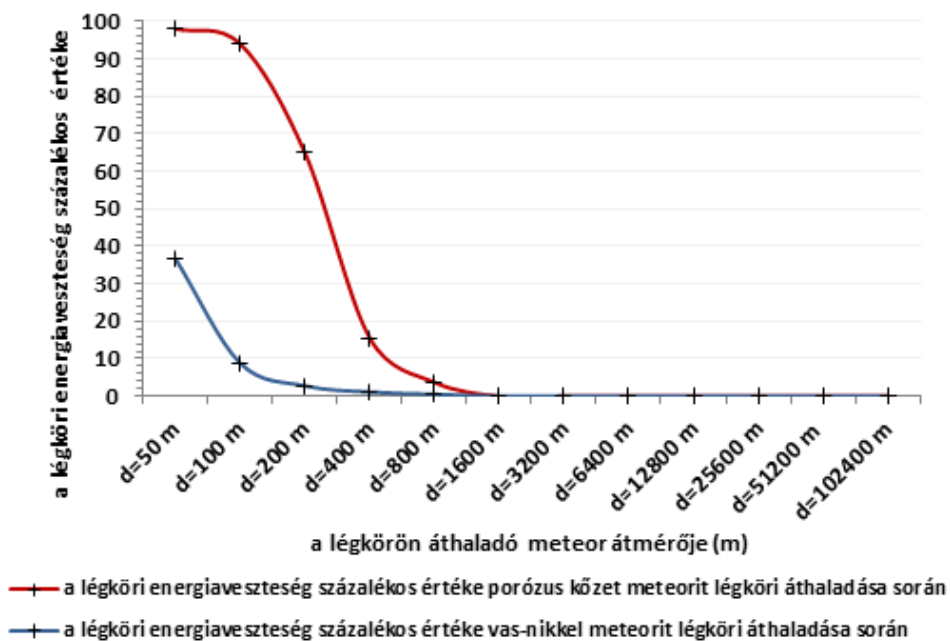
5. ábra. Porózus kőzetből álló meteorit légköri áthaladása során fellépő esetleges abláció (feldarabolódás) magassági adatai és a bekövetkező sebességváltozás mértéke különböző kiindulási meteor-átmérek esetén, gömb alakot feltételezve. A légkörbe lépési sebesség minden esetben 15 km/s; a becsapódási szög pedig 45°. (Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)



6. ábra. Vas-nickelből álló meteorit légköri áthaladása során fellépő esetleges abláció (feldarabolódás) magassági adatai és a bekövetkező sebességváltozás (maradék-sebesség a fékezés után) mértéke különböző kiindulási meteor-átmérek esetén, gömb alakot feltételezve. A légkörbe lépési sebesség minden esetben 15 km/s; a becsapódási szög pedig 45° .
(Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)



7. ábra. A légkörbe lépő meteor szétarabolódása (a Peekskill-tűzgömb példáján).
(forrás: <http://meteor.uwo.ca/>)



8. ábra. A légkörön áthaladó meteor légköri energiavesztesége porózus kőzetből álló meteor (3000 kg/m³); ill. vas-nikkel meteor (8000 kg/m³) esetében, különböző meteor-átmérok mellett (gömszerű alakot feltételezve). Mindkét esetben azonos a légkörbe lépési szög (45°) és a légkörbe lépési sebesség (15 km/s). (Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)

A fentiekben bemutatott, közelítő pontosságú számítások felhívják a figyelmet a légkör szerepére, mivel a kisebb energiájú (de azért az élővilágra lokális szinten már így is potenciális veszélyt jelentő) meteorok mozgási energiájának túlnyomó részét elnyelik, vagy csak korlátozott mértékben engedik a földfelszínig eljutni.

6.2.1. Kis sebességű meteorit-hullások: penetrációs kráter-, ill. krátermező képződése

Az atmoszférán átjutó és földet érő meteorit földet érésének helyét egy meteoritkráter fogja jelezni. A földet érés azonban többféle módon is végbe mehet, amely különböző folyamatokat generál, ill. ezen folyamatok eredményeként különböző krátertípusokat fog kialakítani. A fentiek alapján két fő típusba sorolhatóak a földet érések és a kráterek (9. ábra):

Kiseb meteorok a légkör fékező hatása miatt vagy egy darabban, vagy pedig darabokra hullva, a levegőre érvényes hangsebesség alatti

(azaz túlnyomórészt km/s nagyságrend alatti) sebességgel érnek földet. Ezek a *meteorhullások*. Jellemző krátertípusuk a pár méteres átmérőjű penetrációs kráter (gödörkráter), vagy krátermező (amennyiben volt légköri feldarabolódás), melynek mérete, ill. krátermező esetében a kis kráterek összesített átmérője tükrözheti a becsapódó meteorit méretét, amennyiben feltételezzük, hogy az egyes penetrációs kráterek kis sebességű (km/s alatti) becsapódások eredményei, és emiatt a kialakult kráter csak viszonylag kicsivel nagyobb, mint maga a meteorit.



9. ábra. A meteor sikeres légköri áthaladásának jellege (kék betűkkel), ill. az utána következő meteorit-becsapódás jellege és kráterképző mechanizmusai. (saját szerkesztés)

6.2.2. Nagy sebességű meteorit-becsapódások: egyszerű-, valamint komplex meteoritkráterek képződése, közös tranziens (átmeneti) kezdőfázissal

6.2.2.1. A tranziens fázis és a tranziens kráter

Az egyre nagyobb méretű és tömegű meteorokra már egyre kevésbé hat érdemben a légkör fékező hatása, emiatt az eredeti, világtűrbeli sebességükhöz egyre inkább hasonló sebességgel (km/s, tíz km/s nagyságrendben, de átlagos becslések szerint kb. 8 és 20 km/s közötti sebességtartományban) fognak földet érni. Ezt már *valódi (vagy nagy sebességű) becsapódásnak* nevezzük, de a közönséges meteorit-becsapódás elnevezés alatt is többnyire ezt szoktuk érteni. Itt már több krátertípus is kialakulhat. Ilyen típusú becsapódásoknál legelőször a test által közvetlenül kivájt kráter, az úgynevezett *tranziens (átmeneti) kráter* fog kialakulni (ezt szokták *tranziens fázisnak* is hívni) (Bérczi et al.,

2005). Ez az átmeneti kráter nagyjából tükrözi a becsapódó meteorit méretét, azaz a meteorit nagyjából illeszkedik a kráterbe (ennyiben hasonló a meteorhullások penetrációs kráteréhez). A tranziens fázis, amely a földet érés pillanatában kezdődik, nagyságrendileg kb. annyi ideig tart, amíg a meteorit az átmérőjének megfelelő távolságot megteszi (a földet érés pillanatában vett sebességet alapul véve) (Bérczi et al., 2005). Ha például a gömbszerűnek feltételezett becsapódó meteorit átmérője 1000 m, a sebessége pedig 10 km/s a földet érés pillanatában, akkor a fentiek alapján a tranziens fázis hossza és a tranziens kráter élettartama közelítőleg:

$$[1000 \text{ m}] / [10000 \text{ m/s}] = [0,1 \text{ s}]$$

A tranziens fázisban kezdődik meg a meteorit elporladása-elpárolgása, valamint a becsapódási energia fluxusa is ekkor a legnagyobb: a kilométeres-tíz kilométeres nagyságrendű meteoritok becsapódása alkalmával a hirtelen fellépő nyomáshullám (*ún. sokk-hullám*) frontján a nyomás elérheti a 100 gigapascalt (GPa) (French, 1998). Ez a normál tengerszinti légnyomás kb. 987000-szerese. Ezzel egyidejűleg a hőmérséklet pedig 4000-5000 °C-ig is emelkedhet, amely a rendkívüli nyomással karöltve a meteoritest túlnyomó részének, valamint a célterület felszíni, ill. felszínközeli rétegeinek azonnali elpárolgását okozza, mindenekelőtt a tranziens kráter fala és aljzata mentén. A tranziens fázis végére a meteorit nagy része és a tranziens kráterből származó anyag is olvadékká, porrá, illetve gőzzé válik (mint az fentebb látható, egy 1 km átmérőjű, 10 km/s sebességgel becsapódó, gömbszerűnek feltételezett meteorit esetén ez nagyjából 0,1 másodpercet vesz igénybe). Többek között emiatt sem marad a nagyobb krátereknél túl sok, hagyományos értelemben vett meteoritikus nyom a kráterben vagy annak közelében (pl. meteorit-törmelék), kivéve a megnövekedett ozmium- és irídium-koncentrációt a becsapódás környezetében. Az ozmium és az irídium eloszlása is arról tanúskodik, hogy a meteoritest nagy része gőz- ill. por fázisba került a becsapódás tranziens fázisa során, mert csak így lehetséges ezen ritka kozmikus elemek viszonylag egyetlen diszperziója a meteoritestből a kráter anyagába, valamint a környezetbe. Ebből is látható, hogy milyen gyorsan alakul át a meteorit mozgási energiája hőenergiává (frikciós- vagy súrlódási hő általi olvadás formájában), ill. a felszín mozgási energiájává (a kráterből kidobott anyag mozgása; rengéshullámok; sokk-hullámok; a hirtelen felnyíló vetők menti elmozdulások; gyűrődések formájában). Ez a magyarázata továbbá annak is, hogy miért eredményez a ferdeszögű (90 foktól jelentősen eltérő) becsapódások többsége is kör alakú krátert, ellipszis helyett. A

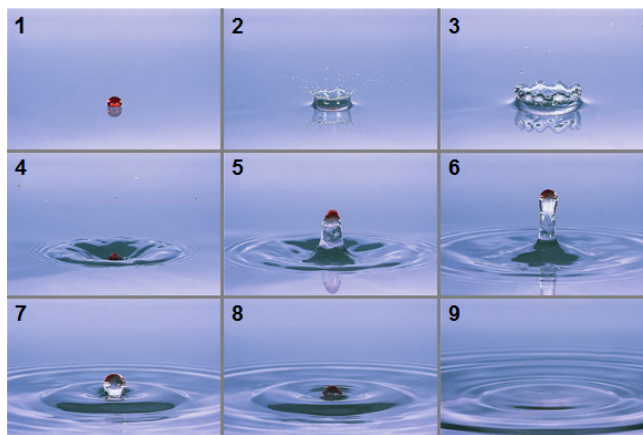
modellezések szerint csak az 5-10 fok alatti becsapódási szögeknél lesz elliptikus alakú a meteoritkráter (Scherler et al., 2006). Habár ezt a természetben még nem sikerült konkrét becsapódás példáján megfigyelni (mivel eddig semmilyen komolyabb becsapódást sem sikerült még megfigyelni – legalábbis a Földön), de pl. a Holdon és a Merkúron látható meteoritkráterek döntő többségének körszimmetrikus alakja valószínűleg szintén nem abból ered, hogy az ilyen típusú becsapódási krátereket minden esetben 90° fokhoz közeli szögben becsapódó meteorit alakította volna ki. Erre ugyanis a kisbolygók ekliptikához viszonyított pályáit megfigyelve statisztikailag elenyésző az esély. A fentebb leírt mechanizmus viszont segíthet megmagyarázni a körszimmetrikus formát ilyen esetekben is. A nagy sebességű, valódi becsapódások kezdeti, tranziens kráter-fázisa részben megfeleltethető a kis sebességű meteorhullások penetrációs kráterének, mivel mindkettő az első fázisa a meteorit és a földfelszín találkozásának. Míg azonban a penetrációs kráter a meteorit hullások kráterképződésének első, és egyben befejező fázisa is, addig a tranziens kráter a valódi becsapódások kráterképződésének csupán első lépcsőfoka, és akár a meteorit hullásokénál többtíz nagyságrenddel nagyobb energiaszintek felszabadulásának kezdeteként értelmezhető.

6.2.2.2. *A becsapódás célterületének impakt-hidrodinamikai jellegű mozgása*

Minél nagyobb a becsapódási energia (azaz minél nagyobb a meteorit légkörbe lépési- és utána a földet érési tömege és sebessége), egyidejűleg annál több képződési fázison megy át a képződő kráter, s ennek következményeként a végső szerkezete is annál nagyobb és komplexebb lesz. Tömören megfogalmazva: minél nagyobb egy becsapódás, annál jobban kiteljesedik a becsapódás célterületének ún. *impakt-hidrodinamikai jellegű* mozgása (Milam et al, 2004). Ez a hidrodinamikai-jellegű mozgás azt jelenti, hogy a szilárdnak tekintett felszín folyadékokra jellemző mozgást végez (amelynek megjelenése hasonló a közönséges vízcsepp-modellhez). Azaz a tranziens kráter aljzata rugalmasan vissz pattan, miközben a kráter oldalirányban kezd el növekedni (kinyílni). Ezt azonban nem elsősorban a célterület megolvadása, vagy bármilyen egyéb jellegű fluidizációja okozza (pl. a súrlódási hő, vagy a dekompressziós olvadás révén) – habár jelentős olvadékképződés is előfordul a nagyobb becsapódásoknál –, hanem a becsapódással következtében keletkező közettörmelék plasztikus

deformációja, valamint a szintén egyidejűleg felnyíló, felülnézetben a becsapódás középpontja körül koncentrikusan elrendeződésű impakt vetők menti vertikális elmozdulások összjátéka. Ez a folyamat maradandó nyomokat a földi kráterek esetében csak mintegy 4-5 km-es kráterátmérő fölött eredményez. Ezen átmérő alatt (pontosabban fogalmazva: a konkáv aljzatú kráterek esetében) *egyszerű meteoritkráterekről* beszélünk, hiányzik ugyanis a krátermedence aljzatáról az ún. *központi boltív*, amely a hidrodinamikai-jellegű mozgás legenyhébb, maradandó megnyilvánulási formája. A boltív a krátermedence központi aljzatának rugalmas visszapattanása által alakul ki. Formálódása a becsapódás utáni pillanatokban kezdődik a kráter kialakulásával egyidejűleg (szingenetikus forma). Szerkezete instabil, a kiemelkedés után nem sokkal (pillanatok, percek alatt) összeomlásnak indul a gravitáció hatására, de maradványa még így is jelentős dombsággként vagy hegytömegként magasodhat ki a kráterek medencéjének közepéről.

Tovább növelve a becsapódási energiát az egyre inkább túlfejlődő, egyre instabilabb- és emiatt egyre jobban össze is omló központi boltívet felváltja először egy, majd egyre több *gyűrűív* a kráter középpontja körül. Ezek szintén a kráter képződésével egy időben jönnek létre. Ezek a *központi gyűrűs –komplex– kráterek*. Ha a felszabaduló energia még nagyobb, a gyűrűívek a sáncon kívül is megjelenhetnek, főleg a jéggel borított égitesteken, de akár a nagyobb, földi meteoritkrátereknél is. Ilyenek a többgyűrűs medencék (French, 1998).

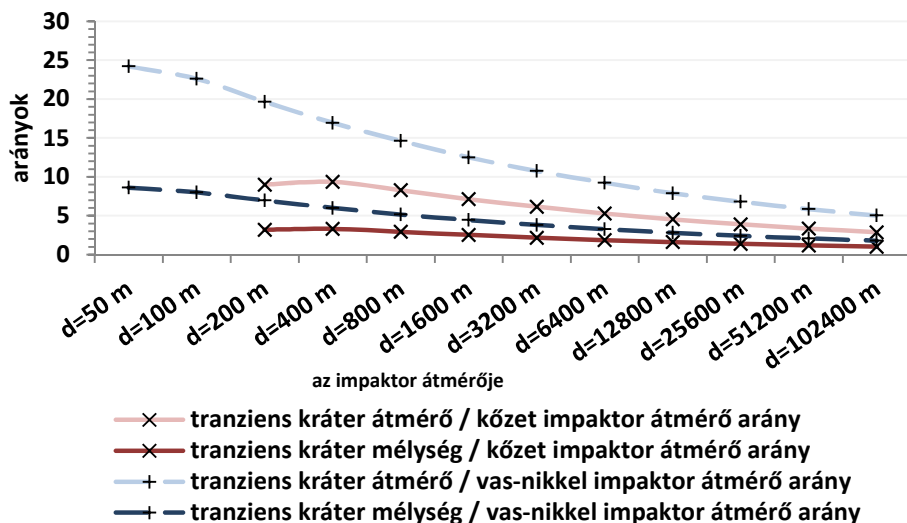


10. ábra. A közönséges vízcsepp-modell, a hidrodinamikai mozgás egyik alapesete. 1 – a vízcsepp (impaktor) és a felszín találkozásának első pillanata. 2 – a transziens fázis és a transziens kráterből kidobott anyag (meteorit-becsapódásoknál ez a törmelékeltakaró)

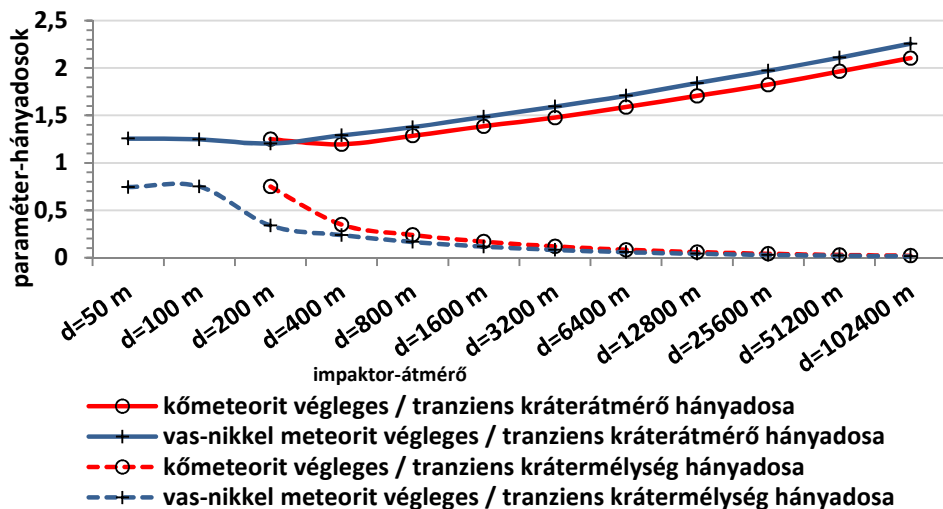
képződésének első fázisa. 3 és 4 – a kráter oldalirányú növekedése ('kinyílása') és a kráteraljzat rugalmas visszapattanása (a mélység/átmérő arány további csökkenése). 5 és 6 – a központi boltív kialakulása és a mélység/átmérő arány további csökkenése. 7, 8 és

9 – a központi boltív előbb részleges, majd pedig teljes összeomlása és ennek következtében a végső gyűrűív(ek) kialakulása.
(internetes forrás alapján saját szerkesztés)

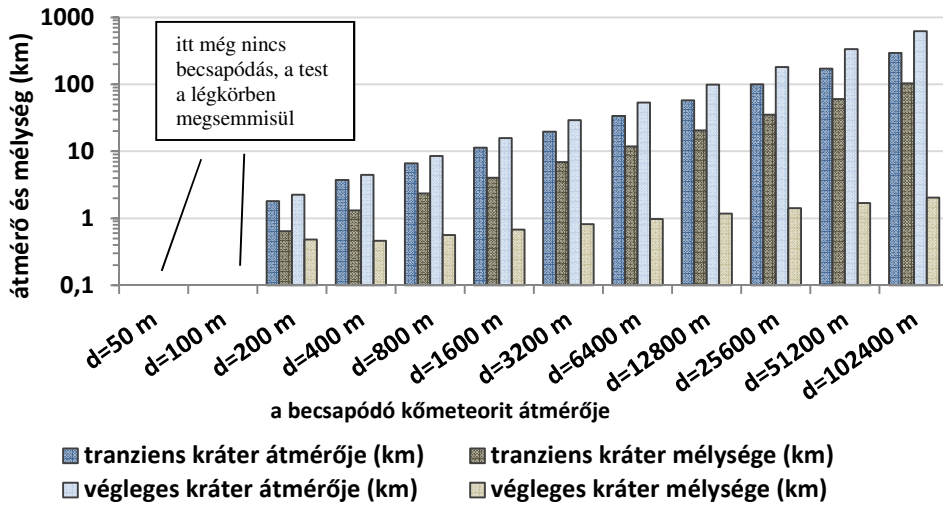
Az alábbi öt grafikon (11., 12., 13., 14, 15. és 16. ábrák) az impaktor, valamint a tranziens és a végleges kráterek dimenzióinak viszonyait mutatja be, két fajta becsapódás példáján: kőzet meteorit (1500 kg/m^3); ill. vas-nikkel impaktor (8000 kg/m^3) esetében. Mindkét típusú, gömbszerűnek feltételezett impaktornál 50 méteres átmérőtől kezdve kétszereződnek az átmérők, miközben az egyéb paraméterek minden esetben azonosak: a becsapódási sebesség 15 km/s ; a becsapódási szög 45 fok; a becsapódás célterülete pedig üledékes kőzetből áll (2500 kg/m^3). Látható, hogy a fentebb részletezett becsapódási paraméterek esetén a tranziens kráter átmérője $24,2$ -szerese, a mélysége pedig $8,6$ -szorosa az impaktornak, ha az vas-nikkelből áll, és eredetileg 50 méter ($0,05 \text{ km}$) átmérőjű. $102,4 \text{ km}$ -es impaktor átmérő esetén azonban a tranziens kráter átmérője már csak 5 -szöröse, mélysége pedig már csak $1,8$ -szorosa az impaktor átmérőjének (11. ábra). Hasonló irányú tendenciák figyelhetőek meg a kőzet-meteorit becsapódása esetében is. Azaz, minél nagyobb egy becsapódó meteorit mérete (és ez által a becsapódási energiája is), annál közelebb lesz az impaktor mérete és a tranziens kráter mérete egymáshoz (11. ábra). A 12. ábra a kráter kinyílásának és a kráteraljzat impakt-hidrodinamikai jellegű visszapattanásának jellemzőit mutatja be, a végleges/tranziens kráterek egymáshoz viszonyított átmérő-, ill. mélység arányainak feltüntetésével. Látható rajta, hogy az egyre nagyobb meteoritok becsapódásakor a végleges kráter átmérője arányaiban fokozatosan nagyobb lesz, mint a tranziens kráteré; még a mélysége arányaiban csökken. A 13. és 15. ábrák a tranziens és a végleges kráterek átmérőit és mélységeit mutatják abszolút értékben. Látható rajtuk, hogy még a tranziens kráter átmérője, mélysége és a végleges kráter átmérője nagyjából együtt növekszik az egyre nagyobb becsapódások esetében, addig a végleges kráter mélysége ezektől erősen elmaradó tendenciával növekszik csupán, az egyre erősebben érvényesülő, hidrodinamikai-jellegű aljzat-visszapattanás miatt. A 14. és 16. ábrák ugyanezt fejezik ki, de abszolút értékek helyett aránypárokkal.



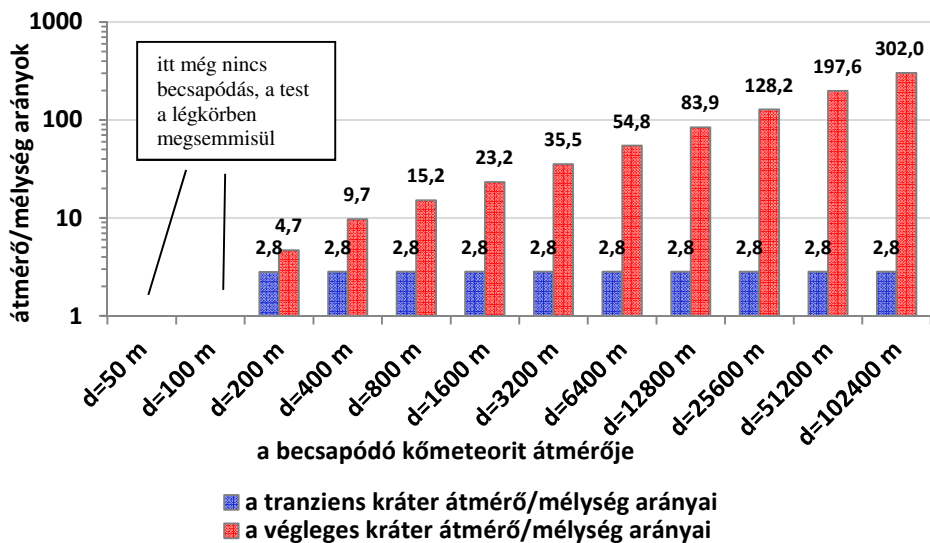
11. ábra. A becsapódó test méretének (átmérőjének) viszonya a tranziers kráter dimenzióihoz (átmérő, mélység) különböző anyagú impaktorok (1500 kg/m^3 sűrűségű kőzet és 8000 kg/m^3 sűrűségű vas-nikkel) esetén, duplázódó átmérők mellett. A minden esetben állandónak tekintett paraméterek: becsapódási sebesség 15 km/s ; becsapódási szög 45 fok; a becsapódás célterületét üledékes kőzetek alkotják (2500 kg/m^3). (Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)



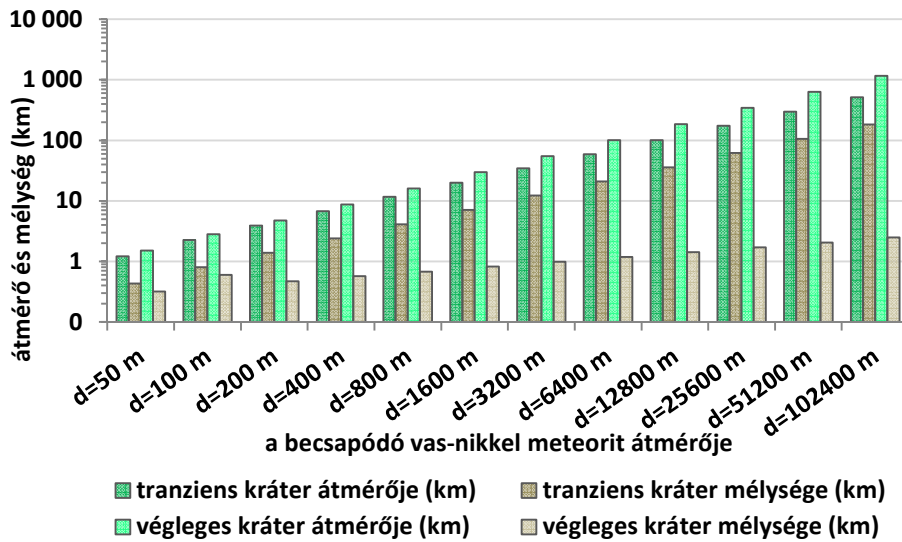
12. ábra. A meteoritkráter kinyílása (végleges / tranziers kráterátmérő hányadosok növekedése); ill. az aljzat rugalmas visszapattanása (végleges / tranziers krátermélység hányadosok csökkenése), mint a hidrodinamikai-jellegű felszínmozgás következménye becsapódások alkalmával. A minden esetben állandónak tekintett paraméterek: becsapódási sebesség 15 km/s ; becsapódási szög 45 fok; a becsapódás célterületét üledékes kőzetek alkotják (2500 kg/m^3). (Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)



13. ábra. A tranziens és a végleges kráter dimenziói közet meteorit becsapódása esetén, különböző gömbszerűnek feltételezett impaktor-átmérok esetén (1500 kg/m^3). A becsapódási sebesség minden esetben 15 km/s ; a becsapódás szöge 45 fok; az alapkőzet pedig üledékes kőzet (2500 kg/m^3). (Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)

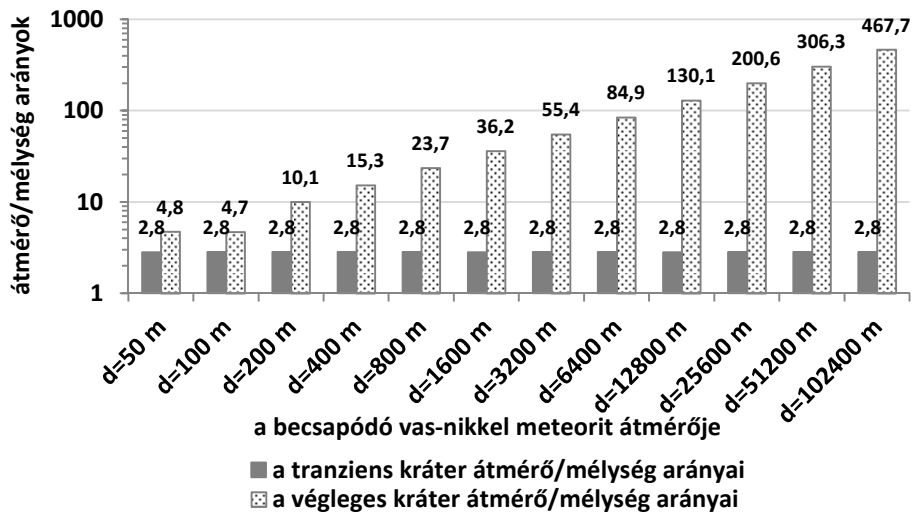


14. ábra. A tranziens és a végleges kráterek átmérő/mélység arányai különböző átmérőjű, gömbszerűnek feltételezett kőzet-impaktorok esetén (1500 kg/m^3). A becsapódási sebesség minden esetben 15 km/s ; a becsapódás szöge pedig 45 fok; az alapkőzet pedig üledékes kőzet (2500 kg/m^3). (Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)



15. ábra. A tranzienst és a végleges kráter dimenziói vas-nikkel meteorit becsapódása esetén, különböző, gömbszerűnek feltételezett impaktor-átmérek esetén (1500 kg/m^3). A becsapódási sebesség minden esetben 15 km/s ; a becsapódás szöge 45 fok; az alapkőzet pedig üledékes kőzet (2500 kg/m^3).

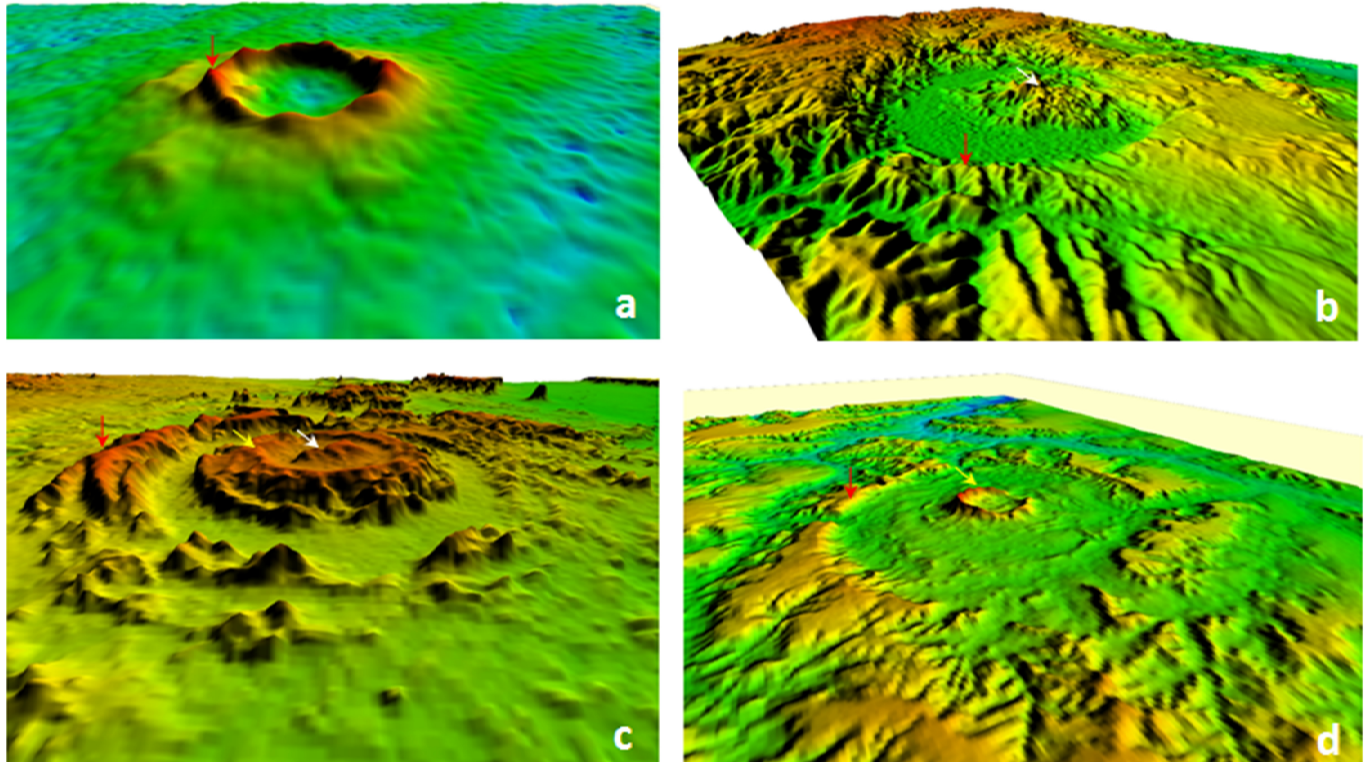
(Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)



16. ábra. A tranzienst és a végleges kráterek átmérő/mélység arányai különböző átmérőjű, gömbszerűnek feltételezett vas-nikkel impaktorok esetén (8000 kg/m^3). A becsapódási sebesség minden esetben 15 km/s ; a becsapódás szöge pedig 45 fok; az alapkőzet pedig üledékes kőzet (2500 kg/m^3).

(Earth Impact Effects Program [Marcus et al. 2010] alkalmazásával saját szerkesztés)

A 17. ábra a fentebb vázolt folyamatok eredményeit mutatja be vizuálisan, konkrét földi meteoritkráterek morfológiájának a példáján. A GoogleEarth és SRTM adatok felhasználásával készült 3D-s ábrák jól szemléltetik, hogy a valóságban hogyan is néznek ki a fent említett folyamatoknak az eredményei, és láthatóvá válik az is, hogy milyen geomorfológiai jellegzetességeket viselnek a meteoritkráterek. Ezek a morfológiai jellemzők aztán később döntően meghatározzák azt, hogy a dolgozatom másik nagy fejezetét képviselő folyóvízi kráter-lepusztulás hogyan tud elindulni, s megfelelő körülmények között egyre jobban kiteljesedni.



17. ábra (a, b, c, d). Az impakt-hidrodinamikai jellegű felszínmozgás utólagos nyomai földi meteoritkrátereken.

a – a Tenoumer meteoritkráter (d=1,9 km) madártávlati képe déli irányból, a magassági torzítás: 5x (itt még nincs hidrodinamikai jellegű mozgás)

b – a Gweni Fada meteoritkráter (d=14 km) madártávlati képe északnyugati irányból, a magassági torzítás: 3x

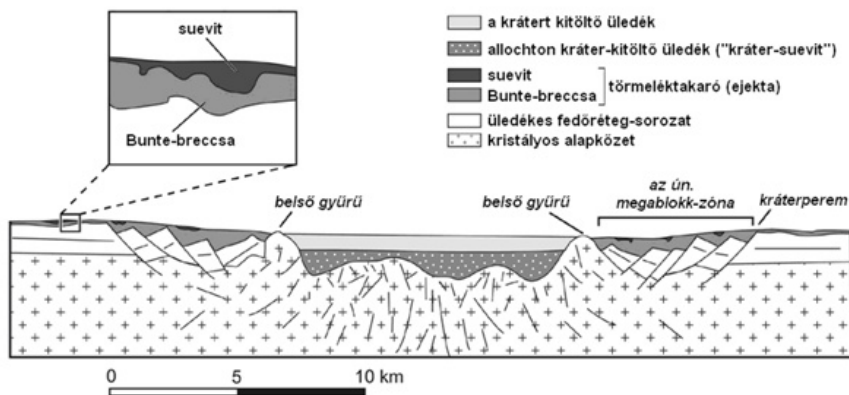
c – az Aorounga (d=12,6 km) meteoritkráter madártávlati képe déli irányból, a magassági torzítás: 5x

d – a Serra da Cangalha meteoritkráter (d=12 km) madártávlati képe délkeleti irányból, a magassági torzítás: 3x

Jelmagyarázat: piros nyíl – a kráter sánca (a megadott átmérők a piros nyíl által jelölt sáncre vonatkoznak); fehér nyíl – a központi boltív; sárga nyíl – a központi gyűrűív. (Google Earth és SRTM adatok felhasználásával saját szerkesztés)

6.2.2.3. Egyéb makro- és mikrodeformációs jelenségek

Mindezen nagyléptékű, makrodeformációs folyamatok mellett fellép még egy olyan jelenségcsoport is, amely szintén a meteoritbecsapódások jellemzője (a felszín alatti atomrobbantások mellett) és amelyeket *sokk-hullámoknak*, illetve az általuk kiváltott *sokk-metamorfózisnak* nevezünk. Előfordul egyszerű- és komplex-meteoritkráterek esetében is. Jellegzetes nyomuk a sokk-hullámnak kitett ásványokban megfigyelhető, bizonyos kristálytani orientációkban gyakorivá váló mikrométeres repedések és az ezek menti elcsúszások (planar fractures – PFs; ill. planar deformation features – PDFs) (Gucsik, 2003). Ezen sokk-hullámok keletkezése pontszerűnek tekinthető forrásból hirtelen felszabaduló, nagy energiának a gyors szétterjedésével magyarázható. Jellegzetességük, hogy terjedési sebességük nagyobb, mint a hang terjedési sebessége az adott célkőzetben (ez akár 6-8 km/s is lehet). A sokk-hullám frontja a célkőzetben közelítőleg félgömb-szimmetria szerint terjed, ezért energiája és sebessége a forrástól távolodva exponenciálisan csökken, a hullámfront felületének növekedésével. Ennek az a következménye, hogy habár a kezdeti energiasűrűség nagyon nagy, már viszonylag kis távolság megtétele után az eredeti érték töredékére csökken, ami miatt a sokk-metamorf ásványmódosulatok kráteren belüli elrendeződése is övezetes lesz, a középponttól kifelé csökkenő fokú metamorfizáltsággal. A kezdeti sokk-hullám intenzitása, valamint az alapkőzet anyagi összetétele-, ill. szerkezete (rétegzettség, vetők stb.) függvényében egy adott távolság megtétele után a sokk-hullám frontjának felülete annyira megnövekszik, összhangban a hullám sebességcsökkenésével, hogy az adott közegre jellemző hangsebesség alá csökken. Innentől kezdve sokk-hullám jellege megszűnik és egyre csökkenő erejű földrengéshullámként halad tovább, amely már leginkább makrodeformációs szerkezeteket alakít ki (vetődések, blokk-csuszamlások, gyűrődések, ill. általában az alapkőzet összetördelése) és a sokk-metamorfizáció egyre kevésbé jellemző már. A földrengéshullámok ilyen jellegű hatásterületeit *megablokk zónaként*- vagy pedig *összeomlási zónaként* is szokták említeni a meteoritkráterek vonatkozásában (Osinski, 2004) (18. és 19. ábrák).



18. ábra. A Nördlingen-Ries meteoritkráter geológiai metszete. A *belső gyűrűk* határolják le a tranzienst krátert, a *megablokk (összeomlási) zóna* elterjedését pedig a becsapódás keltette rengéshullámok által kialakított blokkos csuszamlások kiterjedése határozza meg (végleges kráter). A kráter alatt (mindenek előtt a tranzienst kráter alatt) lévő kristályos alapkőzet erősen töredezett.
(Osinski, 2004, módosítva)



19. ábra. A Nördlingen Ries meteoritkráter megablokk (összeomlási) zónája. A dombsági felszín a becsapódáskor kibillent réteglapokból épül fel (ld. még a18., 21., 22. és 23. ábrákat).
(saját fotó, 2009)

6.2.2.4. Geomorfológiai-geológiai jellegzetességek

Azért is fontos a kráterek morfológiáját megismerni, mert kiindulási formaként az fogja meghatározni a későbbiekben tárgyalásra kerülő vízhálózati rajzolatokat is, amely pedig a kráterek lepusztulását, és ez által részben az eloszlásukat is fogja befolyásolni. A körszerű megjelenés mellett a legfeltűnőbb tulajdonság a környezeténél (és a becsapódás előtti térszínénél) mélyebben fekvő *kráter aljzat*, amely kisebb átmérőjű kráterek esetében homorú (tál-alakú kráterek, földi körülmények között 3-4 km alatti átmérővel), nagyobb kráterek esetében fokozatosan erősödik az aljzat síkság jellege (sík aljzattal rendelkező kráterek), ill. központi kiemelkedések különböző típusaival (ld. az előző fejezeteket). Az aljzat és a környező, eredeti felszín közötti szintkülönbség az idős és/vagy erősen lepusztult kráterek esetében minimálisra csökkenhet vagy el is tűnhet: az elegyenetésben a kráter sánca lepusztul, medencéje feltöltődik. A kráterek belső medencéje üledékbefogadóként szolgál, így az a belekerült üledék és a sánc-anyagának csuszamlásai miatt lassan feltöltődhet. A Földön jellemző esetben a kráterben 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 nagyságrendűeknél) szerepet játszhat az utólagos izosztikus emelkedés is: a kráter kivájódásával 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 izosztikus felhajtóereje. A kráter szűkebb környezete (a sánc és a törmeléktakaró) pedig süllyedésnek indulhat, ezek jelentős többletsúlya miatt.

A medence pereménél kezdődik a *kráterfal*, amely a medence felé lejtő, rézsútos térszínként határozható meg. A kráterfal kráter aljzat 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*. A sánc rétegzettsége gyakran inverze az eredeti rétegzettségnek (Greely, 1985), ami arra utal, hogy nem csak kidobott anyagról van szó, hanem az egy átfordított rétegsorként is értelmezhető.

A sánctól kifelé haladva következik a *törmeléktakaró* (*kidobott és visszahullott anyag*). 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 a 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, de ez nem törvényszerű) (Greely et al., 1981; Carr et al., 1984; Greely, 1985; French, 1998; Gucsik, 2003; Bérczi et al., 2005) (20. ábra). Az egyszerű kráterek másik fő jellegzetessége az, hogy a képződött *végleges kráter* átmérője és a kráterképződés első fázisában kialakuló, ún. *átmeneti (tranzien) kráter* átmérője viszonylag közel áll egymáshoz (kisméretű krátereknél akár egyezhet is, azaz a tranzien kráter egyben a végleges kráter is).

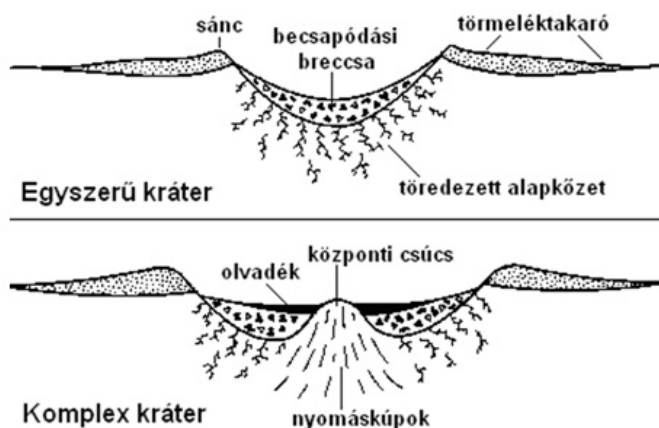
Az az átmérőhatár, amely elválasztja az egyszerű és a komplex meteoritkrátereket, mindenekelőtt az adott égitest felszíni gravitációs gyorsulásának a függvénye: minél kisebb a felszíni gravitációs gyorsulás egy égitesten, annál nagyobb lesz ez a határ-átmérő. Legjobb példa erre a Hold, ahol a felszíni gravitációs gyorsulás kb. hatoda ($1,6 \text{ m/s}^2$) a földinél ($9,8 \text{ m/s}^2$), a két krátertípus közötti határátmérő pedig durván hatszorosa a földinél (20-30 km). Mindezen okok miatt nem lehet az egész Naprendszerre vonatkozó, egységes határátmérőt meghúzni az *egyszerű-* és a járulékos formákkal jellemezhető *komplex* kráterek között. A *komplex kráterekre* jellemző járulékos formaelemek összefoglalása az alábbiakban látható (Greely et al., 1981; Carr et al., 1984; Greely, 1985; French, 1998; Gucsik, 2003; Bérczi et al., 2005 alapján):

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

- *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.

- *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 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 *vízcsepp-modellnek* megfelelő mozgást végez (nem a kőzetek megolvadása miatt, hanem a jobbra koncentrikus, impakt eredetű vetők által kijelölt transzlációs síkok és gyűrődési zónák mentén).



20. ábra. Egyszerű és központi boltíves komplex meteoritkráterek keresztmetszetei. (Dressler és Reimold, 2001, módosítva)

A 21., 22., 23. és a 24. ábrákon a Nördlingen Ries és a Steinheim szimultán becsapódással keletkezett meteoritkráterek néhány morfológiai elemét mutatom be. Érdeemes rajtuk megfigyelni a sáncot, ui. ez az egyik legfontosabb morfológiai elem, amelynek átréselésével kialakulhat a kráterekre jellemző vízvezetési rajzolat.



21. ábra. A Nördlingen Ries meteoritkráter kb. 100-120 méter magaságú sáncának részlete, kívülről szemlélve.
(saját fotó, 2009)



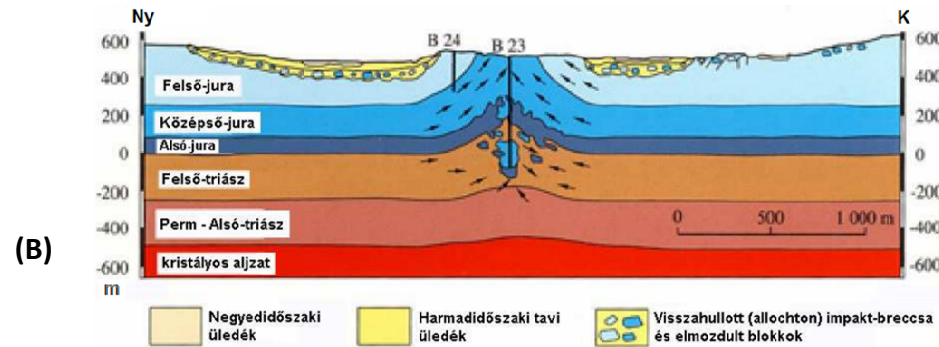
22. ábra. A Nördlingen Ries meteoritkráter sáncának részlete, a kráter medencéjéből szemlélve (három ponton pirossal jelölve).
(saját fotó, 2009)



23. ábra. A Nördlingen Ries meteoritkráter medencéjének megablokk (összeomlási) zónája. A becsapódás hatására megbillent réteglapok alakították ki a dombsági jellegű felszínt. A háttérben pirossal kiemelve a sánc részlete látható.
(saját fotó, 2009)

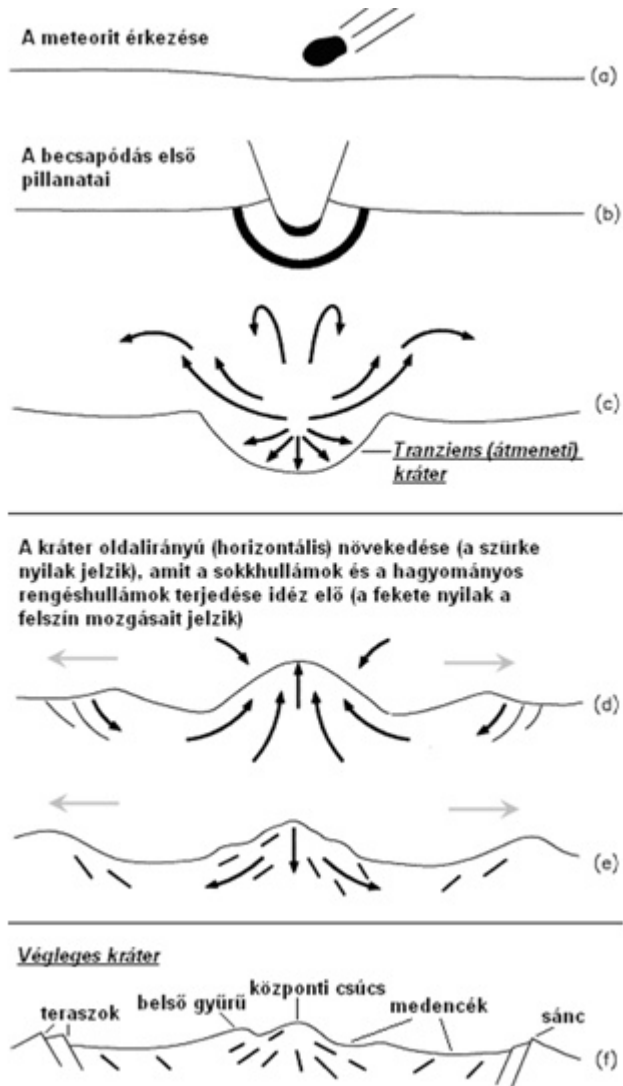


(A)



(B)

24. ábra (A, B). (A) – a Steinheim meteoritkráter medencéjének panorámaképe, egy kráterbéli magaslatról szemlélve. A piros vonalak a háttérben a kráter sáncszerkezetét (annak belső lejtőit) jelölik, a sárga vonal pedig a központi boltív kontúráját. (saját fotó, 2009)
 (B) – a Steinheim kráter geológiai metszete. A B 23 és a B 24 jelű fúrólukak a központi boltívbe mélyülnek. (Ivanov és Stöffler, 2005, módosítva)



25. ábra. A komplex meteoritkráterek képződésének elvi vázlata. Fekete nyilak: a felszín és a kidobott anyag mozgása. Szürke nyilak: a kráter oldalirányú növekedése. (Dressler és Reimold, 2001, módosítva)

7. Az ismert földi meteoritkráterek eloszlási jellemzői

Bolygónkon az ismert meteoritkráterek eloszlásait az alábbi szempontok figyelembevételével érdemes vizsgálni első közelítésben: jelenkori földrajzi helyzet, átmérő, kor, a kráterek alapköze (a célterület litológiai felépítése), képződéskori földrajzi helyzet. Az alábbi fejezetek a különböző paraméterek bizonytalansági faktoraiba nyújtanak betekintést. Mindenekelőtt nagyon fontos azt leszögezni, hogy az ismert földi meteoritkráterek jelenlegi földrajzi eloszlása nagyon sok esetben nem tükrözi a valódi becsapódási koordinátákat, a lemeztektonikai mozgások miatt; a változatos földi eróziós folyamatok és a növénytakaró pedig az egyes kráterek felfedezésének az esélyeit csökkentik. A légkör pedig már eleve kiszűri a legkisebb meteorokat. Ezen okok miatt a földi meteoritkráterek jelenkori eloszlása és az egyes kráterek állapota egy olyan pillanatképet rögzít csupán, amely nem tükrözi hűen a Naprendszer belső régióinak meteorit-becsapódási és kráterképződési törvényszerűségeit; de amely pillanatkép viszont hűen tükrözi ezen kráterképződési törvényeknek, valamint a földfelszíni folyamatok (geológiai, természetföldrajzi, éghajlattani, növénytani és akár a társadalomföldrajzi) törvényeinek az összjátékát. Ebből kifolyólag a földi meteoritkráterek jobb megismerése elvezethet az egyéb földfelszíni folyamatok és törvényszerűségek teljesebb megértéséhez is, sőt a földi kráterek formáinak és átalakulásának tanulmányozása más égitesteken végbement folyamatok felismeréséhez, vagy jobb megértéséhez is segítséget nyújthat. Ahhoz azonban, hogy a legjobb tudásunkhoz mérten egységes rendszerbe tudjuk foglalni a kráterképződési-, ill. a földfelszínen uralkodó folyamatokat és ezek dinamikus egymásra hatását, célravezetőbbnek láttam először szétválasztani, és részenként ismertetni őket:

7.1. A kráterképződés alapvető törvényei légkör nélküli, geológiailag inaktív felszínű égitesteken

Mivel a Földön komplex (geológiai, természetföldrajzi, éghajlattani, növénytani és társadalomföldrajzi) folyamatok módosítják a kráterképződés törvényeit, ezért azokat eredeti formájukban egy olyan, légkör nélküli (és emiatt egyben éghajlat-, valamint élet nélküli); a belső erők kizárása végett pedig tektonikailag egylemezű és viszonylag lehűlt belsővel rendelkező (geológiai értelemben halott) égitest felszínének a példáján lehet a legjobban bemutatni, mint a Hold. A főbb kráterképződési

törvények ezek alapján (Greely et al., 1981; Carr et al., 1984; Greely, 1985; French, 1998; Bérczi et al., 2005):

1, A kráterátmérők törvénye: az egyre kisebb kráter-átmérő kategóriák felé haladva folyamatosan növekszik az adott átmérő-kategóriában lévő kráterek száma. Másként megfogalmazva: minél kisebb átmérő-kategóriákat veszünk alapul, a létrehozó becsapódások annál gyakoribbak adott időintervallum alatt. Ez tükrözi egyben a Naprendszer testeinek átmérő/gyakorisági arányait is (azaz, minél kisebb egy test mérete, statisztikailag annál több van belőle a Naprendszerben).

2, A kráter-darabszámok törvénye: ez azt fejezi ki, hogy minél idősebb egy felszíndarab, statisztikailag annál nagyobb az esély rá, hogy egy meteorit csapódjon belé, azaz az idősebb felszíneken több becsapódási kráternek kell lennie, mint a fiatalabbakon. Ez maga után vonja azt, hogy a felszín korának előrehaladtával egyre nagyobb esélye van a mind nagyobb kráterek meglétének is.

3, A kráterkorok törvénye: az előző törvényből fakad, azaz az idősebb felszíndarabok nagyobb számú kráterének az átlagos kora is magasabb, mint a fiatalabb felszínek kevesebb kráterének az átlagos életkora.

4, A kráter darabszámok-, korok- és átmérők törvénye: a fenti három törvényből összefoglalóan adódik az, hogy minél idősebb egy felszíndarab, annál nagyobb lesz a rajta lévő meteoritkrátereknek a darabszáma; az átlagkora; valamint az átlagos átmérője is.

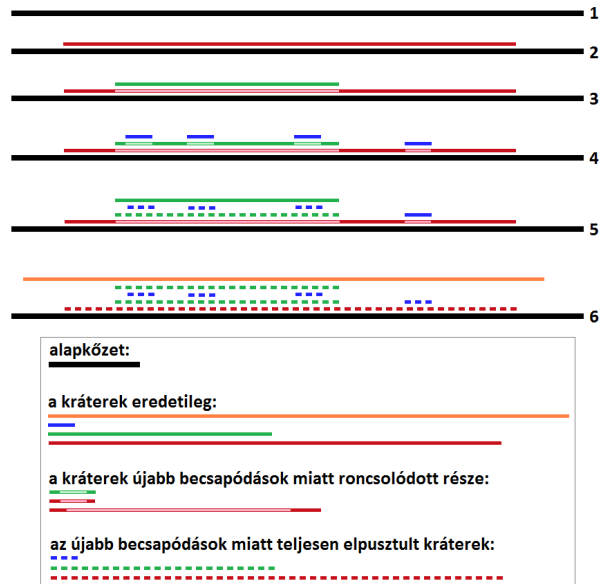
5, A dinamikus egyensúlyi állapot törvénye: a fentiekben tárgyalt, a felszín korán alapuló krátereződési törvényszerűségek egy ideig érvényesek, utána pedig önmaguktól módosulni kezdenek, mintegy spontán kiegyenlítődés indul meg a különbségek között. Ez a kiegyenlítődési folyamat akkor indul meg, amikor minden felszíndarabon elérkezik az úgynevezett kráter-telítettségi határállapot, vagyis amikor az adott felszínt már annyira befedik a kráterek, hogy egy újabb becsapódási kráter kialakulása már mindenképpen roncsol vagy elpusztít (azaz elkerülhetetlenül módosít) egy- vagy több krátert. Ez az alábbi módokon mehet végbe:

- Minden újabb meteorit-becsapódás részlegesen roncsolni fog egy másik krátert (ha egy kisebb kráter képződik egy nagyobb kráterben).

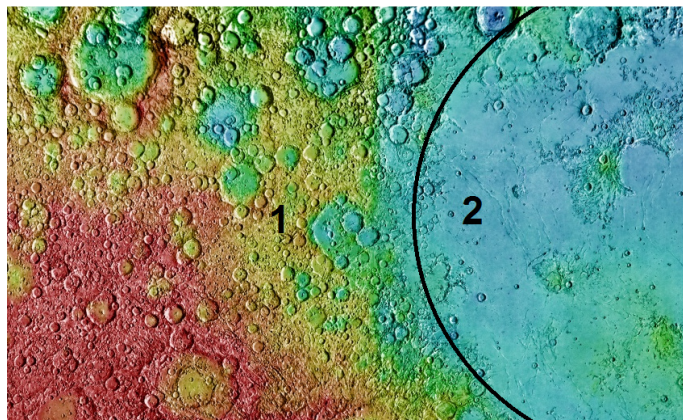
- Részlegesen roncsol egyszerre több krátert, esetleg 1:1 arányban felvált egy már régebb ideje meglévő krátert (ha pl. egy adott átmérőjű kráterben egy hasonló átmérőjű kráter képződik).
- Egyszerre több, relatíve kisebb krátert töröl el. Például, mikor egy viszonylag nagyméretű kráter képződése sok kicsi krátert pusztít el.
- A fenti, roncsolási és/vagy teljes kráterpusztulást okozó becsapódási kombinációk tetszőlegesen lehetnek. Azaz pl. egy 100 km-es átmérőjű kráterben történő, 5 kilométer átmérőjű krátert kialakító becsapódás 1:1 arányban eltörölhet egy másik 5 km átmérőjű krátert, a nagy kráter belsejében, amennyiben pont annak a közepébe történik a becsapódás. Ekkor szükségszerűen eltörli az eredetileg ott lévő, 5 km-es kráterben lévő kisebb krátereket is, de ezzel egyidejűleg a 100 km-es krátert csak roncsolni tudja.

Tehát amikor egy légkör és már aktív geológia nélküli égitest legidősebb területein elsőként beáll a kráterekkel való telítettségi állapot (az egész felszínen azonos becsapódási valószínűséget feltételezve), akkor gyakorlatilag megindul az égitest teljes felszínének kráterezettségi homogenizálódása, inentől kezdve az idősebb és a fiatalabb területek kráter-statisztikai értékei elkezdenek közelíteni egymáshoz (pontosabban fogalmazva a fiatalabb területek kráterezettségi értékei kezdenek közelíteni az idősebb területek hasonló mérőszámaihoz). Amikor pedig végül a legfiatalabb területeken is beáll a telítettségi állapot (azaz minden egyes újabb becsapódás krátere szükségszerűen legalább részben átfedésben van egy korábbi becsapódás kráterével), onnantól az égitest egész felszínén beáll a telítettség, és ettől az időponttól kezdve a kráter-statisztikai értékek nagyjából kiegyenlítődnek a felszín bármely korú pontján. Ennek gyakorlati következménye az, hogy a pusztán kráter-statisztikai alapú, relatív felszín-kormeghatározások igen nehézé válnak.

A kráter-telítettségéből eredő, fentebb tárgyalt folyamatok legtöbbször nem választhatóak el egymástól, hanem párhuzamosan és egyidejűleg jelentkeznek. Erre egy lehetséges, kiragadott példa lehet a 26. ábra. A 27. ábra a fentiek tükrében, valamint a 26. ábrával összefüggésben mutatja be, ahogy egy nagyobb becsapódás pl. eltörli a nálánál kisebb és idősebb krátereket.



26. ábra. Egy lehetséges példa a számtalan, becsapódások által generált kráter-roncsolási és pusztulási variációból. 1 – az eredeti felszín a becsapódások előtt. 2 – az első becsapódás. 3 – a második, kisebb becsapódás az első kráter belsejében (az első kráter részleges roncsolása). 4 – kisebb becsapódások az első és a második kráter belsejében (az első és a második kráter részleges roncsolása). 5 – a második becsapódással azonos méretű becsapódás a második kráter közepén. A második kráter, ill. a benne lévő kisebb kráterek elpusztulnak, a legelőször képződött kráter azonban csak roncsolódik. 6 – a legelső becsapódásnál is nagyobb becsapódás, amely az összes eddigi krátert elpusztítja (*ld. még a 27. ábrát*).
(saját szerkesztés)



27. ábra. Az erősen kráterezett ősi holdi felföld (1) és egy fiatalabb, becsapódásos eredetű mare-terület (2 – Oceanus Procellarum) krátereztségének különbsége.
(Google Moon, módosítva)

7.2. A kráterképződés alapvető törvényeinek érvényessége és módosulásai a Föld esetében

A Holddal (és az egyéb, légkör nélküli, geológiailag inaktív égitestekkel) ellentétben a Földön sok tényező módosítja az eddig felvázolt törvényszerűségeket:

1, A geológiai ciklusok szerepe: minden földi tényező közül ez a legjelentősebb. Nagy intenzitással és folyamatosan deformálja-pusztítja a meteoritkrátereket. Leghatásosabb formája ennek a lemeztektonikai ciklusokhoz köthető.

2, *A légkör szerepe:* a földi légkör természetes pajzsként védi a felszínt a kisebb becsapódásoktól (azaz megtörténik a test légkörbe lépése, de a becsapódás már nem valósul meg). A pár méteres meteorokat lefékezi és szétdarabolódásra (fragmentáció, abláció) kényszeríti, ez pedig krátermezők kialakulásához vezethet, ami azt jelenti, hogy egy darab test légkörbe lépése által (ami légkör nélküli égitesten egy krátert eredményezne) sok kicsi kráter jön létre. Az atmoszféra a nagyobb meteorok (párszor tíz méteres átmérőjűek) mozgási energiájának nagy részét is elnyeli. Emiatt 10-20 méter alatti kráterek a Földön nem igazán fordulnak elő, tehát pl. a Holdon egyébként leggyakoribb kráterek (kisméretű kráterek és mikrometeorit-kráterek) fognak hiányozni, azaz a *kráter-darabszámok; a kráter-korok és a kráter-átmérők törvénye* is csorbul ez által.

3, *Az éghajlat szerepe:* a térben és időben is változó éghajlati zónák is a Földön kialakuló legkisebb, néhány száz méteres-évtized méteres krátereket pusztítják a leggyorsabban. Szintén az éghajlat alakította ki a poláris jégsapkákat (ill. a pleisztocén jégtakarókat Európa és Észak-Amerika nagy részén), amelyek pedig azután pajzsként védik a felszínt a kráterképződéstől, miközben az aljazaton exhumálják a korábban eltemetett meteoritkrátereket. Itt szintén *kráter-darabszámok; a kráter-korok és a kráter-átmérők törvénye* veszíti hatályát.

4, *A növényzet szerepe:* az éghajlat által meghatározott növényzet nem annyira a kráterek lepusztulásában játszik szerepet, hanem inkább a kráterek elrejtésében. Különösen igaz lehet ez a jelenkori trópusi esőerdőkre.

7.3. A kráterek jelenkori földrajzi helyzete

A kráterek jelenkori abszolút földrajzi helyzetét illetően (x és y koordináták) sok félreértésre nincs lehetőség. Az Earth Impact Database (EID) kontinensenkénti besorolási adatait azonban helyenként módosítani kellett, ugyanis ezek néhány esetben félreérthetőek. Az EID Európa és Ázsia határáként Oroszország nyugati határát adja meg, nem pedig a geológiai-természetföldrajzi határt. Ennek eredményeként hét olyan kráter került Ázsiába ('Asia & Russia' címszó alatt), amely geológiailag Európához (Balti-pajzs és Kelet-Európai-síkság) tartozik. Ezeket utólag soroltam át Európához (4. táblázat).

4. táblázat. Az Earth Impact Database által geológiai alapon pontatlanul besorolt meteoritkráterek. * - az Európa és Ázsia összeütközése előtt keletkezett kráterek. (Earth Impact Database, 2012 adatok módosítása alapján saját szerkesztés)

név	kor (millió év)	átmérő (km)	kontinens az EID régi (országhatáron alapuló) besorolása alapján	kontinens a geológiai kontinenshatárok alapján
Janisjarvi*	700	14	Ázsia	Európa
Kaluga*	380	15	Ázsia	Európa
Kamensk	49	25	Ázsia	Európa
Karla	5	10	Ázsia	Európa
Kursk	250	6	Ázsia	Európa
Pucezh- Katunki	167	40	Ázsia	Európa
Suavjarvi*	2400	16	Ázsia	Európa

Ezen módosítások után már csak egy kérdéses kráter maradt: a Kara meteoritkráter (kora: 70,3 millió év; d=65 km), amely pontosan a kontinentális határvonal részét képező Északi-Urál területén fekszik (Vyssotski et al., 2006). Mivel a nagyobb, kontinentális jellegű vetőrendszerek tőle nyugatra futnak, ez a kráter inkább az Ázsiai kontinenshez sorolható.

A kontinensenkénti szétválasztás illetően pontosításának két fő oka van: egyrészt az egyes kontinensek krátereinek statisztikai vizsgálatakor természetföldrajzi-geológiai határokon alapuló elkülönítés szükséges, mivel a jelen téma szempontjából is természetföldrajzi-geológiai folyamatként tekintünk magukra a becsapódásokra. Másrészt a 250-300 millió évesnél idősebb kráterek még két, fizikailag különálló kontinens felszínébe csapódtak be.

Az ismert földi meteoritkráterek jelenkori földrajzi elhelyezkedésének jellegzetességei.

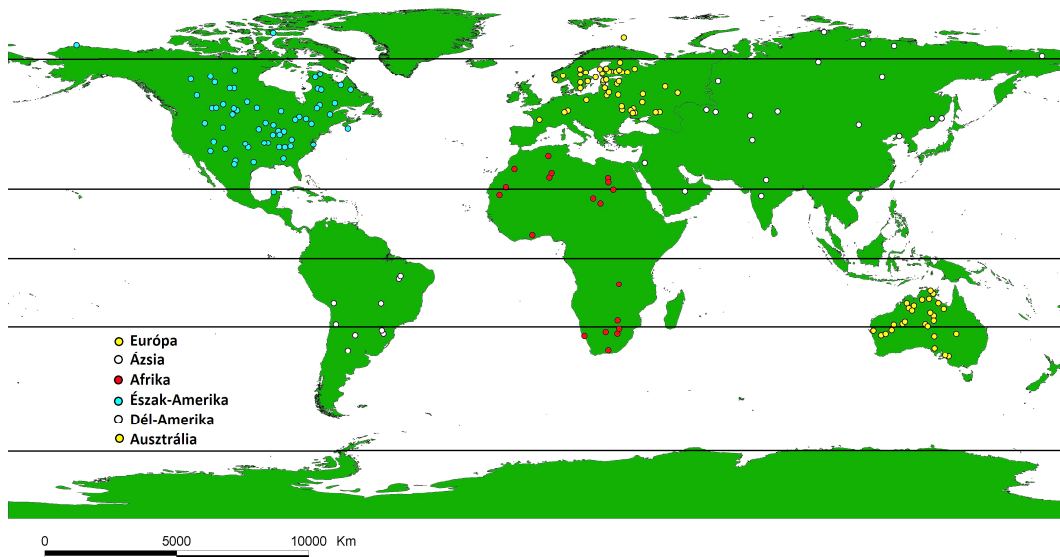
A 28. ábrán láthatóak azok a jellegzetességek, melyek az ismert kráterek jelenkori földrajzi eloszlásait mutatják be. Ez alapján az alábbi főbb megállapítások tehetőek:

- A nagy jégtaakarók (Grönland és Antarktisz) felszínén nem ismertek becsapódásos formák. Ennek fő oka a recens jégtaakarók viszonylag fiatal kora (kb. 2,5 millió év, azaz ennél idősebb jégfelszíni kráter gyakorlatilag nem is létezhet), valamint a nagyméretű és összefüggő jégtömegek plasztikus jellege, amely hatékonyan egyenlíti ki a felületén képződő egyenetlenségeket, simítja a morfológiai elemeket. Ezt a morfológiai kiegyenlítő folyamatot nagyban segíti a jégtaakaróra esetlegesen történő becsapódáskor felszabaduló nagy hó miatt keletkező olvadékvíz. További, közvetett okként említhető a jégtaakarók rendkívül alacsony népsűrűsége (az Antarktiszon szinte csak a különféle kutatóállomások személyzete), amely nagyon lecsökkenti az esetleges jégfelszíni kráterek véletlen felfedezésének esélyét.
- Az óceánok aljzatán sem ismeretesek meteoritkráterek. Ez is több okra vezethető vissza. Mindenekelőtt megemlítendő az óceánaljzatok topográfiájának ma még szegényes felderítettsége. A további okok közé tartozik az a tény, hogy az óceánok aljzata viszonylag fiatal (pár-száz millió évesnél sehol sem idősebb), ez pedig statisztikailag csökkenti jelentősen a becsapódások esélyét. Mindezekon túlmenően a becsapódás mechanizmusa is eltér a szárazföldi becsapódásokétól (Ormö és Lindström, 2000). A nagy sebességgel (10-15 km/s) érkező meteortest becsapódáskor a víztömeg erős közegellenállást fejt ki, és már a vízben haladva szétrobbanthatja a meteortestet. Erre eddig egy példát ismerünk az ún. Eltanin-rétegzavart a Csendes-óceán déli medencéjében (Kyte, 2002).
- A szárazföldek északi és déli szélességeinek 10. fokai között alig ismert jelenleg meteoritkráter. Ezt az alábbi okokra vezetem vissza: a természetes növénytaakaró itt főleg a trópusi esőerdő, amely hatékonyan rejti el az esetlegesen itt lévő meteoritkrátereket. Másrészről a trópusi éghajlat mellett igen

hatékony a felszín újraformálódása (főleg a lineáris erózió miatt), ez pedig a kráterek erózióját gyorsítja fel.

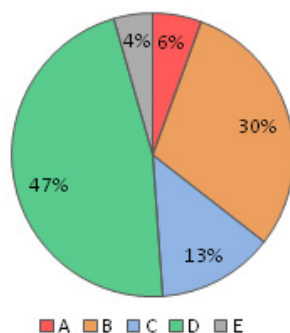
- A tériók vidékén valamennyi kontinensen megszorodik az ismert kráterek száma. Ezt részben a tériói sivatagok formakonzerváló hatásával magyarázom, részben pedig a gyér növényzeti borítottság miatti, viszonylag könnyű felfedezési lehetőségekkel.
- A legnagyobb kráttersűrűség Észak-Amerikában, Európában és Ausztráliában figyelhető meg. Véleményem szerint ennek okai is többreútek: mindhárom terület ősi pajzsterületei nagy számban tartalmaznak krátereket, mivel az idősebb felszindarabokon egységnyi területre statisztikailag nagyobb eséllyel történik becsapódás, mint a fiatalabbakra. Ausztrália nagy része ráadásul formakonzerváló klímájú, még Észak-Amerikában (Kanadai-pajzs) és Európában (Balti-pajzs) valószínűleg a pelisztocén jég letaroló munkája eredményezte a régi, eltemetett kráterek felszínre kerülését.

Vizsgálataim ezen fejezetének összefoglalásként elmondható, hogy az ismert kráterek jelenkori földrajzi eloszlásait befolyásolja az adott felszintípus geomorfológiai feltártsága és karakterisztikája, amely magában foglalja a fejlődéstörténetet; az alapközet tulajdonságait; valamint a közelmúltbéli és jelenkori klímát (ill. ezzel szoros kapcsolatban a természetes növénytakarót). Fontos kiemelni, hogy a jelenkori kráterpozíciók sok esetben nem tükrözik a becsapódások eredeti földrajzi koordinátáit, ez a kontinensvándorlással összefüggő krátervándorlások következménye. Minél idősebb egy kráter, az utólagos elmozdulás mértéke annál nagyobb lehet.

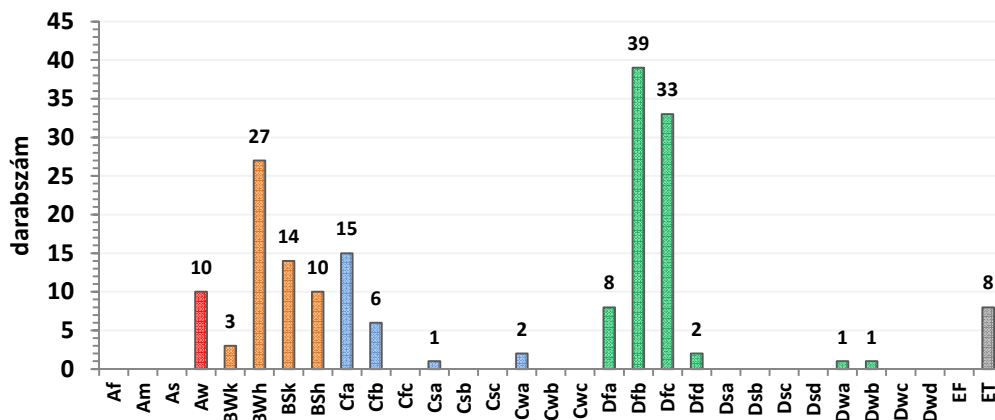


28. ábra. Az ismert földi meteoritkráterek kontinensek szerinti eloszlása. (módosított Earth Impact Database, 2012 ad atok alapján saját szerkesztés)

Figyelembe véve, hogy az ismert kráterek jelenkori eloszlásai összefüggést mutatnak az éghajlati (és ezzel természetesen a növényzeti) adottságokkal, érdemesnek találtam megvizsgálni a részletesebb éghajlati övek szerinti eloszlásokat is. A 182 ismert kráterből mindössze 2 nem vizsgálható ilyen szempontok alapján, mert jelenleg sekélytenger borítja őket. A 29. és a 30. ábrákon a Köppen-Geiger éghajlati osztályok és a jelenleg ismert, szárazföldön lévő kráterek előfordulásai láthatóak. Legmarkánsabb jellegzetesség, hogy a kráterek mintegy 90%-a a B, C és a D típusok valamely altípusában található.



29. ábra. A szárazföldön elhelyezkedő meteoritkráterek Köppen-Geiger féle éghajlati alaposztályok (A, B, C,D,E) szerinti százalékos eloszlása. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)



30. ábra. A szárazföldön elhelyezkedő meteoritkráterek darabszám szerinti eloszlása a Köppen-Geiger féle klíma-altípusokban. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

Azt nem lehet teljesen pontosan megmondani, hogy miért pont így oszlanak meg a kráterek az adott klimatikus altípusokban. Nem kizárólag

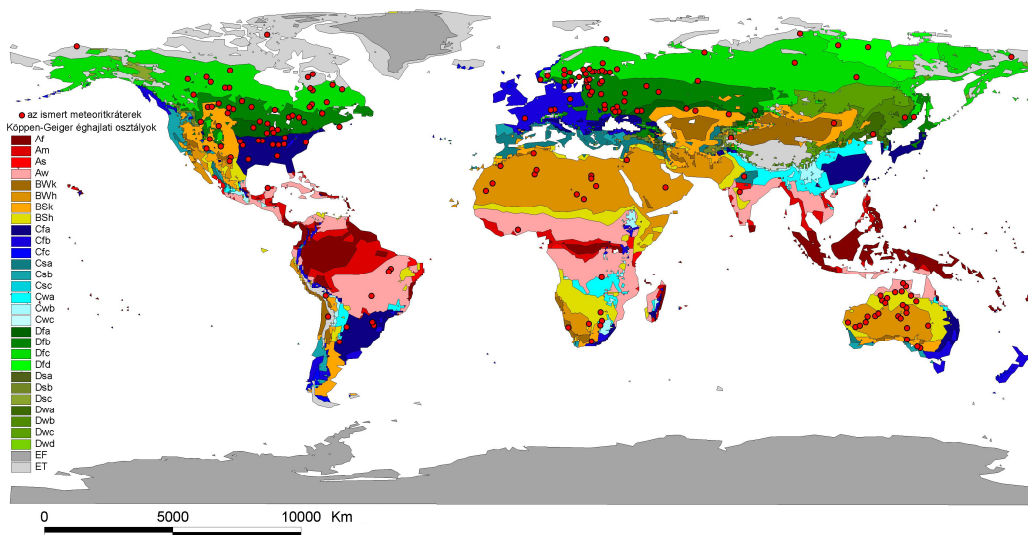
arról van ugyanis szó, hogy bizonyos klímátípusok jobban konzerválják a formákat, habár ez is kétségtelenül szerepet játszik, pl. az arid, száraz klímák esetében. Olyan esetek is előfordulhatnak azonban, amikor egyes kráterek a fennmaradásukat segítő mikroklimatikus környezetben vannak, habár mezos- és/vagy makroklimatikus az adott klímátípus gyors eróziót prognosztizál. Az is bonyolítja a képet, hogy a kráterek nem azonos alapsűrűséggel fordulnak elő sem a különböző kontinenseken, sem pedig az egyes kontinensek különböző régióiban. Ősi területeken nagyobb a sűrűségük, mint a fiatalabbakon (31. ábra), mivel a becsapódás valószínűsége az idővel arányosan növekszik, ráadásul ezek az ősi, nagy kráttersűrűségű területek javarészt jelenleg valamelyik D klímátípusban (Kanadai-, Balti- és Ukrán-pajzs); vagy pedig B típusban (Dél-Afrika, Ausztrália) vannak. A morfológiailag viszonylag fiatal felszínű területek közül a Szahara emelhető ki, mint formakonzerváló éghajlatú (arid, B), nagy kráttersűrűségű régió. Mindezek mellett azt is figyelembe kell venni, hogy a jelenlegi Köppen-Geiger éghajlati osztályok csak az utolsó eljegesedés befejeződte után, kb. 8-10 000 évvel ezelőtt kezdtek el kialakulni, és az egyes jelenkori éghajlati típusok esetleges eróziós hatása csak a legkisebb kráterek esetében érvényesülhetett igazán ilyen rövid idő alatt. Ráadásul ezek az éghajlati zónák és altípusaik azóta sem statikusak, hanem napjainkban is dinamikus változásban vannak, amelynek pl. a Száhel-övezet vándorlása is részbeni megnyilvánulási formája. Összefoglalásként azt mondhatjuk el tehát, hogy egy összetett, többváltozós problémával állunk szemben, ahol a jelenlegi éghajlati viszonyok csupán egy (a rövid fennállási idő miatt nem túl jelentős) tényezőt jelentenek, és amelyben a főbb bizonytalansági tényezők az alábbiak:

- Az ismert földi meteoritkráterek alából nem azonos sűrűségű területi eloszlásai (minél idősebb egy felszínarab, statisztikailag annál több kráter lehet rajta).
- Az óceánok aljzatán – a gyakran több ezer méter vastagságú vízréteg energia-elnyelő hatása miatt – kevésbé érvényesülő, ill. a szárazföldi becsapódásokhoz képest módosult kráterképződési mechanizmusok (Ormö és Lindström, 2000), ill. az óceánaljzat szárazföldrékéhez mérten szegényes topográfiai ismerete.
- A meteoritkráterek paleogeográfiai előtörténetének gyakran hiányos ismerete (pl. hogy egy több-százmillió éves kráter milyen tektonikai-, szedimentológiai/tengerelöntési- és éghajlati ciklusokon ment

keresztül a jelen állapotáig, és az egyes ciklusok milyen hosszan, ill. milyen intenzitással fejtettek ki hatást a kráterre).

- A jelenlegi éghajlati típusok és altípusok dinamikusan változó jellegű- és viszonylag rövid hatóideje (8-10 000 év), amely leginkább a kisméretű kráterekre tud érdemi hatást kifejteni.
- Mindezek mellett azonban az is figyelemre méltó, hogy a Föld szárazföldi térszíneiből viszonylag jelentős hányadot lefedő A (trópusi) éghajlati típuson a kráterek mindösszesen 4%-a található. Véleményem szerint ez a trópusi éghajlathoz köthető növényborítottságnak köszönhető (nem találjuk meg a krátereket az esőerdők takarásában); ill. az intenzív lineáris erózióknak is jelentős szerepe lehet a kráterek eltüntetésében és feltöltésében.

A fentebb leírtak értelmében a jelenkori éghajlati tényezők inkább a kráterek „elrejtésében” játszanak érdemi szerepet a klíma által meghatározott növénytakarások által (mindenekelőtt a trópusi esőerdők területén), s kevésbé a lepusztulásukban. Hosszabb, geológiai időskálán mérve (millió, tízmillió évek) azonban mindenképp jelentős az éghajlat szerepe a kráterek lepusztulásában, sőt, még akár a szárazföldi kráterképződésben is, a jégtakarók (ill. azok pajzs-funkciója) által (ld. a 46. ábrát).



31. ábra. A jelenleg ismert meteoritkráterek Köppen-Geiger éghajlati övenkénti eloszlásai.
(módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

7.4. A kráterek átmérője

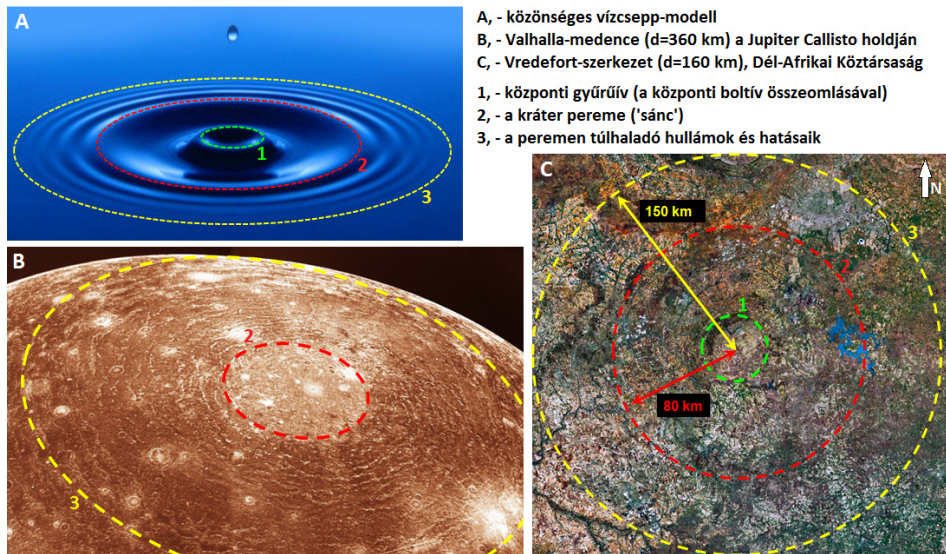
Ez a paraméter tűnik az egyik leginkább magától értődőnek, mert itt elvben egyszerű távolságmérést kell alkalmazni (hagyományosan a sánc-tól-sáncig mért távolság adja meg az átmérőt). Minél nagyobb és/vagy minél öregebb azonban egy kráter, ez a mérés annál bizonytalanabb. Egyrészt a nagyobb kráterek felé haladva a sáncvonal egyre inkább egy összetett sánc-zónává alakul át; másrészt pedig akár sáncvonalról beszélünk, akár zónáról, ezek idővel erodálódnak, és gyakran az egész sáncszerkezet eltűnik egy idő után (pl. a jég által letarolt területeken). Jól példázza ezeket a bizonytalanságokat az is, hogy az Earth Impact Database 2012-ben hat kráternek módosította az átmérőadatait néhány hónap leforgása alatt (5. táblázat). Pont a legnagyobb krátereket érintette a módosítás, és minden esetben csökkentették az átmérőt (kb. 10-56%-kal). Voltak köztük viszonylag fiatal (35 millió év) és idős kráterek is (1850 millió év).

5. táblázat. A 2012-ben megváltoztatott átmérőjű meteoritkráterek adatai.
(Earth Impact Database 2012 adatok módosítása alapján saját szerkesztés)

<i>név</i>	<i>kontinens</i>	<i>kor (millió év)</i>	<i>régi átmérő (km)</i>	<i>új átmérő (km)</i>	<i>változás (km)</i>	<i>változás (%)</i>
Chesapeake Bay	É.-Amerika	35,3	90	40	-50	-55,56
Chicxulub	É.-Amerika	64,98	170	150	-20	-11,76
Manicouagan	É.-Amerika	214	100	85	-15	-15
Popigai	Ázsia	35,7	100	90	-10	-10
Puchezh-Katunki	Európa	167	80	40	-40	-50
Sudbury	É.-Amerika	1850	250	130	-120	-48
Vredefort	Afrika	2024	300	160	-140	-46,67

Felmerül a kérdés, hogy mi vezethetett ilyen, viszonylag nagyarányú utólagos átmérőcsökkentéshez ezeknél a krátereknél. Nem csupán mérési pontatlanságról, vagy az erodálódott sánicszerkezet miatti hibalehetőségekről van szó, hanem az átmérők definíciójának és meghatározásának problémájáról is (Thompson et al, 2010; Earth Impact Database, 2012). Az ilyen nagyméretű kráterek átmérőit régebben a becsapódás geológiai hatásainak (törések, vetődések, gyűrődések, ásványtani változások) legkülső elterjedési határával adták meg, amelyek azonban túlnyúlhatnak a sánctól-sáncig mért átmérőkön. Minél nagyobb ugyanis egy becsapódás, a sokk- és a később már szeizmikus hullámok okozta járulékos hatások külső határa annál inkább eltávolodhat a kráter fizikai (sánctól-sáncig mért) határaitól. Ennek a mechanizmusnak az alapja a korábban már ismertetett impakt-hidrodinamikai jellegű felszínmozgás a becsapódás alkalmával. Minél nagyobb a meteorit tömege és sebessége egy becsapódás alkalmával, annál intenzívebb ez a mozgás (32. ábra). Ez a mechanizmus nagyban függ még a becsapódás célterületének jellegétől is. Vízfelszín esetén már cm-es nagyságrendben is végbemegy ez a folyamat. A Föld felszínén kb. 3-4 km-es kráterátmérőnél jelennek meg az impakt-hidrodinamikai jellegű mozgás első nyomai, a központi boltívek a krátermedence középső régiójában. Tovább haladva az egyre nagyobb kráterátmérők felé a központi boltíveket egyre inkább felváltja előbb egy központi gyűrűív, majd pedig az egyre nagyobb átmérők felé haladva koncentrikus gyűrűívek sokasága. Ezek kialakulásának oka a központi boltív gravitációs összeomlása. Az ilyen gyűrűs kráterek képződésekor is kialakul boltív a kráterképződés kezdeti stádiumában, de mivel egyre nagyobbra fejlődik a növekvő becsapódási energiák miatt, az összeomlása is egyre teljesebb lesz, amely összeomlás következtében elkezdődik a gyűrűképződés. És ez az a folyamat, melynek hatásai egy bizonyos határon túl kilépnek a képződő

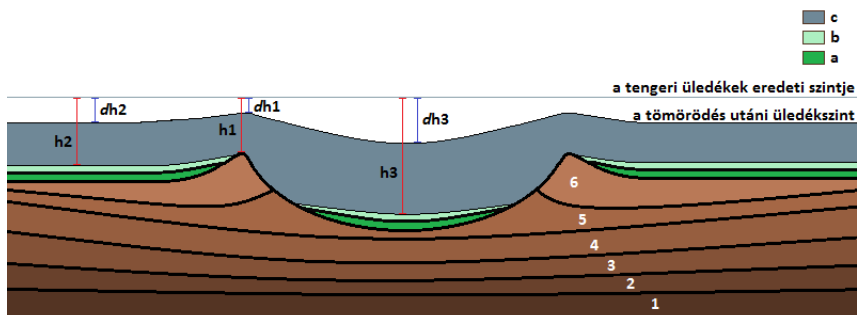
kráter területéről, és a kialakult kráter sáncán túl is impakt hatású elváltozásokat okoznak (32. ábra) úgy mikro-, mint makro-szinten (ásványtani módosulásoktól kezdve a makrogeológiai- és geomorfológiai léptékű elváltozásokig). Részben ez is alapul szolgál azután az átmérő-meghatározások bizonytalanságaihoz. A nagyobb kráterek átmérőinek felülvizsgálatakor ennek a fentebb említett mechanizmusnak a hatásait vonták ki a régebben meghatározott átmérőkből, ezért csökkentek azok.



32. ábra. A becsapódás célterületének hidrodinamikai mozgása miatti átmérő meghatározások bizonytalanságainak okai. A *B* képen azért nincs központi boltív feltüntetve, mert a Callisto felszínét borító, és a becsapódáskor megolvadó jég nem tette lehetővé annak tartós fennmaradását. (saját szerkesztés)

7.4.1. Eltemetett meteoritkráterek

Megtörténhet, hogy egy krátert utólagosan eltemetnek a becsapódás után lerakódott (poszt-impakt) üledékek. Ideális esetben azonban még ilyenkor is nyomozható a kráter hatása a felszíni morfológiára a differenciált kompakció segítségével. A 33. ábra ennek a mechanizmusát mutatja be. Legjobb példa erre a folyamatra az ukrajnai Boltysch meteoritkráter (65 millió éves; d=25 km), ahol kb. 500 méter vastagságú poszt-impakt tengeri üledékréteg ellenére is van a kráternek morfológiai nyoma a felszínen (34. ábra).

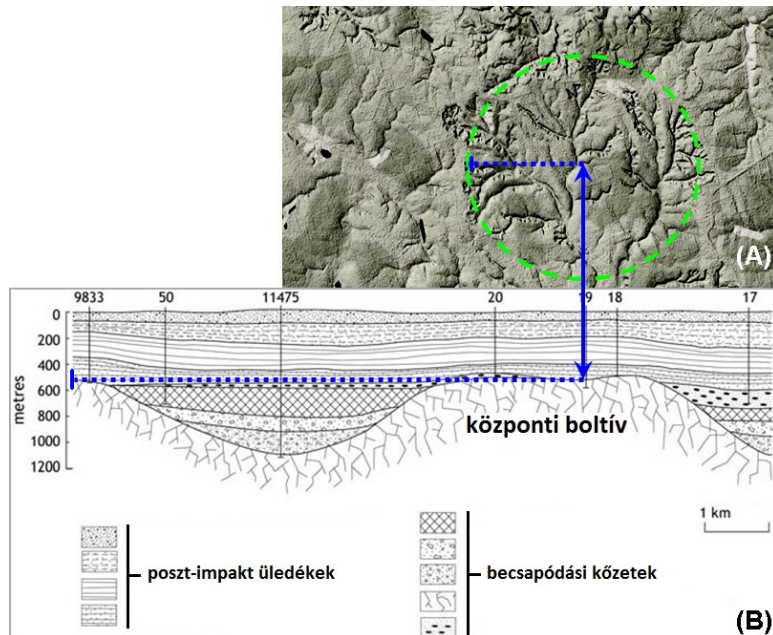


h_1 ; h_2 ; h_3 – a meteoritkráter különböző morfológiai egységei (h_1 - sánc; h_2 - külső törmeléktagaró; h_3 - medencebelső) felett lerakódott poszt-impakt tengeri üledékek eredeti vastagsága

dh_1 ; dh_2 ; dh_3 – a meteoritkráter különböző morfológiai egységei felett lerakódott poszt-impakt tengeri üledékek tömörödésének viszonylagos mértéke

33. ábra. A differenciált kompaktió (eltérő mértékű üledéktömörödés) elve és hatása a becsapódás utáni (poszt-impakt) tengeri üledékre, eltemetett meteoritkráterek esetén. Mivel az eredeti üledékvastagságokra a $h_1 < h_2 < h_3$ érvényes, ezért az üledéktömörödés miatti pórusterfogat-csökkenésre, ill. az emiatti üledéktömörödés viszonylagos mértékére a $dh_1 < dh_2 < dh_3$ összefüggés lesz érvényes, homogén üledéktípust feltételezve.

Az egyéb jelek magyarázata: 1-6. – becsapódás előtt lerakódott üledékek; a, b – becsapódás után lerakódott szárazföldi üledékek; c – becsapódás utáni tengeri üledékek
Az ábra nem méretarányos. (saját szerkesztés)



34. ábra (A, B). Az ukrainai Boltsh meteoritkráter differenciált üledéktömörödés következtében a felszínen nyomozható morfológiai (ezen belül is völgyhálózati) képe (A); ill. a poszt-impakt eltemetődése utáni kiindulási rétegződése (B). A szaggatott kék

vonal a metszet elhelyezkedését mutatja; zölddel kiemelve a kráter sáncának felszíni vetülete látható (d=25 km), amelyet jól kirajzolnak a völgyfők elhelyezkedései és az ívelt lefutású völgyek.

(Earth Impact Database, 2010 és Google Maps alapján saját szerkesztés)

7.5. Krátermezők

További félreértésekre adhatnak okot a krátermezők átmérőproblémái is. Krátermező akkor képződik, amikor viszonylag kisméretű (párszor tízméteres), repedésekkel átjárt, inkoherens, breccsás szerkezetű és/vagy gyenge mechanikai ellenálló-képességű meteorit lép be a légkörbe, viszonylag nagy sebességgel. A hirtelen megnövekvő légnyomás és közegellenállás miatt az izzásig hevült meteortest ekkor elkezd feldarabolódni (fragmentációs és ablációs folyamat). Pályája mentén szóródni kezd, és idealizált esetben ellipszis alakú területen csapódnak be a darabjai, amely ellipszis nagytengelye illeszkedik a légkörbe lépés síkjára. Az Earth Impact Database ilyen esetekben csak a krátermező legnagyobb kráterének átmérőjét adja meg. Szakirodalmi áttekintés segítségével (Passey és Melosh, 1980; Milton, 1968) azonban az adott mező többi (jelenleg ismert) tagjának átmérőit is meg lehet adni (6. táblázat). A módosított adatbázisba ezeknek az átmérőknek az összesített értékei kerültek be. Fontos kiemelni, hogy a krátermezőket (tartalmazzanak akárhány krátert is) egy kráterként tüntettem fel (az összeadott átmérőkkel) az elemzéseknél, ugyanis ezek egy darab test légkörbe lépésével keletkeztek.

6. táblázat. Az Earth Impact Database adataihoz képest módosított krátermezőkre vonatkozó átmérő-adatok. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján Passey és Melosh, 1980; Milton, 1968 adataival kiegészítve saját szerkesztés)

a krátermező neve	kontinens	kor (millió év)	régi átmérő (km)	új átmérő (km)	a változás (km)	a változás (%)
Henbury	Ausztrália	0,0042	0,15	0,66	+0,51	+340
Kaalijarv	Európa	0,004	0,11	0,306	+0,196	+178,18
Macha	Ázsia	<0,007	0,3	0,7	+0,4	+133,33
Morasko	Európa	<0,001	0,1	0,357	+0,257	+257
Odessa	É.-Amerika	<0,05	0,168	0,213	+0,045	+26,79
Rio Cuarto	D.-Amerika	<0,1	4,5	7,75	+3,25	+72,2
Sikhote Alin	Ázsia	0,000063	0,02	nincs adat	n. a.	n. a.

Más megítélés alá esnek az ún. kettős kráterek (7. táblázat). Ilyen esetekben az a valószínű, hogy egy nagyobb méretű kisbolygó (km-es nagyságrendű átmérővel) és a valamivel kisebb „holdja” (pár száz

méteres vagy kilométeres átmérővel) csapódott be egyszerre, két darab, viszonylag nagyméretű krátert (km-es, tíz kilométeres nagyságrendűeket) hagyva maga után. Ezek különálló becsapódásokként szerepelnek az adatbázisban, mert már valószínűleg a légkörbe lépésük előtt is különálló testek voltak és csak a köztük megnyilvánuló gravitációs erő tartotta őket közös pályán.

7. táblázat. Az ismert földi kettőskráterek.
(Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

	átmérő (km)	kor (millió év)	kontinens
Nördlingen-Ries és Steinheim	24 3,8	15,1	Európa
Gusev és Kamensk	3 25	49	Európa
Clearwater Lake East és Clearwater Lake West	26 36	290	Észak-Amerika

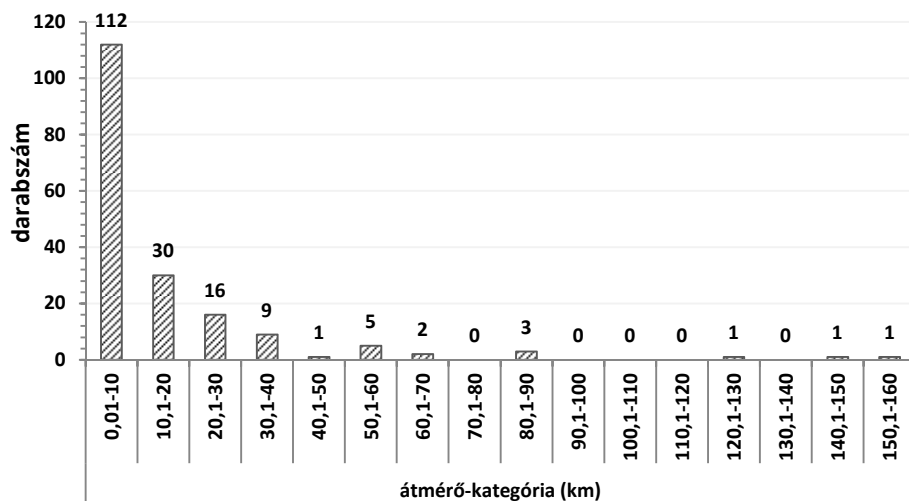
7.6. A földi meteoritkráterek átmérő szerinti eloszlása

A 8. táblázat foglalja össze a földi kráterek átmérő szerinti eloszlásának főbb statisztikai mérőszámait. Az adott területegységre jutó legtöbb kráter a pleisztocénben glaciálisan letarolt ösföldekkkel (Kanadai és Balti-pajzs) rendelkező kontinenseken (Észak-Amerika és Európa), valamint a nagy kiterjedésű sivatagokkal rendelkező Ausztrália területén található. Ezt fejezi ki e három kontinens viszonylag magas kráttersűrűsége. A *kráttersűrűség* Európában a legnagyobb, ami talán az elméletileg is várható krátergyakorisághoz mért viszonylag nagy népsűrűséggel magyarázható a Balti-pajzs területén (nagyobb népsűrűség esetén nagyobb eséllyel találják meg a krátereket). A minimum-átmérők tekintetében nincs nagy változatosság, a maximumok azonban véletlenszerű eloszlást mutatnak, ami kifejezi a nagyobb becsapódások ritkább és emiatt véletlenszerűbb jellegét. A *közvetett energia-felszabadulási intenzitás* a kráterek összesített átmérőit, mint a becsapódási energia közvetett függvényeit alkalmazza, így téve közvetett becsléseket a kontinenseken az elmúlt 2 milliárd évben felszabadult becsapódási energiára, első közelítésben figyelmen kívül hagyva az energia-felszabadulás időbeni lefolyását. A kráttersűrűség, és a közvetett energia-felszabadulási intenzitás nem tükrözik sem a meteorit-becsapódások eredeti számát, sem az emiatt felszabadult összenergiát (mindkettő magasabb volt eredetileg), hanem csak a jelenleg ismert

kráterek adatait prezentálja. A 35. ábra az átmérő-kategóriánkénti összesített eloszlást mutatja be a Földre vonatkoztatva.

8. táblázat. Az ismert földi kráterek átmérőadataiból számolt alapstatisztikai értékek. * - a táblázatban 181 kráter adatai szerepelnek, egynek (Santa Fe meteoritkráter) ugyanis nem ismert a pontos átmérője. (Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

	<i>Európa</i>	<i>Afrika</i>	<i>Ázsia</i>	<i>É.-Amerika</i>	<i>D.-Amerika</i>	<i>Ausztrália</i>	<i>kontinensek összesítve</i>
(a) az átmérők minimuma (km)	0,08	0,045	0,02	0,01	0,0135	0,02	0,01
(b) az átmérők maximuma (km)	52	160	90	150	40	90	160
(c) az átmérők átlaga (km)	11,45	17,15	15,27	19,89	9,22	16,13	15,78
(d) az átmérők összege (km)	538,24	325,91	320,61	1153,62	83,02	435,5	2856,9
(e) a kráterek darabszáma (db)	47	19	21	58	9	27	181*
(f) szórás	11,63	38,05	23,98	28,46	12,52	20,01	24,03
(g) módusz	3	3,5	8	8	4,5	10	6
(h) medián	7,5	3,5	6	8,25	4,5	9	8
(i) a kontinensek területe (millió km ²)	9,94	30,3	44,7	24,36	17,77	7,69	134,76
(j) kráttersűrűség (e) / (i) = (db/millió km ²)	4,73	0,63	0,47	2,38	0,51	3,51	1,34
(k) közvetett energia-felszabadulási intenzitás (d) / (i) = (km/millió km ²)	54,15	10,76	7,17	47,36	4,67	56,66	21,2

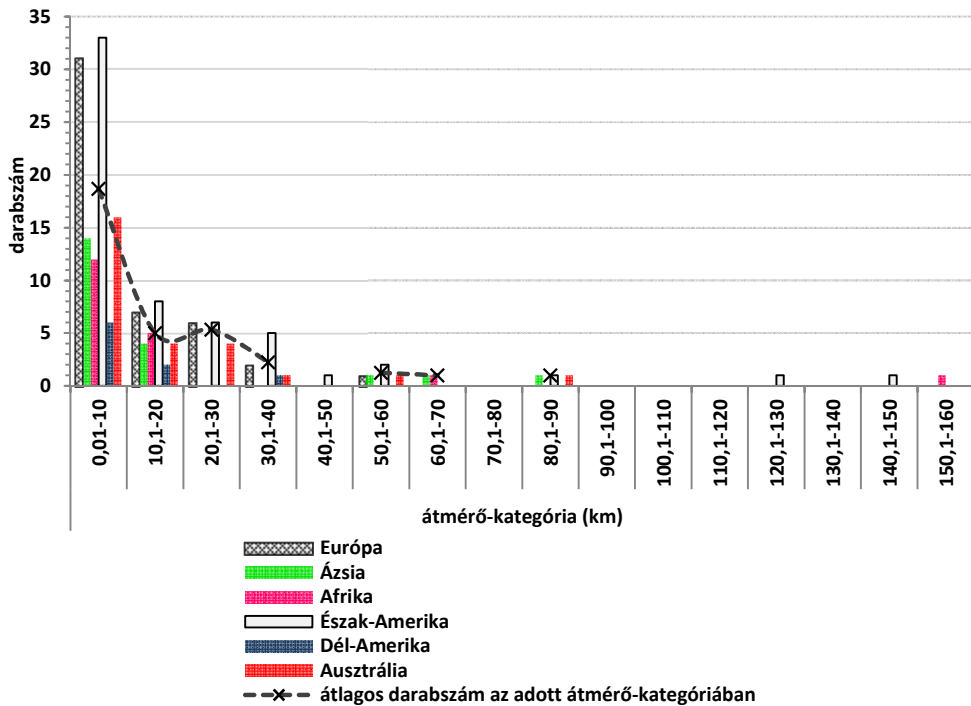


▣ **összesített darabszám az adott átmérő-kategóriában**

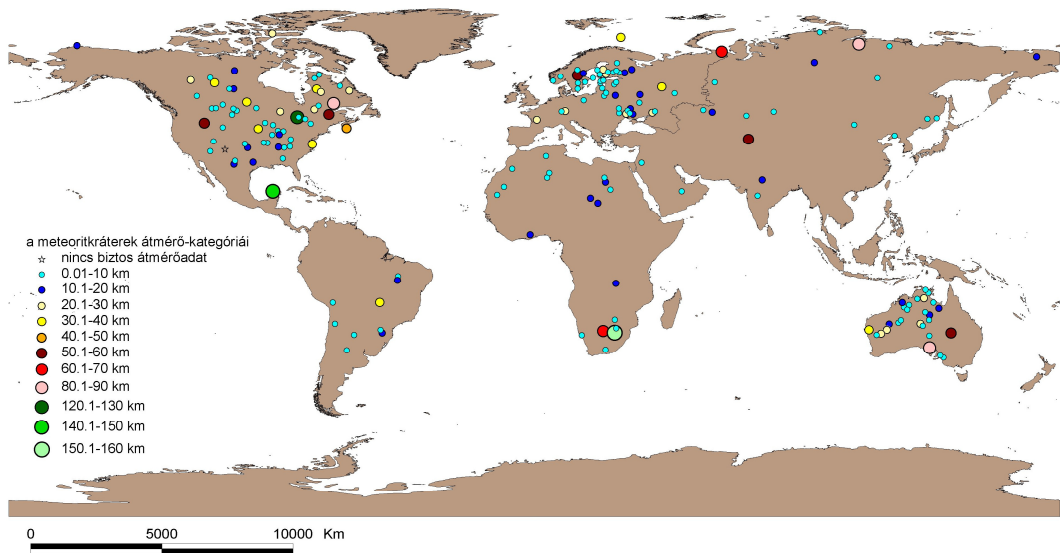
35. ábra. Az ismert földi meteoritkráterek átmérő-kategóriák szerinti összesített eloszlása. A grafikonon 181 kráter adatai szerepelnek, egynek (Santa Fe meteoritkráter) ugyanis nem ismert a pontos átmérője.

(módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

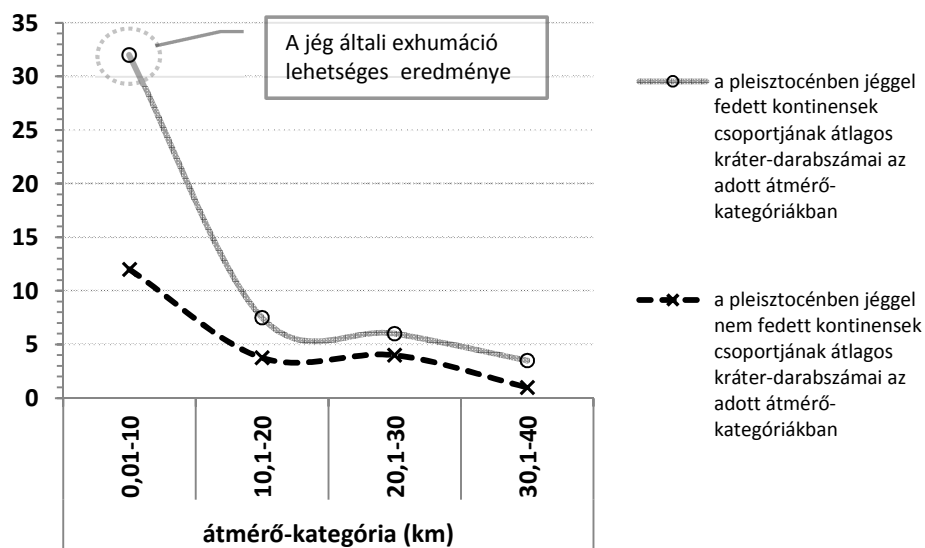
A 36. és a 37. ábrák az átmérő-kategóriánként vett kráter-eloszlásokat mutatják be kontinensenként szétválasztott grafikus, ill. térképi ábrázolással, ahol látható, hogy kiugró értékeket vesz fel Európa és Észak-Amerika a 40 km alatti krátereket illetően (36. ábra). A közös momentum a két kontinens fejlődéstörténetében, hogy mindkettőt jelentős negyedidei jégtakarók fedték, míg a másik négy kontinens (Afrika, Ázsia, Dél-Amerika és Auszália) nagyobb jégtakarók nélkül vészelt át a negyedidőszakot. A 37. ábrán pedig az is látható, hogy az európai és észak-amerikai, 40 km átmérő alatti kráterek főleg a pleisztocénben jégborította ősi pajzsokon találhatóak, ezek alapján pedig adódik az a feltevés, hogy a pleisztocén jégtakarók exhumálhatták ezeket, a zömükben középidői, vagy annál is idősebb krátereket (ld. még a 44. ábrát). A 38. ábra a fent említett két kontinenscsoport kráterszám-átlagait bemutatva a különbségeket legjellemzőbben kimutató átmérő-kategóriákban ($d < 40$ km) kivonatossan ábrázolja a jégtakarók lehetséges exhumációs szerepét. Mindezek tükrében felmerülhet az, hogy habár a jelenkori éghajlati tényezők nem is módosítják érdemben a kráter-eloszlásokat, de egy-egy múltbéli epizodikus éghajlati esemény (eljegesedés és ezt kísérő exhumáció) azonban érdemben befolyásolhatja a jelenleg megfigyelhető eloszlási jellegzetességeket.



36. ábra. Az ismert földi meteoritkráterek átmérő-kategóriák szerinti eloszlása, kontinensenként. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)



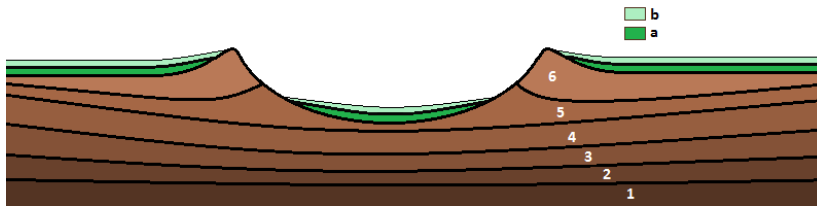
37. ábra. Az ismert földi meteoritkráterek átmérő-kategóriánkénti eloszlásai a Föld felszínén. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)



38. ábra. A pleisztocénben nagy jégtakarókkal fedett kontinensek csoportjának átlagos kráter darabszámai; ill. a pleisztocénben jéggel nem fedett kontinensek csoportjának átlagos kráter darabszámai ugyanazon átmérő-kategóriákban.
(módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

7.7. A kráterek kora és a kor szerinti eloszlásuk

Ez a paraméter a legbizonytalanabb valamennyi közül. Legbiztosabbnak a radiometrikus korok tekinthetőek, esetenként azonban nagy a hibahatáruk. Más esetekben sztratigráfiai-, biosztratigráfiai alapokon történik meg a korbecslés. Idealizált esetet feltételezve a 39. ábrán látható az a típusú üledékrétegződés, amely segíthet a meteoritkráter korának meghatározásában. Ez a módszer a becsapódás előtt a célterületre lerakódott (pre-impakt) és a becsapódás után a kráterbe és annak környékére lerakódott (poszt-impakt) üledékek elkülönítésén és azok kormeghatározásain alapul. Ilyenkor (normál rétegződést feltételezve) a kráter kora a legfiatalabb pre-impakt és a legidősebb poszt-impakt rétegek kora közé fog esni (a 39. ábra példáján a kráter kora a 6-os számú pre-impakt üledékréteg kora és az „a” jelű poszt-impakt üledékréteg kora közé fog esni).

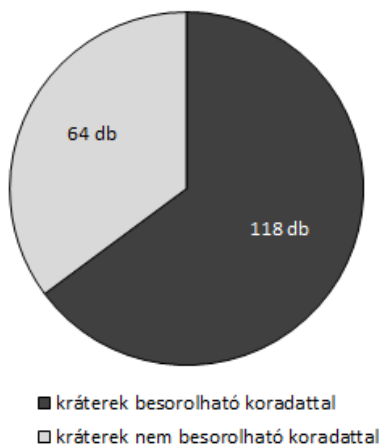


39. ábra. A meteoritkráter sztratigráfiai alapú kormeghatározásának alapja idealizált esetben. 1-6. – pre-impakt üledéksor (normál településben felfelé fiatalodó); a és b – poszt-impakt üledéksor (normál településben felfelé fiatalodó). Az ábra nem méretarányos.
(saját szerkesztés)

A 9. táblázat példákat sorol fel a korbizonytalanságok valamennyi típusára, valamint arra, hogy melyik hogyan sorolható be, vagy nem sorolható be a kor-eloszlási adatbázisba, a 40. ábrán pedig az ismert és az ismeretlen korú kráterek egymáshoz viszonyított aránya látható.

9. táblázat. Példák az ismert földi meteoritkráterek kor-bizonytalanságaira.
(módosított *Earth Impact Database, 2012* adatok alapján saját szerkesztés)

<i>név</i>	<i>EID által megadott kor (millió év)</i>	<i>a kor-bizonytalanság jellege</i>	<i>kor szerinti besorolás</i>
Logoisk	42.3 ± 1.1	radiometrikus kor, viszonylag kis hibahatárral	42,3 millió éves
Holleford	550 ± 100	radiometrikus kor, viszonylag nagy hibahatárral	550 millió éves
Acraman	~590	becsült adat, amely nem esik korszakhatárra	590 millió éves
Lumparn	~1000	becsült adat, amely földtörténeti korszakhatárra esik	nem került besorolásra
Amelia Creek	1640-600	intervallum, mely több földtörténeti koregységgel is átfedésben van	nem került besorolásra
Ile Rouleau	<300	maximum (legnagyobb) kort ad csak meg	nem került besorolásra, kivéve, ha <0,0117, mert ez már kizárólag holocén
Flaxman	>35	minimum (legkisebb) kort ad csak meg	nem került besorolásra
Kamil	?	semmilyen koradatot nem ad meg	nem került besorolásra



40. ábra. A besorolható korú, ill. a nem besorolható korú földi meteoritkráterek aránya. (Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

A 41. és a 42. ábrák összesítve mutatják be a jelenleg ismert korú meteoritkráterek kontinensenként összesített átmérőjét és alapstatisztikai mutatóit, levetítve mindezeket a különböző földtörténeti kor-egységekre. Ezen mutatók változásai összevethetőek a földtörténeti kor-egységek millió években kifejezett hosszának változásaival is, időtartamtól függő változások megfigyelését lehetővé téve ez által. Meghatározásra kerültek az alapstatisztikai értékek mellett olyan, ezekből származtatott értékek is, mint a *közvetett energia-felszabadulási intenzitás*, amely megmutatja, hogy az adott kor-egységben egymillió év alatt képződött kráterek összesített átmérője átlagosan hány kilométer (mértékegysége: *km/millió év*). Itt a kráterek átmérői a becsapódáskor felszabadult energia függvényeként és reprezentánsaként szerepel. A másik származtatott adat a *kráterképződési intenzitás*, ami pedig arra nézve ad egy átlagértéket, hogy ugyanazon kor-egységben egymillió év alatt átlagosan hány darab meteoritkráter képződött (mértékegysége: *darab/millió év*).

Nagyon fontos figyelembe venni az alábbi tényezőket a kiértékelésnél:

- A 41. és a 42. ábrákon csak azok a kráterek szerepelnek, amelyekhez az Earth Impact Database 2012-ben behatárolható koradatot adott meg (118 kráter – 40. ábra).
- Sok esetben ennek a 118 kráternek sem teljesen biztosak a koradatai.

- A lemeztektonikai mozgások miatt a kráterek jelenkori koordinátái nem feltétlenül azonosak a becsapódás eredeti földrajzi koordinátaival.
- Bizonyos folyamatok (pl. glaciális erózió) sok régi krátert hoznak a felszínre, azaz helyenként egy múltbéli eloszlási struktúrát tárnak újra fel.
- A légkör, ill. a változatos és hatékony földi eróziós folyamatok miatt tovább torzulnak az eredeti eloszlási jellemzők.

Mindezeket figyelembe véve kijelenthető, hogy a jelenre vonatkoztatott meteoritkráter-eloszlási következtetések túlnyomó része nem azonos az összes, valóban megtörtént becsapódás eloszlásával. Kivételt jelenthet ez alól a holocén, mert annak rövid az időtartama, ezért a friss krátereket pusztító eróziós folyamatok még nem tudtak kiteljesedni. Az adatok kiértékelésénél figyelembe kell venni azt is, hogy a becsapódások intenzitásának időbeni kilengéseiben semmilyen szabályos időközű periodicitást nem sikerült az eddigi kutatások alapján kimutatni (Bailer-Jones, 2011).

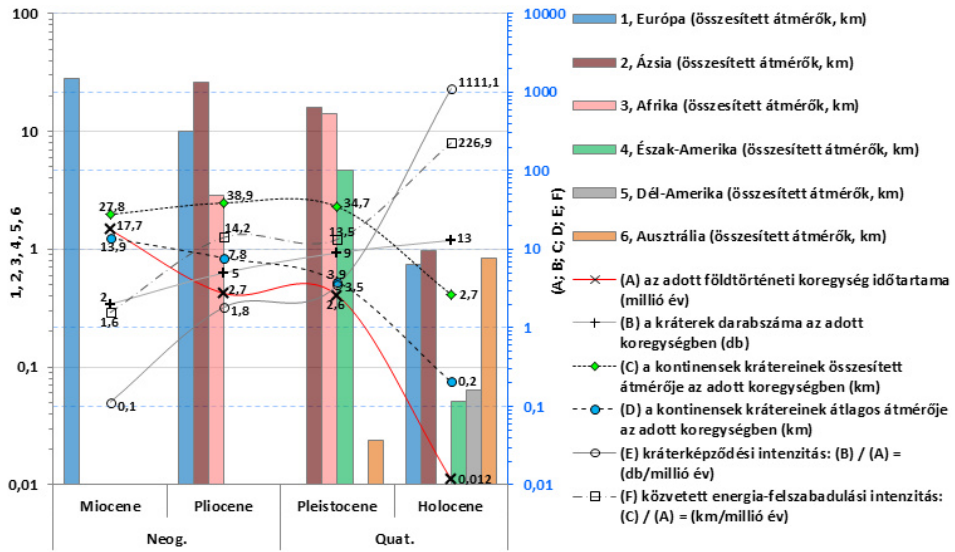
Ezek alapján a 41. és 42. ábrák alapstatisztikai mutatóiból az alábbi következtetések vonhatóak le:

- Az alapstatisztikai értékek (B; C; D) és a származtatott értékek (E; F) lefutása legtöbbször szinkronizált, és néhány esetben magával a földtörténeti kor-egységek hosszát jelző görbével is szinkronicitást mutat (A) a lefutásával is, azaz hullámhegyeik és völgyeik helyenként egybeesnek (41. ábra).
- A miocéntól kezdve egészen a holocén végéig (azaz napjainkig) a statisztikai mutatók vonalgrafikonjainak szinkronicitása egyre inkább felbomlik. Összevetve ezt a megelőző időszak (paleoproterozoikumtól az eocénig) kiegyenlítettebb vonalgörbéivel, az a feltevés adódik, hogy a jelenhez minél közelebbi időpontokat vizsgálva, egyre inkább szerepet kap a becsapódások eloszlása is a kráterek eloszlása mellett (42. ábra). Jól jelzi ezt a kráterképződési intenzitás erőteljes növekedése is.
- A holocénre jellemző a sok kis becsapódás rövid idő alatt. Ez (a légkör módosító hatásától eltekintve) egybevághat a Naprendszer

krátereződésének egyik alapvető törvényével, mely szerint a kisebb becsapódások gyakoribbak és egyenletesebb gyakorisággal történnek. Az a tény azonban, hogy az időben visszafelé haladva egyre nagyobb eséllyel találunk nagyobb méretű krátereket, azt is mutatja, hogy ezek a kis kráterek gyorsan elpusztulnak.



41. ábra. Az ismert korú földi meteoritkráterek alapvető statisztikai jellemzőinek változásai a földtörténeti időskálán. Az oszlopdiagramokra (1-6.) a függőleges bal tengely; a vonalgrafikonokra (A-F) a jobb tengely skálabeosztása érvényes. Jelmagyarázat: 1-6. – a kráterek átmérőinek kontinensenként összesített értéke az adott koregységben (km), ahol 1 – Európa, 2 – Ázsia, 3 – Afrika, 4 – Észak-Amerika, 5 – Dél-Amerika, 6 – Ausztrália. (A-F) – alapstatisztikai mérőszámok, ahol (A) – az adott földtörténeti koregység időtartama (millió év); (B) – kráterek darabszáma az adott koregységben (db); (C) – a Föld krátereinek összesített átmérője az adott koregységben (km); (D) – a Föld krátereinek átlagos átmérője az adott koregységben (km); (E) – kráterképződési intenzitás $[(B)/(A) = (\text{db}/\text{millió év})]$; (F) – közvetett energia-fel szabadulási intenzitás $[(C)/(A) = (\text{km}/\text{millió év})]$. I. – nagy kihalási esemény; II. – kis kihalási esemény. (módosított Earth Impact Database, 2012 és International Stratigraphic Chart, 2009 adatok alapján saját szerkesztés)



42. ábra. Az ismert korú földi meteoritkráterek alapvető statisztikai jellemzőinek változásai a miocéntől a holocénig (azaz napjainkig). A kontinentális eloszlásokat bemutató oszlopdiaagramokra a függőleges bal tengely skálabeosztása érvényes; a globális eloszlásokat felvázoló vonalgrafikonokra a jobb tengely skálabeosztása érvényes.

(módosított Earth Impact Database, 2012 és International Stratigraphic Chart, 2009 adatok alapján saját szerkesztés)

7.8. Az ismert korú földi kráterek adatai alapján számolható energiafelszabadulás jellege az egyes földtörténeti koregységekben – az $(F)/(B)$ hányadosok –; valamint a földtörténeti kihalások lehetséges kapcsolatai

A 43 (a és b) ábráin láthatóak azok az $(F)/(B)$ hányadosok, amelyek azt mutatják meg, hogy az ismert korú kráterek átmérőjéből (mint a becsapódási energia függvényéből) számított közvetett energiafelszabadulási intenzitás (az egymillió év alatt képződött kráterek összesített átmérője az adott koregységben) hány becsapódásra oszlik el ugyanazon koregységben. Ez az érték utal arra, hogy az adott koregységben a Földön felszabadult impakt energiát több, vagy netán kevesebb meteorit szállította. Minél kisebb ez az érték, az adott koregységben az impakt energiát annál kevesebb meteorit szállította (még egyszer fontos kihangsúlyozni: az adatsorban csak a jelenleg ismert és ezen belül is az ismert korú kráterek szerepelnek). Ez alapján a 43. ábráról leolvasható, hogy a kambrium végéig viszonylag kevés ismert becsapódás hozta az impakt energiát (az ilyen idős kráterek nagy része ugyanis mára már eltűnt). Az ordoviciumtól a paleogénig az esetek nagy részében kb. 0,5 és 1,5 között van ez az érték, a holocénre pedig 18,9-re emelkedik, ami annak a következménye, hogy a kisméretű kráterek relatíve nagy gyakorisággal képződnek, de egyben gyorsan le is pusztulnak.

A földtörténet utolsó 540 millió évében eddig 12 kihalási eseményt (5 nagy és 7 kisebb) sikerült kimutatni (Prothero, 1994; Porter, 2004; Rohde és Muller, 2005; White és Saunders, 2005; Glikson, 2005). Ezek időrendben, a hozzávetőleges korokkal:

- *botomániai* (kb. 517 millió éve, kis kihalás)
- *dresbachi* (kb. 502 millió éve, kis kihalás)
- **felső-ordovicium** (kb. 488 millió éve, nagy kihalás)
- *felső-szilur* (kb. 416 millió éve, kis kihalás)
- **felső-devon** (kb. 359 millió éve, nagy kihalás)
- *középső-karbon* (kb. 318 millió éve, kis kihalás)
- *középső-perm* (kb. 270 millió éve, kis kihalás)
- **felső-perm** (kb. 250 millió éve, nagy kihalás)
- **felső-triász** (kb. 199 millió éve, nagy kihalás)
- *felső-jura* (kb. 145 millió éve, kis kihalás)
- **felső-kréta** (kb. 65 millió éve, nagy kihalás)
- *eocén végi* (kb. 33.9 millió éve, kis kihalás)

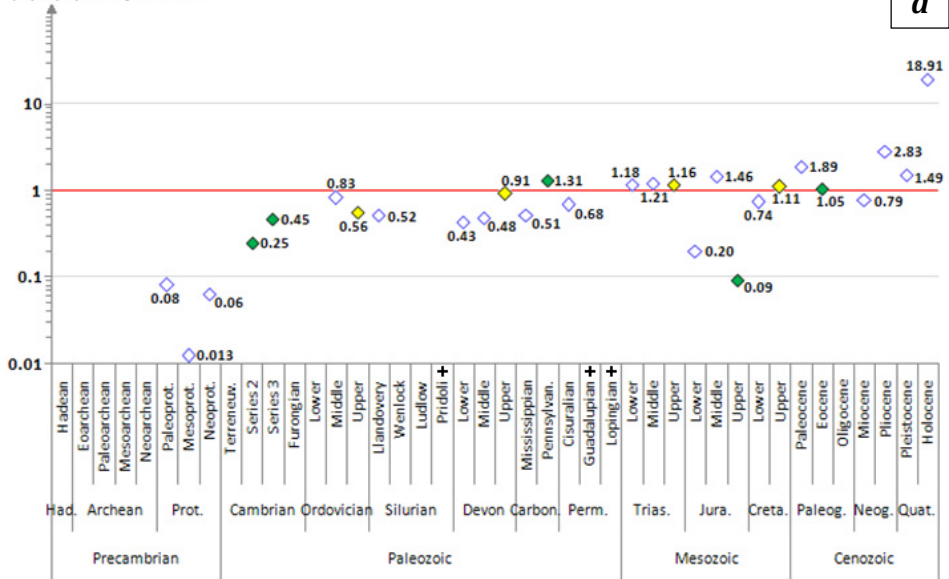
Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a 43. ábra csupán a lehetséges időbeni átfedéseket mutatja be az egyes kihalási események és a jelenkori adatok alapján ismert becsapódási intenzitások között, amely nem bizonyít ok-okozati összefüggést közöttük. Mindemellett sok olyan teresztrikus eredetű ok is létezik, amely (vagy amelyek egymásra hatása) kihalást okozhat önmagában is (pl. éghajlatváltozás, tengerszintváltozás, óceáni anoxia, intenzív vulkanizmus). A 43 (a) ábrán az egyes értékeknél jelölve van, ahol kisebb vagy nagyobb kihalás történt. Látható, hogy az öt nagy kihalásból négyenél az adott koregységben történt meteorit becsapódás, azaz meghatározhatóak az $(F)/(B)$ hányadosok, amelyek mind a négy esetben közel esnek 1-hez. A hét, kisebb kihalás közül ötnél lehet $(F)/(B)$ hányadost számolni, melyek közül három szintén 1 közelében van. Többen is felvetették már a meteorit-becsapódások és a kihalások közötti esetleges ok-okozati kapcsolatokat. A legismertebb ezek közül a már említett felső-kréta kihalás (Alvarez et al. 1980). Egyéb kihalásoknál is felmerült azonban a becsapódások szerepének lehetősége: a felső-perm és felső-triász (White és Saunders, 2005); ill. az eocén végi (Glikson, 2005) esetében is. Ezek a lehetséges kapcsolatok egyes, főleg nagyobb becsapódások kihalásokkal való időbeni egybeesésin alapulnak. Az azonban máig nyitott kérdés, hogy a kihalásokat a becsapódások önmagukban is képesek elindítani, vagy csak felerősítik a már más okokból (pl. felmelegedés, lehűlés, tengerszint-változás, óceáni anoxia stb.) elkezdődött kihalásokat. Vizsgálták azt is, hogy a becsapódások okozhatnak-e olyan jellegű magmatizmust vagy vulkánosságot, amely kihaláshoz vezetne. A rendelkezésre álló adatokkal elvégzett statisztikai elemzések a nagyobb becsapódások és a nagy vulkáni-magmás periódusok között lehetséges időbeni korrelációkat kutatták, de nem mutattak egyértelmű összefüggést a becsapódások fluxusa és a nagy magmás provinciák kialakulása között (White és Saunders, 2005; Glikson, 2005). A 43 (a) ábrán látható egybeesések mellett továbbra sem ismert teljesen az a mechanizmus, amely egy nagy meteorit becsapódása által elindíthatná és/vagy felerősíthetné a kihalási folyamatot. A 41. ábrával összevetve megfigyelhető, hogy a kihalásoknál az átlagos kráterátmérők is kissé nagyobbak, mint egyéb esetekben. Ez önmagában nem bizonyít ok-okozati kapcsolatot a becsapódások és a kihalások között, azonban felhívja a figyelmet arra, hogy sok kihalási eseménynél egyidejűleg megnövekszik a meteoritkráterek átlagos átmérője, és az ezzel összefüggésben lévő becsapódási energia mértéke is (legalábbis a jelenleg rendelkezésre álló adatok erre utalnak).

A 43 (b) ábra pedig egy lehetséges összefüggést vázol fel az $(F)/(B)$ hányadosokkal kapcsolatban: látható, hogy az említett hányadosok trendje

nagy vonalakban körülbelül tükörképe az egyes földtörténeti korok millió években kifejezett időtartalmának, azaz nem kizárólagos jelleggel, de az érvényesül, hogy minél hosszabb egy koregység, az $(F)/(B)$ hányadosok valószínűleg annál kisebb értéket vesznek fel. Amely koregységben nem ismerünk becsapódást, ott nagy bizonytalansági faktorról bíró interpolációt végeztem, ezt a zöld vonal szaggatottá válása jelzi. Az is látható trend hogy a földtörténeti múltba egyre visszább tekintve átlagosan (de nem szigorúan monoton jelleggel) egyre hosszabbak lesznek ezek a koregységek. Véleményem szerint az az ok, ami ezt koregység-hosszabbodást okozza, az okozza az ezzel nagyjából párhuzamos $(F)/(B)$ hányados értékcsökkenést is: ez az általam feltételezett ok pedig az, hogy az erózió miatt az időben visszafelé haladva egyre jobban eltűnnek azok a geológiai nyomok, amik a finomabb korbeosztást lehetővé tennék. Következtetésem szerint ezekkel a nyomokkal együtt tűnnek el a kisebb kráterek is, és emiatt indul afféle „látszólagos” csökkenésnek az $(F)/(B)$ hányadosok trendje is. Mindez (összhangban az eddig felvázoltakkal) arra utal, hogy a kráterek jelenkori eloszlását nagyban befolyásolja az erózió.

$(F)/(B)$ hányadosok

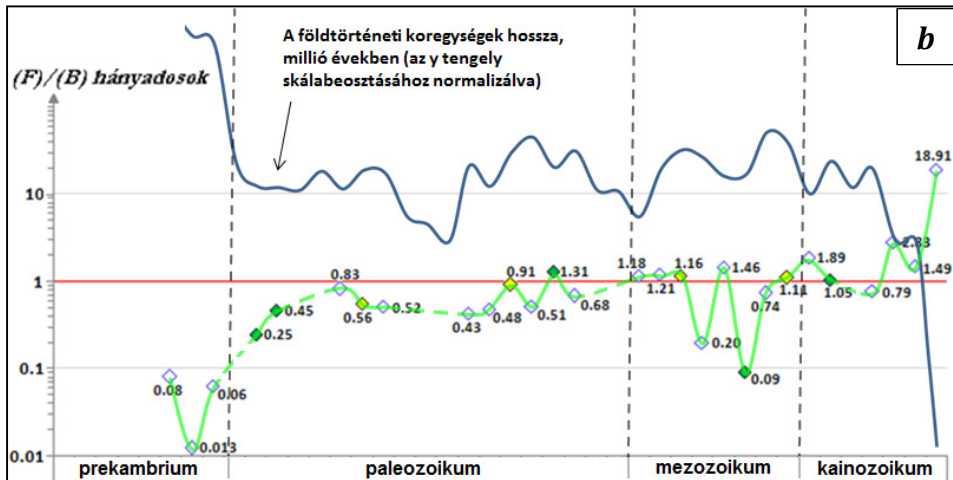
a



(F) [közvetett energia-fel szabadulási intenzitás (km/millió év)]

(B) [a kráterek darabszáma az adott koregységben (db)]

- ◇ $(F)/(B)$ hányadosok kihalás nélkül
- ◆ $(F)/(B)$ hányadosok kis kihalással
- ◇ $(F)/(B)$ hányadosok nagy kihalással
- + kihalási esemény ismert becsapódás nélkül

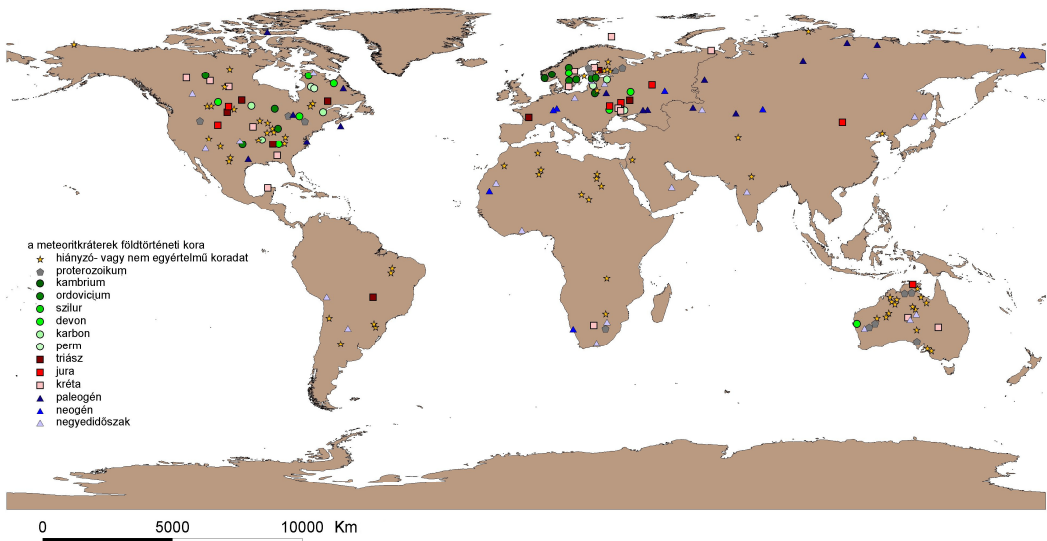


43. ábra (a, b). Az $(F)/(B)$ értékek összefüggései.

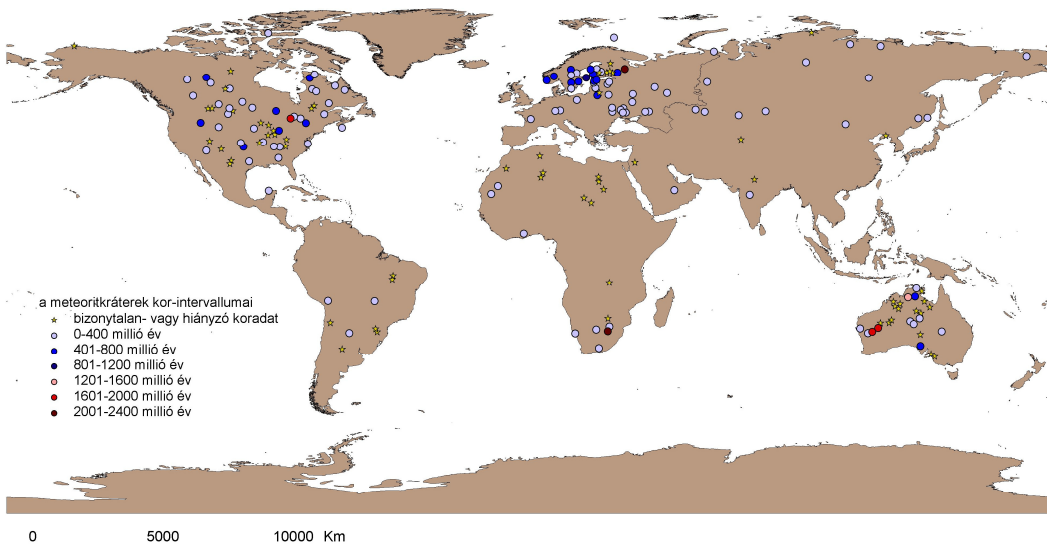
(a): Az $(F)/(B)$ hányadosok az egyes földtörténeti koregységekben, valamint lehetséges kapcsolatok a földtörténeti kihalásokkal, ahol $(F) = [a \text{ kráterek összesített átmérője az adott koregységben (km)}] / [az \text{ adott koregység időtartama (millió év)}] = [km/millió \text{ év}]$; ill. $(B) = [a \text{ kráterek darabszáma az adott földtörténeti koregységben (db)}] = [db]$.

(b): Az (F)/(B) hányadosok összefüggése az egyes földtörténeti koregységek időtartamával. Ahol a hányadosokat összekötő zöld vonal szaggatottá válik, ott az ismert kráterek hiányában nem lehetséges az (F)/(B) hányadosokat meghatározni, csak interpolálni lehet, bizonytalan végeredménnyel.
(módosított Earth Impact Database, 2012 és International Stratigraphic Chart, 2009 adatok alapján saját szerkesztés)

A 44. és a 45. ábrák az ismert korú kráterek térbeli eloszlásait mutatják be a kráterkorok (44. ábra) és kor-intervallumok (45. ábra) szerint. Megfigyelhető rajtuk, hogy az idősebb kráterek hogyan csoportosulnak az ősföldeken, míg a fiatalabb felszíneken a kráterek kora is egyre alacsonyabb lesz. Jól kitűnik az Ukrán pajzson lévő, eltemetett, idős kráterek csoportja is. A 44. ábrán megfigyelhető továbbá, hogy a pleisztocén idején nem képződtek kráterek (ill. nem ismeretesek) a jégtakarók területén. Ez a jégtakaró pajzs-funkciójára utal.



44. ábra. Az ismert korú meteoritkráterek földtörténeli kor szerinti eloszlása. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)



45. ábra. Az ismert korú meteoritkráterek kor-intervallum szerinti eloszlása. (módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés)

7.9. A negyedidőszaki jégtakarók és a glaciális erózió hatása a kráterképződésre és a kráterek jelenlegi eloszlására (a jégpajzsok kettős szerepe)

Amint már a fentebbi grafikonok utalnak rá, a jégpajzsok szerepe kettős lehet a meteoritkráterek jelenlegi eloszlására vonatkozóan (36., 37., 38., és 44. ábrák). Egyrészt a kialakuló jégpajzs védi az alapkőzet felszínét a becsapódó meteoritoktól, a jégen esetlegesen kialakuló impakt formák morfológiája, lepusztulás-története pedig a megfigyelések hiányában nem ismert (mivel eddig nem sikerült ilyet felfedezni a Földön). A jég tulajdonságai alapján feltételezhető, hogy egy itt kialakuló meteoritkráter nem maradhat fent olyan sokáig, mint egy nyers kőzetfelszínbe mélyülő, ugyanakkora kráter. Ennek okai a következők lehetnek:

- Bolygónk felszínén egy jégtakaró eleve átmeneti képződmény, azaz a kráter semmiképp sem lehet idősebb, és nem maradhat meg hosszabb ideig, mint maga a jégtakaró.
- A jégfelszínen kialakuló kráter képződési mechanizmusa alapvetően eltérhet a kőzetfelszínbe történő becsapódás mechanizmusától, ugyanis azonos mértékű becsapódási hő sokkal több jeget tud megolvasztani, mint kőzetet. Ez az olvadékvíz már a kráter kialakulása utáni pillanatokban visszaömlhet a kráterbe, jórészt kitöltve azt. Azaz, már a kráterképződés egyik legalapvetőbb kísérőjelensége (a felszabaduló becsapódási hő) is nagyban hozzájárul a becsapódás formai végeredményének az eltűnéséhez.
- A végül megmaradó becsapódási nyom (kráter) az állandóan mozgásban lévő jég plasztikus deformálhatósága miatt gyorsabban módosul és pusztul, mint egy hagyományos szárazföldi kráter.
- Már néhány fokos éghajlati melegedés is jelentősen felerősítheti a kráter olvadásos erózióját.

A fentebb leírtakban a jégtakaró lehetséges pajzs-funkcióját vázoltam fel, valamint azt, hogy utólag miért nehéz azt kinyomozni, hogy a pleisztocén jégpajzsokra történtek-e egyáltalán becsapódások. Az azonban megemlíthető, hogy a Balti- és a Kanadai-pajzsokon mindösszesen egy darab pleisztocén korú kráter ismert a legvastagabb

pleisztocén jégtakarók területéről. A jégtakarók peremén kívül eső területeken azonban megtalálhatóak a kisméretű negyedidőszaki impakt kráterek (tehát egyébként az eljegesedés idején is voltak becsapódások). Ez akár jelentheti azt is, hogy a jég pajzsként védte a felszínt.

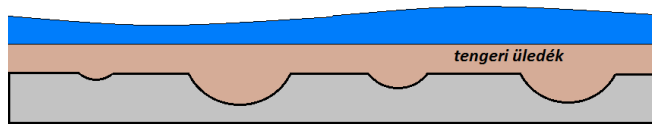
A következő dolog, amire a jégtakarók szerepe kapcsán fel szeretném a figyelmet hívni az, hogy a jégpajzs alján (azaz a jég és az alapkőzet határán) egy fontos dolog megy végbe (46. ábra): a korábban eltemetett kráterek exhumációja. Az ősföldeket borító fedőtakaró letarolása által. Eközben maga az alapkőzet felső része is glaciális erózió eshet át, azaz amellet, hogy az egykori kráter felszínre kerül, egyben roncsolódhat is (a poszt-glaciális területek krátereinél sok esetben hiányzik is emiatt a sánc-szerkezet), a helyileg intenzívebb jég általi letarolás esetében pedig akár el is tűnhetnek a kisebb kráterek (46. ábra). Mindezek fényében érdekes lehet majd ilyen szempontból is az az alapkőzet, amely a jelenleg intenzíven visszahúzódó grönlandi jégtakaró alól fokozatosan a felszínre bukkan majd az elkövetkező évtizedekben és évszázadokban.



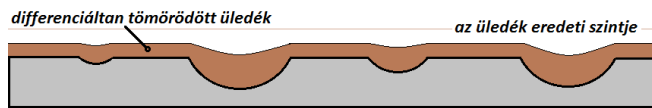
1, meteorit-becsapódások az alapkőzetbe (a; b; c; d)



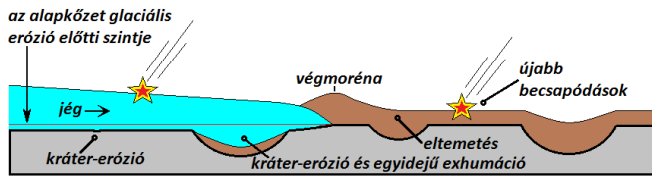
2, az alapkőzet eróziója és a kráterek elsődleges eróziója



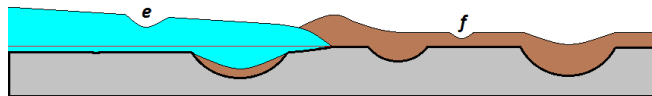
3, tengeri elöntés és üledéklerakódás



4, a tenger visszahúzódása és a tengeri üledék differenciált tömörödése



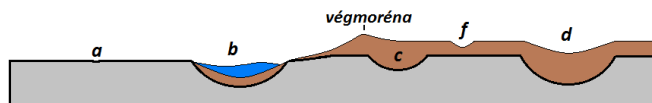
5, a mozgó jégtakaró pajzs-funkciója, ill. az eróziós és exhumációs hatása



6, az újonnan képződött meteoritkráterek (e; f)



7, a jégtakaró olvadása és visszahúzódása



8, glaciálisan erodált-legyalult (a), ill. erodált, de egyben exhumált kráterek (b) (esetleg poszt-glaciális tóval kitöltve); glaciális üledékkel eltemetett kráterek (c); friss kráterek (f); jég által nem bolygatott kráterek és kráternyomok (d)

46. ábra. A pleisztocén jégtakarók lehetséges hatásai a kráterképződésre, a kráterek exhumációjára, illetve a kráterek eloszlására. (saját szerkesztés; az ábra nem méretarányos)

8. A földi meteoritkráterek hidrogeográfiai jellemzői

Ez a fejezet a becsapódásos alakzatokat átalakító erők közül a felszínen (lineárisan) lefolyó víz hatásait elemzi. Kiemelten pedig azt, hogy *egyrészt* az elsődleges becsapódásos formák hogyan hatnak a rajtuk kialakuló vízhálózat rajzolatára; *másrészt*, hogy bizonyos rajzolatípusok milyen eredeti felszíni képződmények hatását tükröz(het)ik. A konkrét krátereken (13 db) elvégzett vizsgálatok alapján néhány általánosítható konklúziót fogalmazható meg a becsapódásos kráterformációk vízhálózatának tipikus jellemzőit illetően, amelyek akár további kráterek felismerését is segíthetik olyan esetekben, amikor az elsődleges kráterforma már alig azonosítható. A vízhálózati rajzolatípusok főbb jellemzőinek megismerése ezen a ponton kapcsolódik szervesen a kráterek eloszlási jellemzőit bemutató előző fejezetekhez, méghozzá kétirányú kapcsolódással: egyrészt a krátereken kialakuló, forma-specifikus vízhálózati rajzolatípusok erodálni igyekeznek a krátert (azaz csökkentik az eloszlási vizsgálatok elemszámát), másfelől viszont ugyanezen rajzolatok forma-specifikus jellege teszi könnyebben felismerhetővé a krátert (ezáltal pedig növelhetik az eloszlási vizsgálatok elemszámát). Természetesen ezek a morfometriai-alakrajzi következtetések önmagukban még nem perdöntőek, mert azok értékelését lényegesen befolyásolja a kráterek kora és mérete, másrésztől a döntő szót csak a tektonikai és közettani előzmények és adottságok részletes elemzése alapján lehet kimondani (Mihályi et al. 2009).

8.1. Rövid áttekintés a vízhálózati rajzolatípusokról

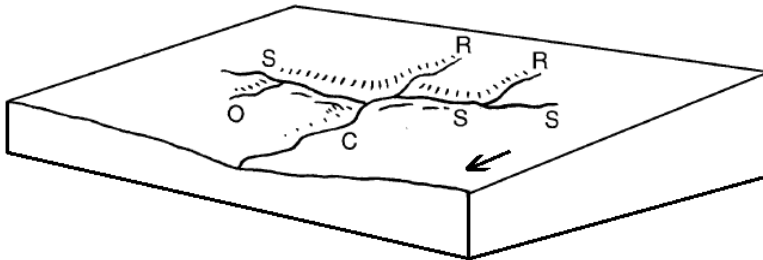
Az 1960-as évektől ismert az a tény, hogy a lejtős térszínek és bizonyos geológiai szerkezetek jellegzetes, felülnézeti folyóhálózati mintázatot eredményeznek (Szabó J. 1998b). Ez kétféle módon jöhet létre:

- (1) – az adott vízhálózati rajzolatot kizárólag a lejtők befolyásolják, kialakulásában szerkezeti elemek (pl. törések, vagy a törések menti vertikális elmozdulások által létrejött peremek stb.) nem játszanak szerepet. Ez a *szabadon fejlődő vízhálózat*.
- (2) – a kialakuló vízhálózati rajzolatot a lejtők mellett a gyakran nagyobb mélységben gyökerező geológiai szerkezetek (pl. törések, vetők, stb.) is jelentősen befolyásolják (48. ábra). Sok vonatkozásban módosító hatása lehet a litológiai adottságoknak is. Az ilyen területen megjelenő

vízfolyások (a lejtőkhöz köthető meghatározottság mellett) szelektív erózió által rajzolják ki a kőzetkülönbségeket vagy éppen a szerkezet jellemzőit: a puhább kőzetekbe, ill. a törések mentén jobban bevágódnak, így nagyobb eséllyel válnak magasabb rendű (nagyobb) folyókká. További tényező az eltemetett szerkezetek feletti üledékek eltérő tömörödése (differenciált kompakció), amely szintén preformált völgyeket alkothat. Ez a fejlődési típus eredményezi a *szerkezetileg kötöten fejlődő (irányított vagy preformált) vízhálózatot*.

A meteoritkrátereknél mind a *szabad-*, mind pedig a *kötött* vízhálózat-fejlődési típus szerepet kaphat: szabadon fejlődhetnek pl. a sáncról- vagy a törmeléktakaró külső lejtőiről lefutó folyóvizek; míg a becsapódás által kialakított törések, vetők és gyűrődések, ill. az esetleges mélyszerkezet kötött vízhálózat-fejlődést tesznek lehetővé. A két fejlődési módon kialakult vízhálózati rajzolatok szervesen kapcsolódhatnak egymáshoz a meteoritkráterek esetében, egyben egy jellegzetes rajzolatípust is kialakítva.

Egy adott felszíndarabon négyféleképpen futhatnak a folyók, az uralkodó lejtésirányhoz képest (47. ábra). Lehetnek konzekvensek, reszekvensek, obszekvensek és szubszekvensek. Ez az osztályozás könnyebbé teszi a vízhálózat elemeinek a meghatározását.



47. ábra. A folyóhálózat elemeinek a fő lejtésirányhoz való lehetséges viszonyai. C – konzekvens (a fő lejtésiránnyal azonos folyásirányú- és egyben a vizsgált terület legmagasabb rendű fő-folyójaként funkcionáló vízfolyás). R – reszekvens (szintén a fő lejtésirányt tükrözi, de a vizsgált terület fő-folyójának medrétől elkülönülő mederben fut). O – obszekvens (a fő lejtésiránnyal mikro-domborzati hatások miatt ellentétesen fut). S – szubszekvens (a fő lejtésirányra merőlegesen fut és a konzekvens-, a reszekvens-, ill. az obszekvens vízfolyásokat kapcsolja össze). A fekete nyíl a fő lejtésirányt mutatja.

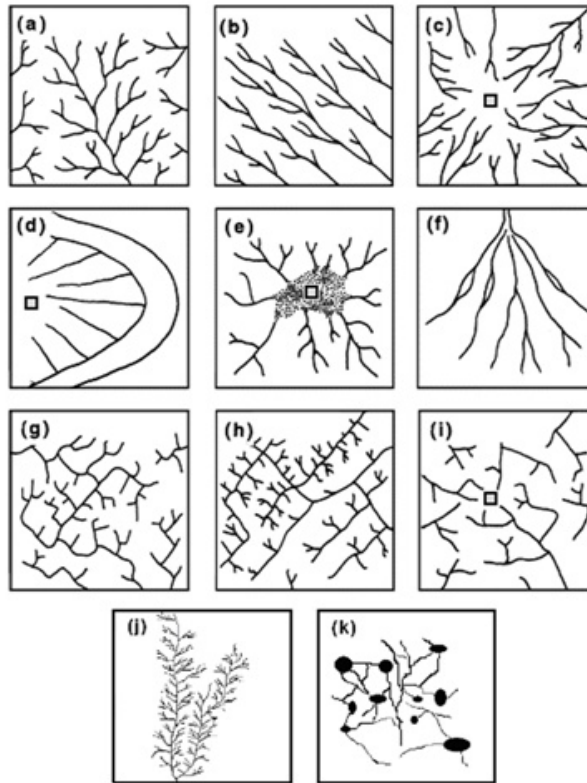
(Twidale, 2004, módosítva)

A földi becsapódásos kráterek vízhálózatánál a fő lejtésirányhoz viszonyított, az 47. ábrában ismertetett vízfolyás-osztályozás általában az alábbi formában jelenik meg (jól fejlett, átfolyó rendszerű kráterek vízhálózata esetén):

- A kráter vízhálózatának konzekvens folyója a medencét lecsapoló vízfolyás lesz, amelyből az esetek túlnyomó többségében csak egy darab van, és amelynek kialakulásában a sáncon át történő hátravágódásnak kiemelkedő szerepe van.
- A legnagyobb reszekvens vízfolyásokat a kráterbe átréseléssel (hátravágódással) bejutó vízfolyások alkotják, melyek leggyakrabban a kráter lecsapoló kimenetével átellenes oldalon vannak és rendszerint több is előfordul belőlük.
- Kisebb reszekvens vízfolyásokat alkothatnak a kráter sáncának külső peremén futó, de oldalirányú kapturák mentén végül a medencébe jutó folyók is.
- Obszekvens folyók főleg a sánc külső részén fordulnak elő, és szintén oldalirányú kapturák révén jut vizük a kráter medencéjébe.
- A szubszekvens folyók pedig a fent említett három folyótípus (konzekvens, reszekvens, obszekvens) között teremtik meg a kapcsolatot.

A szabadon-; illetve a szekezetileg preformált vízhálózatok fejlődését mindezek mellett az éghajlat is befolyásolhatja.

Terepi megfigyelések alapján az 48. ábrán látható vízhálózati rajzolattípusok különíthetők el.



48. ábra. A lejtők és a szerkezetesség által meghatározott vízhálózati rajzolatípusok: a – dendrikus; b – párhuzamos; c – radiális; d – centrifugális; e – centripetális; f – elágazó; g – szögletes; h – lugas; i – gyűrűs; j – madártoll-szerű; k – kusza (a fekete foltok tavak).

A némely ábrán látható fekete keretes szürke négyzetek szimmetria-középpontokat jelölnek.

(Twidale, 2004, módosítva Bates, 1980; Szabó, 1998b; Gábris, 1987; Sebe et al., 2004; Lóczy és Veress, 2005 alapján)

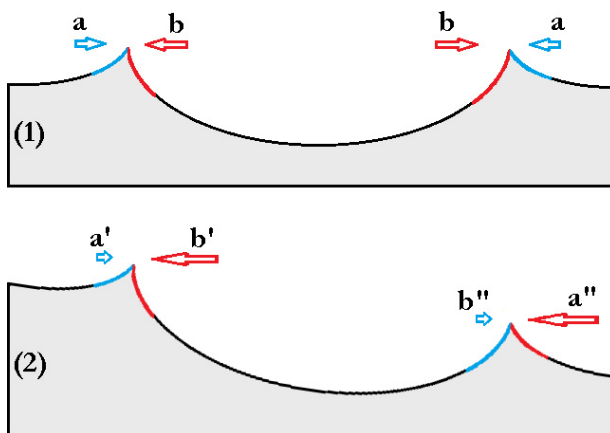
Azok a rajzolatok, amelyeken a szimmetria-középpont is be van jelölve (fekete keretes szürke négyzet), nagy eséllyel alakulhatnak ki a meteoritkráterek esetében is, mivel azok is középpontosan szimmetrikus alakzatok. Megjegyzendő azonban, hogy nem csak kizárólag ezek a rajzolatípusok alakulhatnak ki, vagy, hogy ezeknek a kialakulása törvényszerű lenne az impakt kráterek esetében. A mintázat nagyban függ attól is, hogy mekkora skálán vizsgáljuk azt. Megeshet pl., hogy a térképi méretarány növekedésével a kráter koncentrikus rajzolatú, *kötött fejlődésű* vízhálózati mintázataiban megjelennek a *szabad fejlődésű*, leggyakrabban faágas (*dendrikus*) mintázatok is. Ezek úgy értelmezhetőek, mint egy elsődleges vízhálózat (jelen esetben a koncentrikus) másodlagos, kisebb lejtők által meghatározott alhálózata, (itt épp dendrikus rajzollal). Ilyen

esetekben az jut kifejeződésre, hogy a magasabb rendű és nagyobb (jelen esetben koncentrikus) folyók rajzolják ki a meteoritkráter főbb szerkezeti jellemzőit, a kisebb folyók pedig inkább csak a lejtők által meghatározottak (esetünkben dendrikusak). Ez annak köszönhető, hogy egy adott területen általában az a folyó lesz a fő-folyó, amelyik valamilyen geológiaiilag preformált völgyben fut. Ennek két oka van: egyrészt ez a preformált völgy (pl. egy törés mentén) gyakran kisebb mechanikai ellenállású, mint a környezete, ezért itt a folyó gyorsabban tud bevágódni, ami által az erózióbázisa gyorsan kerül egyre mélyebbre, egyre több másodlagos folyót vonzva emiatt magához (ez egy pozitív visszacsatolási, öngerjesztő folyamat) (Twidale, 2004). A másik ok pedig az, hogy ez a preformált völgy állandóbb futásirányra készíti a benne futó folyót (pl. vető menti elmozdulás által kialakított perem; vagy egy szinklinális-vályú alja, stb.), ami miatt a vízfolyás hosszú időn át egy mederben fejlődik (Twidale, 2004). Habár a földi kráterek vízhálózati elemzésére eddig nem történtek átfogó kísérletek, a Marson található meteoritkráterek völgyhálózatainak összehasonlító vizsgálatára vannak példák (Kereszturi, 2012), melyek későbbi planetológiai összehasonlítások alapjául szolgálhatnak.

8.2. A meteoritkráterek vízhálózatának kialakulását leginkább befolyásoló folyamatok: a hátravágódó erózió és az ezt kísérő kapturás folyóeltérítések

A kráterek vízhálózatának kialakulásánál a geológiai szerkezet mellett alapvető fontosságú az, hogy egy vízfolyás hogyan tudja (vagy épp nem tudja) legyőzni a kráter egyik legmarkánsabb pozitív domborzati elemét, a sáncot. Ennek kulcsa azokban poszt-impakt völgyképződési mechanizmusokban keresendő, amely mechanizmusok érvényesek a nem becsapódásos eredetű pozitív domborzati formákra is. Mivel a sánc a becsapódás után szinte azonnal létrejön (geomorfológiai értelemben pillanatszerűen), ezért az antecedens völgyképződési mechanizmus nem jöhet számításba. Marad tehát az *epigenetikus*-, a becsapódás jellegzetes geológiai következményei miatt a *preformált*-, ill. mindenekelőtt a *regressziós* (hátravágódó) völgyképződés. Ez utóbbinak mozgatórugója a hátravágódó erózió, amelynél döntő jelentőségű az adott felszín lejtése, mivel a folyóvízi erózió mértéke mindenekelőtt a vízfolyás sebességétől függ (ami pedig elsődlegesen a lejtőszög függvénye). A kráter sáncának kiindulási lejtőviszonyait a kráternek és környezetének az utólagos megbillenése megváltoztathatja (aszimmetrikussá teheti), esetleg

megeshet az is, hogy egy eleve megbillent területre történő becsapódás miatt már alaptól aszimmetrikusan alakul ki a sánc. A mindezen sánc-aszimmetriákból eredő eróziós ráta (és völgy-regresszió) módosulásokat az 49. ábra szemlélteti.



49. ábra. A kráter sáncának átréselése (hátravágódó erózió) a megbillenés hatásával felerősítve. Kék nyilak: a sáncok enyhébb lejtése miatti gyengébb erózió erózió (kék sánc-szakaszok jelzik). Piros nyilak: a sáncok erősebb lejtése miatti intenzívebb erózió (piros sánc-szakaszok jelzik). A nyilak hossza az erózió viszonylagos mértékét érzékelteti az egyes sánc-oldalakon.

(1) – eróziós ráták vízszintes helyzetben. Ekkor a sánc egész kerülete mentén közel azonos az erózió mértéke ($b > a$, a kráter mindkét oldalán).

(2) – a megbillenés után módosult eróziós ráták ($a' < b'$, ill. $b'' < a''$).

A megbillenés után a példában szereplő kráter fő lejtésiránya balról jobbra tart (fő lefolyási irány); a hátravágódó erózió iránya pedig ezzel ellentétesen, jobbról balra (azaz a fő lejtésiránnyal ellentétesen) fog haladni a sáncon át (lásd még a 73. ábrát).

(saját szerkesztés; az ábra nem méretarányos)

8.3. Néhány földi meteoritkráter hidrogeográfiai jellemzése

Az alábbi fejezetben néhány meteoritkráter vízhálózati rajzolata kerül összevetésre a rendelkezésre álló geológiai és morfológiai adatokkal. A térképek és ábrák mindegyike északi tájolású, ellenkező esetben nyíl mutatja az északi irányt. A krátereket vízhálózati rajzolataik alapján két kategóriába soroltam: *átfolyó vízrendszerű kráterek*; valamint *nem-átfolyó vízrendszerű kráterek*.

Az első kategóriában (*átfolyó vízrendszer*) lévő krátereknek több közös jellemzőjük van:

- Mindegyikük átfolyó rendszert alkot, azaz létezik a kráter medencéjébe befolyó víztömeg, amit mindig több folyó szállít a kráterbe; ill. van lecsapoló folyó is (mindig egy darab).
- Gyakran éles kaptura-törések jellemzik a kráter szűkebb környezetének folyóit.
- Jól tipizálhatóak.
- A krátermedencét tápláló vízfolyások átréselési helye, ill. a lecsapoló folyó kilépési pontja leggyakrabban a sánc egymással szembe néző oldalain vannak.
- Morfológiailag viszonylag ép formák

A második kategóriában (*nem-átfolyó vízrendszer*) lévő kráterek vízhálózatának főbb jellemzői:

- Nem egyértelműen átfolyó rendszerek, emiatt a vízhálózati rajzolatuk sokszor nem hasonlít az átfolyó rendszerekére, de még így is mutathat középpontos szimmetriát.
- Nincs lecsapoló folyójuk.
- Kevésbé tipizálható a rajzolatuk.
- Sokszor idős és/vagy erősen erodált formák: a medence jobbra már feltöltődött vagy vízzel kitöltött, a sánc pedig lepusztult.

- Mindezek ellenére a kráter esetlegesen ép morfológiai egységein kialakulhatnak az átfolyó rendszerű kráterekre jellemző rajzolati elemek (pl. kapturák, ívelt folyószakaszok)

Az alábbi fejezetek erre a két kategóriára mutatnak be példákat.

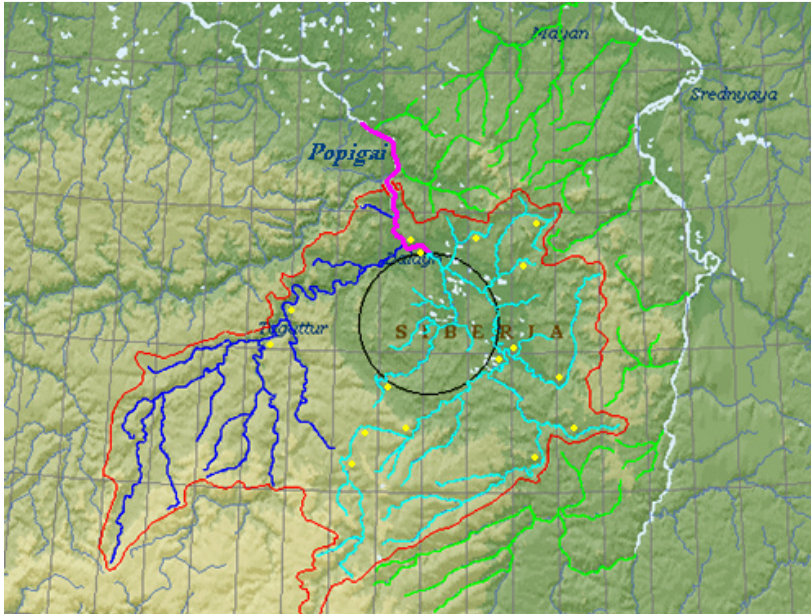
8.3.1. Átfolyó vízrendszerrel jellemezhető meteoritkráterek vízhálózati rajzolatai

8.3.1.1. Popigai meteoritkráter. Oroszország, Szibéria (Anabarmasszívum), kora: 35,7 millió év, átmérője: 90 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: archaikumi gneisz és pala, befedve az alsó-proterozoikumtól a krétáig terjedő sziliciklasztos és karbonátos üledékekkel (Masaitis, 2002).

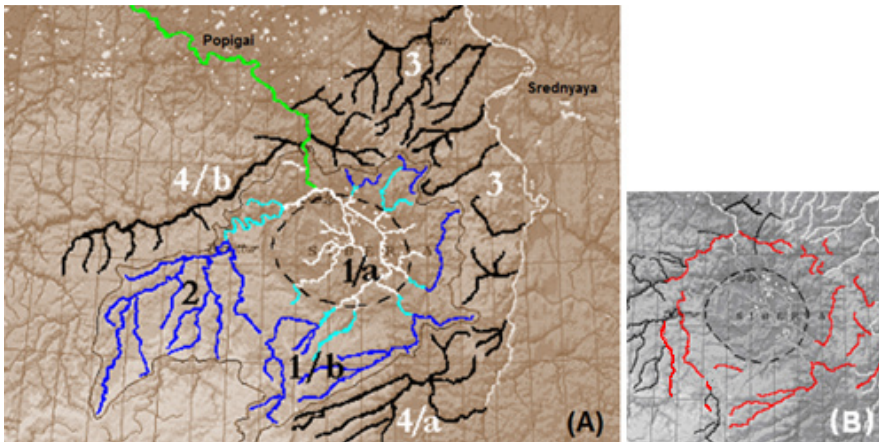
A Popigai kráter vízhálózatán jól látható a meteoritkráterek vízhálózat-rajzolati jellegzetességei közül néhány, a meteoritkrátereknél általánosan előforduló elem (50. ábra):

- a sáncok (ill. azok maradványainak) külső lejtőiről kifelé futó vízfolyások (zöld színnel, a kráter keleti- északkeleti részén)
- a sányszerkezet területén futó, gyakran élesen, derékszög-szerű könyökkel megtörő folyók (a könyökök sárga pontokkal jelölve), melyek közül sok törés valószínűleg kaptura (azaz a sáncon át történő hátravágódás) eredménye
- a kapturák általi folyó-eltérítések eredményeként nagy vízgyűjtő területről érkeznek vízfolyások a krátermedencébe
- a Popigai-on megfigyelhető a kráterek vízrajzának egyik legmarkánsabb jellemzője is: a vízgyűjtőről túlnyomórészt egynél több folyó érkezik be a krátermedencébe (a már említett kapturák segítségével), viszont csak egy folyó folyik kifelé belőle. Általában a medencébe lépő folyók a sánc egy adott szakaszán metszik át azt, és gyakran az e szakasszal átellenben lévő sánccszakaszon lép ki a lecsapoló vízfolyás, ami itt is megfigyelhető (erre jó példa még a kanadai Manicouagan meteoritkráter is, ld. az 52. ábrát).



50. ábra. A Popigai meteoritkráter vízhálózata (I.). A fekete vonal a krátermedence szélét jelöli. A világoskék folyószakaszok a krátermedencébe futó és ott egyesülő vízfolyásokat jelölik. A sötétkékek a krátermedence vízfolyásaival csak a medenceperem környékén egyesülő folyók. A krátermedence vizét a Popigai folyó vezeti el (ciklámen). Zölddel kiemelve a törmeléktakaró külső részeinek a vízfolyásai láthatóak. A sárga pontok kaptura-jellegű rajzolati töréseket jelölnek. A piros vonal a vízválasztó. A térkép területe: 280×132 km.
(saját szerkesztés)

Az 51. ábra (A) jelű térképe a kráter vízhálózatának valószínűsíthető kialakulási módját mutatja be: világoskékkel kiemelve láthatóak azok a folyószakaszok, amelyek a sáncon át hátravágódva magukhoz ragadták a sánc előterében, valamint az attól távolabb futó vizeket. A medencét lecsapoló Popigai folyó is hátravágódással tudott kilépni a medencéből. Az 51. (B) ábra pedig arra mutat be példát, hogy ha kizárólagosan csak a vízfolyások irányát, és az egyes folyószakaszok íveltségét vesszük figyelembe (a kráter középpontjához viszonyítva) és ez alapján emeljük ki a megfelelő szakaszokat, akkor egy olyan gyűrűs folyó-ív rajzolódik ki, amely utal a sánc vagy a sánctmaradvány helyzetére, ill. annak külső peremére, ami segíthet az átmérők pontosabb meghatározásában.



51. ábra (A, B). A Popigai meteoritkráter vízhálózata (II.).

(A): a Popigai meteoritkráter vízhálózatának hátravágódással létrejött szakaszai (világoskék) és az így a medencébe térített folyók (sötétkék). Fehér: a medence belsejének folyói. Fekete: a külső lejtésű sáncok folyói. Zöld: a lecsapoló folyó (Popigai). Szaggatott vonal: krátermedence. Az 51. (A) térkép folyóhálózatának jelmagyarázata: (1/a) – konvergens vízhálózat, a krátermedence belsejében. (1/b) – közel párhuzamos folyómintázat, amely hátráló erózió általi kapturával került összeköttetésbe medencebelső folyóival. (2) – félig-ágas rajzolat, amelyet szintén a sáncon át hátravágódó folyók térítették a medencébe. A kráter belsejének fehérrel jelölt vizeit a Popigai folyó vezeti le. (3) – a kráter keleti felének külső sánc-lejtői- és törmeléktagarója által befolyásolt lefolyás. Vízüket az ívelten futó Srednyaya folyó gyűjti össze. (4/a és 4/b) – a kráter DK-i és ÉNy-i, külső lejtői által terelt folyók. A (4/a) a Srednyaya-ba, a (4/b) pedig a Popigai-ba ömlik.

(B): a Popigai meteoritkráter folyóinak a kráter középpontjához viszonyított koncentrikus futásirány alapján kijelölt szakaszai (piros), melyek kiemelik a mára már lepusztult sáncszerkezet maradványait. Szaggatott vonal: a krátermedence.

Az (A) térkép területe: 280×132 km.

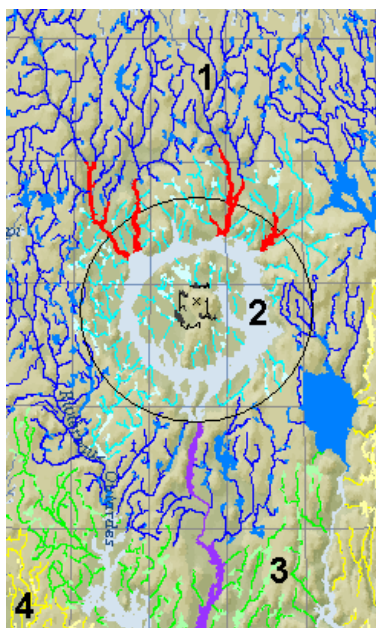
(saját szerkesztés)

A (B) térkép ugyanazon folyók bizonyos szakaszait ábrázolja, mint az (A) térkép, csak itt a kiemelt szakaszok nem vízgyűjtő, hanem a kráter középpontjához viszonyított koncentrikus folyásirány alapján lettek pirosra festve, kiemelve ez által a sánc peremét. Ez a mintázat tükrözi a kráter eredeti, kb. 90 km-es átmérőjét. A Popigai meteoritkráter jó példa a kratersánc átréselésével kialakuló kapturák- és a lecsapolás szemléltetésére.

8.3.1.2. Manicouagan meteoritkráter. Kanada, Quebec, kora: 214 millió év, átmérője: 85 km (adatok: Earth Impact Database, 2013).

A becsapódási céletterület felépítése: paleoproterozoikumi metagabbro és anortozit; helyenként paleozoikumi mészkővel fedve (Winslow, et al., 2004).

A Manicouagan kráter vízrajza (52. ábra) néhány jellegzetességében hasonló a Popigai kráterhez: itt is láthatóak a nagy hátravágódások (világoskék) és az általuk a medencébe terelt vizű folyók hálózata (sötétkék). Általánosságban elmondható, hogy ennek a földi viszonylatok közt nagynak számító, komplex szerkezetű meteoritkráternek a vízvezetési rajzolata is tükrözi a komplexitást.



52. ábra. A Manicouagan meteoritkráter vízvezetési hálózata. A fekete kör a kb. 85 km-es átmérőt jelöli. Jelmagyarázat: (1) – a krátert körülölelő külső folyóhálózat (sötétkék), amelyből soknak a vize a kráter medencéjében kialakult gyűrű alakú tóba (Lake Manicouagan) fut, a nagy hátravágódások által (piros) Rajzolatuk nagyrészt faágas szerkezetű vagy pedig kusza, ami általánosan elterjedt az ilyen poszt-glaciális területeken. Ennek következtében sokszor a vízválasztók lefutása is bizonytalan (juvenilis vízvezetési hálózat). (2) – a kráter központi vízvezetési egysége, a gyűrű alakú Manicouagan-tó, és a krátermedence külső, ill. belső részéből futó sugaras és kusza elrendeződésű folyók (világoskékkel). A központi sziget (René Levasseur-sziget) csúcsa körül (ez a kráter központi boltívének legmagasabb pontja, x-szel jelölve) a kis folyók koncentrikus rajzolatot alkotnak (fekete). A (3) és a (4) alegységek zöld és sárga folyói a kráter déli, ill. keleti előterében alkotnak szintén kusza rajzolatú hálózatot. Lila színnel a

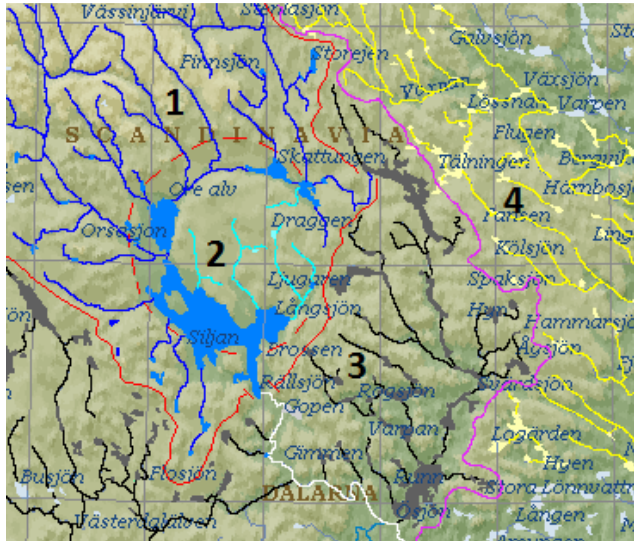
déli irányba tartó lecsapoló folyó (Manicouagan-folyó) figyelhető meg. Az egyes színekkel jelölt alegységek (1, 2, 3, 4) vízvásztókkal különülnek el, amely a fiatal (juvenilis) és emiatt még rendezetlen vízhálózat jellege miatt helyenként bizonytalan lefutású.

(a térkép területe: 280×190 km)
(saját szerkesztés)

8.3.1.3. Siljan meteoritkráter. Svédország, kora: 376,8 millió év, átmérője: 52 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: paleoproterozoikumi gránit (ún. Siljan-gránit); paleozoikumi üledékekkel fedve (Papasikas és Juhlin, 1997).

A Siljan kráter vízhálózati rajzolata is hordoz pár jellegzetességet. A területre nagyjából jellemző az északnyugat-délkeleti csapásirány, ezt a különböző, vízvásztóval elkülönülő folyó-alrendszerek is kirajzolják az 53. ábrán (az 1, 3 és 4, és részben a 2 alegységek). A piros szaggatott vonallal jelölt sáncot északnyugatról több folyó is áttöri hátravágódó erózióval (sötétkék), a krátermedence belsejében azonban észak-déli irányba fordulnak a folyók (világoskék). A kráter délkeleti előterében ismét felveszik a folyók az ÉNy-DK-i csapásirányt (fekete és sárga), a déli előtérben viszont továbbra is É-D-i irányban futnak (fekete). A fehérrel kiemelt folyó vezeti le a medence részlegesen gyűrűs kifejlődésű tavának (Siljan-tó) a vizét. A lila és a piros vonalak a vízvásztók.

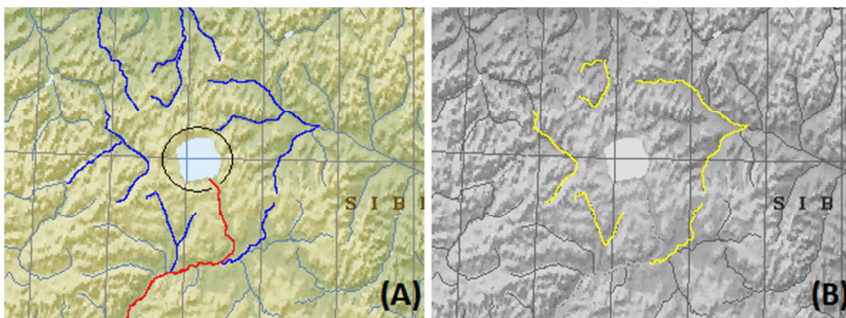


53. ábra. A Siljan meteoritkráter vízrajza. Piros szaggatott kör: a kráter sánca. Folyamatos piros és lila vonalak: vízvásztók. Jelmagyarázat: (1) – közelítőleg párhuzamos folyóhálózat a krátertől ÉNy-ra eső területen, ÉNy-DK-i csapással. Hátravágódások által jut viziük a medencébe, ahol ívelt (és preformált) folyószakasz gyűjti őket össze. (2) – párhuzamos lefutású, É-D-i csapású folyók a kráter belső területén. Lefutásuk a medence belsejének lejtésirányára utal. (3) – nagyrészt párhuzamos lefutású, ÉNy-DK-i csapású folyók. (4) – ugyancsak ÉNy-DK-i csapású, párhuzamos folyók, vízvásztóval különülnek el a (3)-tól. A Siljan kráter is jól példázza a sánc-átréseléseket és a nyomokban gyakran megjelenő kapturákat, valamint a külső sánclejtők szerepét a vízhalózat formálódásában (3). A kék, sárga, ill. fekete színnek az adott vízgyűjtőhöz tartozó folyórendszereket jelölik. Fehér: a lecsapoló folyó. (a térkép területe: 148×130 km) (saját szerkesztés)

8.3.1.4. El'gygytgyin meteoritkráter. Oroszország, Csukcsföld, kora: 3,5 millió év, átmérője: 18 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: kréta kori vulkanitok (Layer, 2000).

A viszonylag fiatal kelet-szibériai kráter jól megőrzött sáncszerkezettel rendelkezik, erre utal a folyók radiális és koncentrikus futásiránya is (kék színnel az 54 „A” térképen). A krátertavat a pirossal kiemelt Enmyvaam folyó csapolja le (54 „A” térkép). A „B” térképén sárgával kiemelve a kráter körüli koncentrikus rajzolatot adó (azaz a sánc külső peremére utaló) folyószakaszok láthatóak.



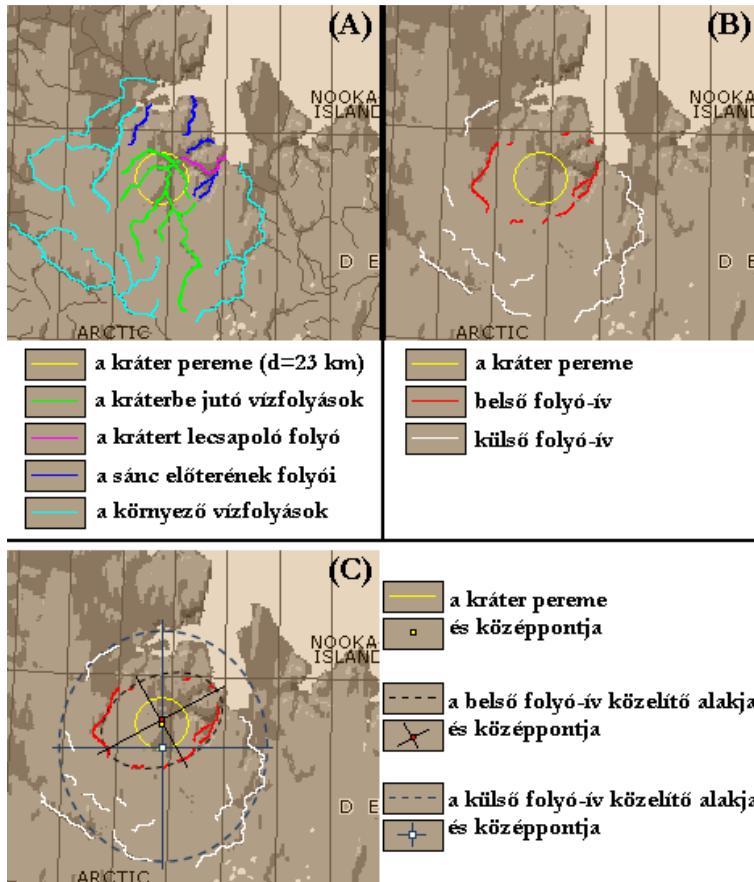
54. ábra (A, B). (A): az El'gygytgyin meteoritkráter vízhálózata, ahol a piros folyó a lecsapoló a kék színűek pedig sánc által befolyásoltak; a fekete kör pedig a kráter sáncvonala. (B): a sánc peremét kijelölő, koncentrikus rajzolatot adó folyószakaszok. (saját szerkesztés)

8.3.1.5. Houghton meteoritkráter. Kanada, Devon-sziget, kora: 39 millió év, átmérője: 23 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: kristályos prekambriumi aljzat; alsó-paleozoikumi karbonát-üledékekkel fedve (kb. 1750 m vastagságban) (Parnell, 2003).

A jelenleg ismert, legészakabbra elhelyezkedő meteoritkráter vízhálózata több szempontból is érdekes. Egyrészt mutatja a jellegzetes kráter-folyórajzolati elemeket (az 55. ábra „A” térképe), úgy, mint a sárga körrel jelölt sáncon át történő hátravágódás (zöld), a sánc északi előteréből radiálisan kifutó folyók (sötétkék), ill. a kráter tágabb környezetében koncentrikusan elrendeződő vízfolyások (világoskék). A kráter lecsapoló folyójának (ciklámen) a medencébe lépő folyókkal átellenes oldalon történő elhelyezkedése is hasonló az egyéb kráterekéhez. A világoskékekkel jelölt folyók a krátertől viszonylag távol futnak, és látszólag külön hálózatot alkotnak.

Ha azonban a folyóhálózatokat nem az előbbieken leírt alapon válogatjuk szét, hanem kizárólag a futásirány alapján (a kráter középpontjához viszonyítva), és az egyes (koncentrikus lefutású) elemeit kiemeljük, akkor érdekes módon két olyan gyűrű alakú folyó-ívet (egy belsőt és egy külsőt) kapunk, amelyek a krátert ölelik körül. (az 55. ábra „B” térképe). A belső ív valószínűleg a kráter sáncának maradványait rajzolja körbe. A külső ív viszont már nem köthető ilyen nagy valószínűséggel impakt eredetű, ugyanis ez idáig még a legcsekélyebb szerkezeti-morfológiai hatásokat sem sikerült ilyen nagy távolságra megfigyelni meteoritkráterek esetében (főleg nem egy ilyen relatíve kisméretű kráternél). A két ív-szerkezet geometriai elrendezéséről további információkat szolgáltat az 55. ábra „C” térképe. Mindkettő egy elliptikus rajzolatot ad, ha a darabkáit összekötjük. A belső-ív nagytengelye DNy-ÉK-i irányú, amely irány egyezik a kráter folyóinak futásirányával is. Ennek a belső ellipszisnek a középpontja továbbá majdnem egybeesik a kráter középpontjával. A külső-ív darabkáiból összeálló ellipszis nagytengelye É-D-i irányú, a középpontja pedig a kráter peremének déli részére esik (55. ábra „C” térképe).



55. ábra (A, B, C). A Haughton meteoritkráter vízhálózata és egyéb jellegzetességei.

(A) – a kráter vízhálózata.

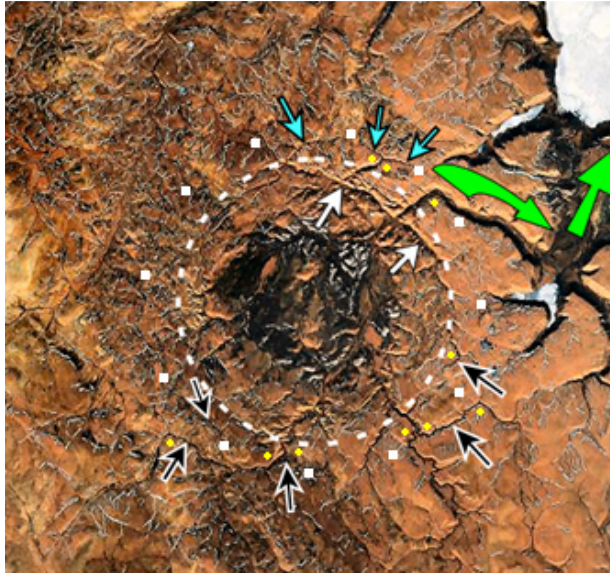
(B) – a kráter külső vízhálózatának ív jellegű, gyűrűs rajzolatú elemei (az „A” térkép folyóinak futásirány alapján kiemelt szakaszai - a kráter középpontjához viszonyítva).

(C) – a folyó-ívek geometriája.

Mindhárom térkép területe: 97×86 km.

(saját szerkesztés)

A 56. ábra a kráter morfológiájáról tájékoztat. Megfigyelhető a koncentrikus szerkezeti elemek nagy szerepe, ill. a völgy-elrendeződés, amely hasonlóságot mutat a Boltysch kráterével (57. ábra).

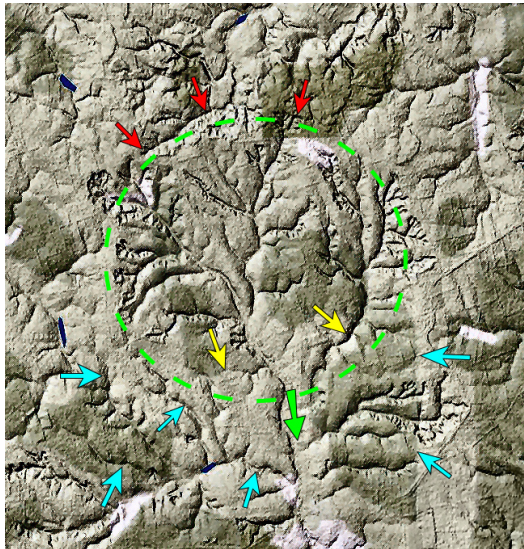


56. ábra. A Haughton meteoritkráter morfológiája és völgyhálózata úrfelvételen. A szaggatott kör a morfológiailag legmarkánsabb területet jelöli (ennek átmérője 3-4 km-rel kisebb, mint a teljes kráter – a teljes átmérőt a külső, négyzetekből álló ív mutatja). A fehér nyilak a medencebelső ÉK-i részének bevágódott völgyeit mutatják. A szürke, egyenes nyilak a kráter északi peremén lévő, ívelt völgyekre mutatnak. A fekete nyilak a déli perem néhány ívelt völgyszakaszát jelzik. A nagyméretű zöld nyilak a lefolyás irányát mutatják. A kis sárga pontok kaptura-jellegű töréseket jelölnek a völgyeknél.
(Google Maps, 2008, módosítva)

8.3.1.6. Boltys meteoritkráter. Ukrajna, kora: 65 millió év, átmérője: 24 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: proterozoikumi gránit és biotit-gneisz (McDonald, et al. 2009).

A 24 km átmérőjű Boltys meteoritkráter fő érdekessége (több más kráterrel együtt), hogy az eltemetett Ukrán-pajzsba mélyül, így kb. 400-500 méteres vastagságban fedik üledékek (amelyek magát a krátert is kitöltik). A 57. ábrán a zöld szaggatott kör a kráter kerületét jelzi. A sárga nyilak bevágódott, ívelt völgyeket jelölnek a levezető völgy közelében (a lefolyás a déli részen van – zöld nyíl). Kék nyilak: ívelt völgyek a déli előtérben (a kráteren kívül), amelyek a lecsapoló völgybe torkollanak (a kék nyilak ezen völgyek nagyobb csoportjaira mutatnak). Piros nyilak: az északi részekén húzódó, ívelt völgyszakaszok. Ez a kráter jó példája annak, hogy eltemetett krátereknek is lehetséges felszíni vetülete, melynek oka az eltérő mértékű üledék-kompakció (a krátermedencében nagyobb, mint a környékén) Hasonló völgyelrendeződés figyelhető meg a kanadai Houghton meteoritkráternél is, habár az nem eltemetett forma (56. ábra.).



57. ábra. A Boltys eltemetett meteoritkráter felszíni domborzata és völgyhálózata.

Zöld, szaggatott körvonal: a kráter felszíni vetületének pereme. Piros nyilak: ívelt völgyszakaszok a kráter északi előtérében. Sárga nyilak: ívelt völgyek a kráter lefolyási pontjának környékén. Kék nyilak: ívelt völgyek a kráter déli előtérében. Zöld nyíl: a kráter lecsapoló völgye.

(Google Maps, 2008, módosítva)

8.3.1.7. Mistasin meteoritkráter. Kanada, Labrador, kora: 36,4 millió év, átmérője: 28 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: prekambriumi gránitok és anortozitok (Currie, 1968).



58. ábra. A Mistasin meteoritkráter vízrajza. Jelmagyarázat: (1) – a medencebelső konvergens folyói, amelyek a Mistasin-tóba ömlenek. A tó közepén egy patkó alakú sziget (Horseshoe island) található. A Mistasin-tó északkelet felé tartó lecsapoló folyója a kráterből kiérve egy preformált, egyenes völgyben folytatja útját, immár kelet felé. (2) – a nyugati és a déli sáncról kifelé tartó folyók, kusza, vagy enyhén radiális rajzolattal. A sáncot nem törik át sehol. (3/a, b) – az északi és a keleti előtér párhuzamos folyói, amelyek szintén nem törik át a sánc maradványait
(a térkép területe: 170×125 km)
(saját szerkesztés)

8.3.1.8. Nördlingen-Ries meteoritkráter. Németország, Bajorország, kora: 15,1 millió év, átmérője: 24 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: Hercyniai kristályos aljzat, rátelepült mezozoikumi üledékekkel (Osinski, 2004).

A 59. ábrán jól látható, hogy a mintázat megközelítőleg tükörszimmetrikus, ahol a szimmetriatengely a kráter középső területén áthaladó ÉÉNy-DDK-i vonallal adható meg, mely egyben a lefolyás iránya is, amely a Duna felé tart. A világoskék folyók a kráter medencéjével összeköttetésben állnak, ezeknél több nagy hátravágódás és kaptura is megfigyelhető. A zöld színnel kiemelt folyó vezet le a medence vizét. A fekete folyók a krátertől délre és keletre eső területek törmeléktakaró-maradványai által meghatározott lefutásúak és kirajzolják a törmeléktakaró maradványait. A pontozott körök a sánc belső és külső határait jelölik. A poszt-impakt tavi üledékekkel kitöltött kráter geológiai szerkezetét a 18. ábra mutatja be.

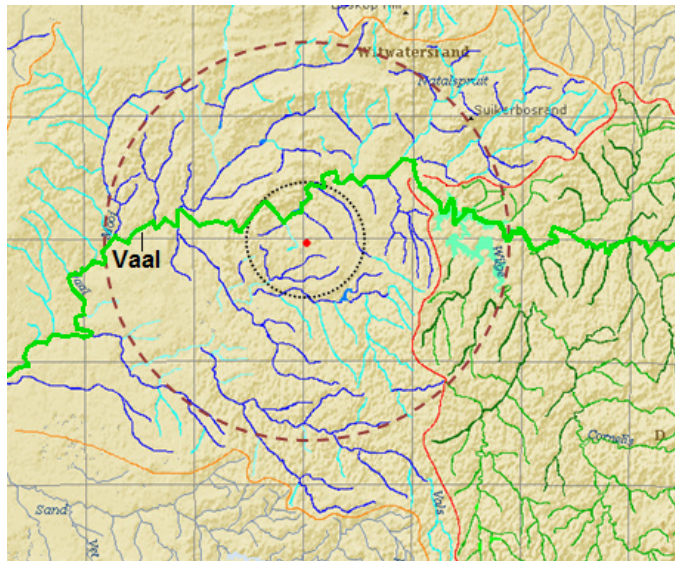


59. ábra. A Nördlingen-Ries meteoritkráter folyóhálózata. Jelmagyarázat: világoskék – a medencébe hátravágódás és kapturák által bejutó, és ott tükörszimmetrikus mintázatot kialakító folyók. Zöld: a medence lecsapoló folyója. Sötétkék: a kifelé lejtő sánc-lejtők vízhálózata.

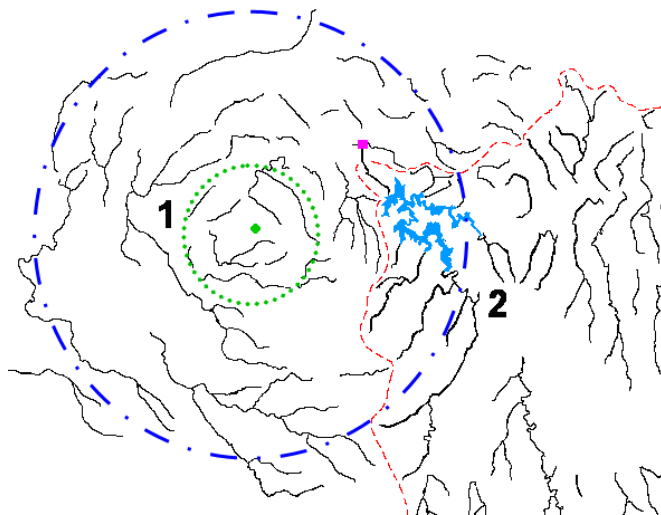
(Earth Impact Database, 2008, módosítva)

8.3.1.9. Vredefort impakt szerkezet. Dél-Afrikai Köztársaság, kora: kb. 2024 millió év, átmérője: 160 km (adatok: Earth Impact Database, 2013). A becsapódási célterület felépítése: proterozoikumi kristályos és üledékes kőzetek (Gibson és Oglivie, 2008).

A Vredefort-szerkezet érdekessége, hogy a jelenleg ismert legnagyobb, és egyben a második legidősebb meteoritkráter a Földön. A szerkezete ennek megfelelően erősen lepusztult, a nagy méretből adódó koncentrikus szerkezet a mai napig nyomozható a kráter morfológiájában és a vízrajzában is (60. és 61. ábrák). A vízrajz koncentrikus rajzolata a középponttól kb. 100 km-es sugárban figyelhető meg, amely távolság egyben az impakt eredetű aranyfeldúsulások elterjedésének határa is (ld. még a 63. ábrát). A krátert a Vaal folyó kelet-nyugati irányban szeli át (60. ábra), amelynek kvázi-szimmetrikus cikk-cakkos mintázata a becsapódási szerkezet koncentrikus és radiális vetőrendszerére utal (62. ábra). Ez azért fontos, mert arra hívja fel a figyelmet, hogy nem csak az összetett folyóhálózatok, hanem akár egyetlen folyó medermintázata is utalhat a becsapódási eredetre.

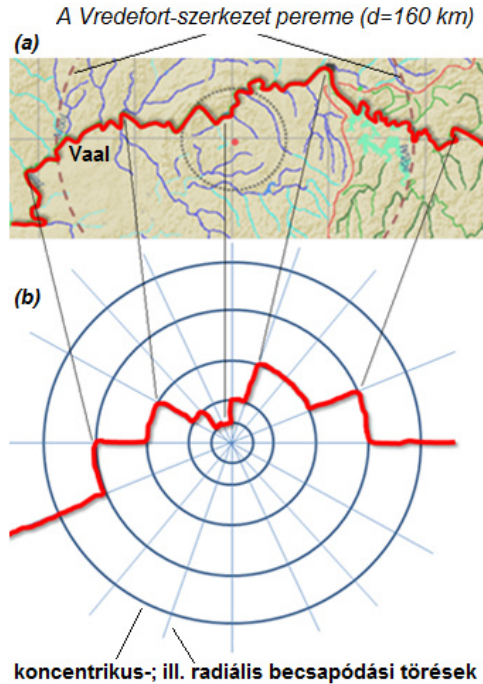


60. ábra. A Vredefort meteoritkráter vízhálózata. Szaggatott vonal: a kráter pereme ($d=160$ km). Pontozott vonal: az ún. Vredefort-dóm (ami egy belső gyűrűív), a kráter belsejében. Piros pont: a kráter középpontja. Sötétkék: koncentrikus rajzolatú szakaszok (a kráter peremén belül). Világoskék: radiális rajzolatú szakaszok (a kráter peremén belül). Zöld: a Vaal és a Wilge folyók és mellékfolyóik vízhálózata. Zöld vastag vonallal a Vaal folyó kelet-nyugati irányú folyása van kiemelve. Piros és narancssárga vonalak: vízválasztók. (saját szerkesztés)



61. ábra. A Vredefort impakt szerkezet vízhálózatának koncentrikus, ívelt folyószakaszai (sugárirányú összetevők is léteznek, de azok nem szerepelnek ezen az ábrán). Kék kör: a kráter vízhálózati értelemben vett pereme (d=200 km). Zöld: a Vredefort-dóm. Piros szaggatott vonal: vízválasztó (Mihályi K. 2008; a térkép területe 310×220 km)

A 61. ábrán a pontozott-szaggatott kék kör azt, a kb. 100 km-es sugarú kört jelöli, amelyen belül leginkább jellemző a koncentrikus rajzolat. A szaggatott vonal a Vaal és a Wilge folyók közös vízgyűjtőjét határolja. A pontozott belső kör a szerkezet azon központi részét határolja, amelyen belül a morfológia még eléggé jellegzetes (ez a terület az ún. Vredefort-dóm). A 63. és 64. ábrák a kráter geológiai szerkezete, a vízhálózati rajzolat kiterjedése, valamint a becsapódási vetőkhöz és breccsákhoz kötődő arany-felhalmozódás kapcsolatát mutatják be.

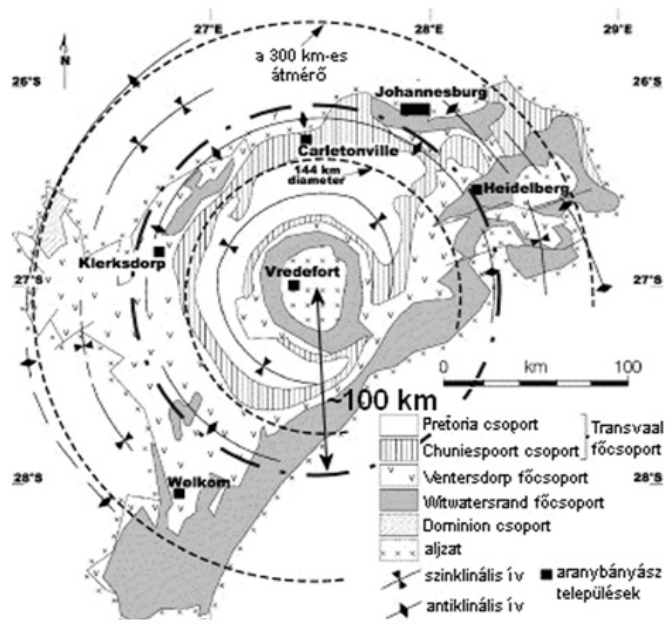


62. ábra (a, b). Példa a szerkezeti elemek által reformált folyószakaszok szerepére, a Vredefort-szerkezeten. A Vredefort térképe (a) jól szemlélteti, hogy akár egyetlen folyó futásiránya is kirajzolhatja a kráter szerkezetét (a pirossal kiemelt Vaal folyó). Az alsó (b) ábra a cikk-cakk mintázatú folyó kialakulásának szerkezeti modelljét mutatja be az impakt eredetű törérendszerek mentén. A Vaal folyó és a modell egymásnak megfelelő tethető főbb vonásait (a szerkezetből adódó, jellegzetesen preformált folyórajzolat-töréseket) a fekete vonalak kötik össze.
(saját szerkesztés)



63. ábra. A Vredefort impakt szerkezet ürfelvételen. A „V” betű a fehér kör közepén a Vredefort-dómot jelöli. A sárga nyilak a szerkezet központja körül nagyjából koncentrikusan elhelyezkedő aranybánya-sebhelyek kisebb-nagyobb csoportjaira

mutatnak (kis fehér foltok), egy kb. 100 km átmérőjű félkörívet kirajzolva. Az arany a becsapódásos eredetű Witwatersrand-breccsákban dúsult fel (ld. a 64. ábrát), poszt-impakt hidrotermális tevékenység eredményeként.
(Earth Impact Database, 2008, módosítva)



64. ábra. A Vredefort-szerkezet geológiai felépítése. A pontozott-szaggatott kör itt is a vízhálózatnál említett kb. 100 km-es sugart jelöli (ld. 61. ábra). Érdekessége, hogy ez a körív a szerkezet nagy részén egybeesik egy antiklinális ívnek a lefutásával.
(Reimold és Gibson, 2006, módosítva)

8.3.2. Nem-átfolyó vízrendszerrel jellemezhető meteoritkráterek vízhálózati rajzolatai

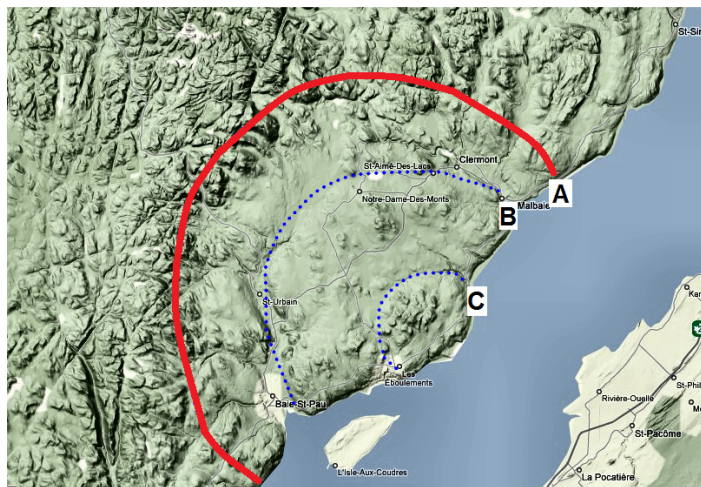
8.3.2.1. Charlevoix meteoritkráter. Kanada, Quebec, kora: 342 mill. év, átmérője: 54 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: neoproterozoikumi gránit és gneisz; migmatitok, anortozit; rájuk települt középső-ordoviciumi mész- és homokkövekkel (Buchner, et al., 2010).



65. ábra. A Charlevoix meteoritkráter vízhálózata. A szaggatott kör a kráter pereme (d=54 km), amelynek fehér része a kráter Szent-Lőrinc öböl alá erülő részét jelöli. Fehérrel a medencébe bejutó folyók vannak kiemelve (1/b); feketével pedig a sánc előterének folyói (2/b).
(a térkép területe 150×125 km)
(saját szerkesztés)

A 65. ábrán a szaggatott kör a kráter kerülete, amelynek fehér fele a kráter Szt. Lőrinc-folyó alá merülő és ezért morfológiailag nehezen jellemezhető felét mutatja. (1/a, 1/b) – ívelt folyószakaszok a kráterfal és a belső medence találkozásánál, ahol az 1/a-t és az 1/b-t egy völgyközi hát választja el. Ezek a folyószakaszok a kráterfalról és a sánctól a kráter belsejébe tartó vízfolyásokat gyűjtik össze, amelyek közül néhány hátravágódott és jelentős kapturával igen hosszú folyószakaszokat térített a kráter belsejébe (pl. az 1/b déli-délnyugati irányba visszahajló folytatása a kráteren kívül). (2/a, 2/b) – a sánctmaradvány külső felének folyói. A kis fehér pont a kráter közepén a központi csúcsot jelzi.

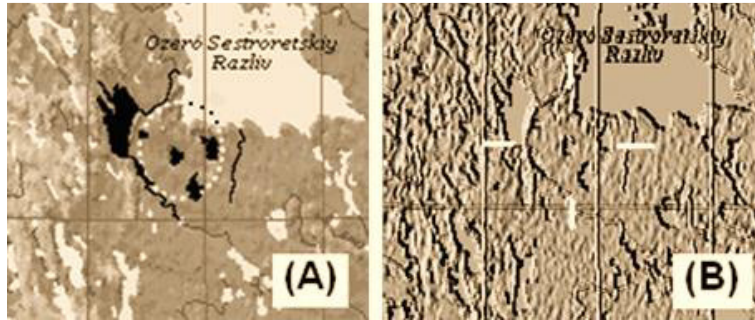


66. ábra. A Charlevoix meteoritkráter morfológiája. A – a kráter sánca ($d=54$ km); B és C – koncentrikus tengelyű medencék.
(Google Maps, 2008, módosítva)

A 66. ábra a Charlevoix kráter morfológiáját mutatja be, és példaként szolgál a kráteren belüli koncentrikusan ívelt medencékre, amelyek a krátermedence vízhálózatára is hatással vannak (ld. még a 65. ábrát). Megfigyelhető továbbá a krátermedencének a környezetéhez viszonyítva kiegyenlített domborzata is.

8.3.2.2. Suavjärvi meteoritkráter. Oroszország, Karélia, kora: kb. 2400 millió év, átmérője: 16 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése (a jelenleg a felszínen található minták alapján): töredezett és gránitosodott archaikumi gneisz, kora-proterozoikumi gránit-intrúziókkal (Naumov, 2010).



67. ábra (A, B). A Suavjärvi meteoritkráter vízrajza (A) és domborzata (B).
(a térképek területe: 80×70 km)
(saját szerkesztés)

Ez a kisméretű, erősen erodált meteoritkráter azért említésre méltó, mert 2,4 milliárd éves kora ellenére (a legidősebb, ismert földi meteoritkráter) még mindig megfigyelhetőek a vízrajzi és morfológiai vonatkozásai, ívelt folyószakaszok és tópartok, valamint enyhe peremek formájában. A 67 (A) ábrán a kráterperem miatt ívelt lefutású folyók és ívelt tópartok láthatóak feketével kiemelve; a 67 (B) ábra domborzati képén pedig a még mindig kimutatható kráterperem figyelhető meg (a fehér szálkeresztben).

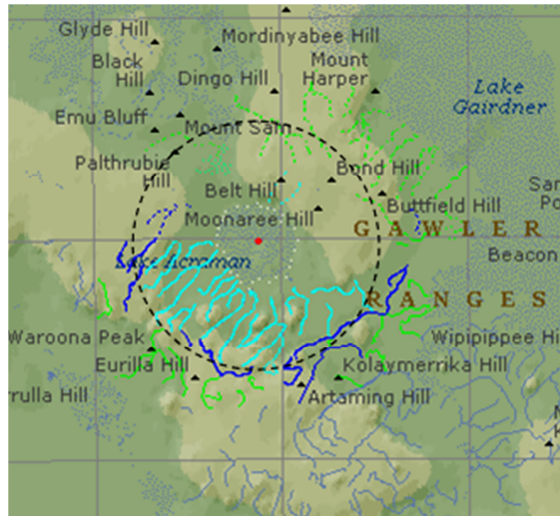
8.3.2.3. Acraman meteoritkráter. Ausztrália (Dél-Ausztrália, Gawler-ösföld), kora: kb. 590 millió év, átmérője: 90 km (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási céletterület felépítése: mezoproterozoikumai savanyú vulkanitok és megszilárdult piroklasztikus lávaárak (Hawke, 2003).



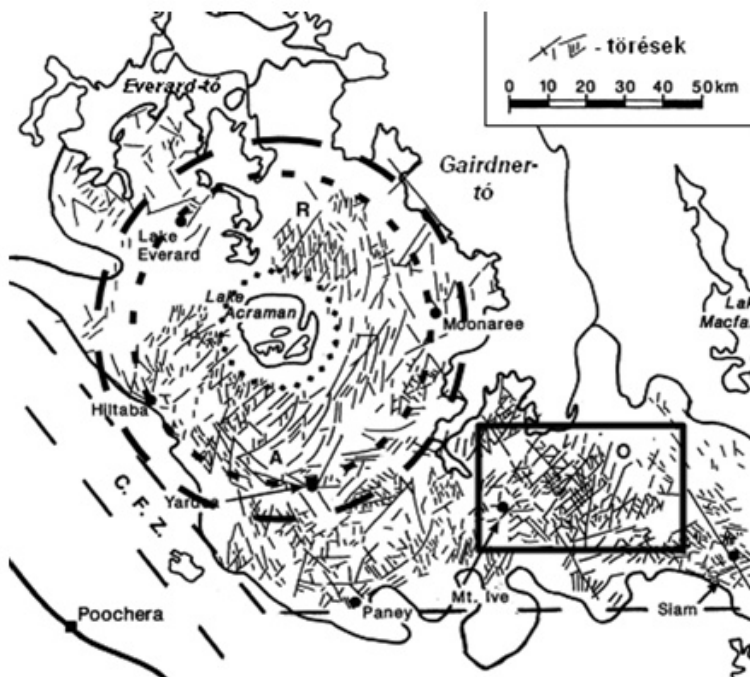
68. ábra. Az Acraman meteoritkráter morfológiája. Fekete szaggatott kör: a kráter pereme ($d=90\text{km}$). Pontozott belső körvonal: a medence belseje az Acraman-tóval. Fekete négyzet: a kráter belsejéhez hasonlóan ÉK-DNy-i pásztázottságú terület a kráteren kívül.

(Google Maps alapján, módosítva)



69. ábra. Az Acraman meteoritkráter vízrajza és morfológiája. Fekete szaggatott kör: a kráter sáncának gerincvonalára a vízrajz alapján. Kék: a medence belsejének vízfolyásai. Zöld: a sánc külső lejtőinek folyói és időszakos vízfolyásai (zöld szaggatott). Piros pont: a kráter középpontja az Acraman-tóban.
(saját szerkesztés)

A 68. ábrán a fekete szaggatott kör a 90 km-es átmérőt jelöli, a belső pontozott kör a kráter közepén lévő tó (Lake Acraman) körül húzódó, jelentős morfológiai elemektől mentes övezetet határolja. A két körvonal között, a kráter ÉK-i és DNY-i, valamint kisebb részben a DK-i részein megfigyelhető egy jellegzetes, ÉK-DNY-i csapású, párhuzamos pásztákból álló formarendszer. Ez szokatlan egy olyan forma esetében, ahol egyébként a középpontosan szimmetrikus, koncentrikus (esetleg radiális) szerkezetesség a jellemző. Ez alapján felmerülhet a lehetőség, hogy (a): ez a terület eredeti (becsapódás előtti) szerkezetességét tükrözi, (b): vagy a becsapódás alakította ki, (c): utólagosan (a becsapódás után) alakult ki. Az utólagos kialakulás mellett szól az, hogy a krátertől DK-re (a kráteren kívül) is megfigyelhető hasonló csapásirányú mintázat (fekete keretben). Feltűnő azonban az is, hogy a párhuzamos sávozottság kráteren belüli elterjedésének határa egybeesik a kráter határaival. Ez azt sugallja, hogy a kráterhez kötődő geológiai és természetföldrajzi viszonyok kedveztek a pászták kialakulásának. A 69. ábra a kráter morfológiájának és vízrajzáinak a kapcsolatát mutatja be.



70. ábra. Az Acraman meteoritkráter geológiai szerkezetessége.
(Twidale, 2004, módosítva)

A 70. ábrán a külső szaggatott kör a kráter 90 km-es átmérőjét jelöli; a belső szaggatott kör azt a kb. 75-80 km átmérőjű belső körívet határolja, ahol a legtöbb törés figyelhető meg. Ennek a vonalnak a valós határszerepe az ÉK-i, ill. a DNy-i részekben figyelhető meg a legjobban. A fekete keret a krátertől DK-re a 68. és 71. ábrák azonos területét mutatja.



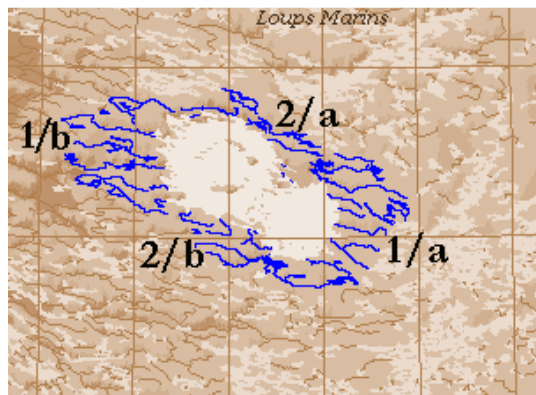
71. ábra. Az Acraman meteoritkráter és a tőle DK-re fekvő területek vízhálózata.
(saját szerkesztés)

A 71. ábrán a legbelső pontozott kör az Acraman-tó körüli sima területet határolja. A középső, szaggatott kör egy belső vízválasztó (nem azonos a 70. ábra közbülső, szaggatott körével, ui. ennek csak kb. 65 km az átmérője). Abban azonban közösek, hogy a határvonal szerepe ennek a körvonalnak is az ÉK-i, ill. a DNy-i részeken jelentős: az ÉK-i részen ettől kifelé jelenik meg egy radiálisan kifutó vízhálózat (4). A DNy-i részen pedig a belső részek morfológiához illeszkedő, ÉK-DNy-i csapású, párhuzamos lefutású folyóit (2) és az ettől kifelé eső részek kusza rajzolatú folyóit (3) választja el. Mindenképp említésre méltó, hogy a kráter két átellenes részére eső területének (az ÉK-inak és a DNy-inak) a vízválasztója a kráter középpontja köré rajzolt körvonallal adható meg. Helyzetéből adódóan ez valószínűleg kapcsolatba hozható a meteoritkráterekre általában jellemző koncentrikus szerkezettel, még akkor is, ha a jelenkori felszíni morfológiára az ÉK-DNy-i csapások a jellemzőek. A szürke keret a krátertől DK-re, a 68., ill. a 70. ábrák bekeretezett részeivel azonos terület vízhálózatát mutatja (párhuzamos rajzolat). Ez is tovább erősíti azt a feltevést, amely szerint ez a jellegzetes pásztázottság a becsapódás után alakult ki, és a becsapódástól független folyamat eredménye, amely a kráteren kívüli területeken is előfordul, de amelynek kialakulásához a kráter területe is kedvező feltételeket

teremtett. Ez a formarendszer azután erősen befolyásolta a vízhálózati rajzolat fejlődését is.

8.3.2.4. Clearwater West és East meteoritkráterek. Kanada, Quebec, koruk: 290 mill. év (mindkettőé azonos, ui. szimultán becsapódás alakította ki őket), átmérőik: 36 km (West) és 26 km (East) (adatok: Earth Impact Database, 2012).

A becsapódási célterület felépítése: erősen metamorfizált archaikumi gneisz alapkőzet mindkét kráter esetében (Superior-szerkezet) (Scott, et al., 1995).

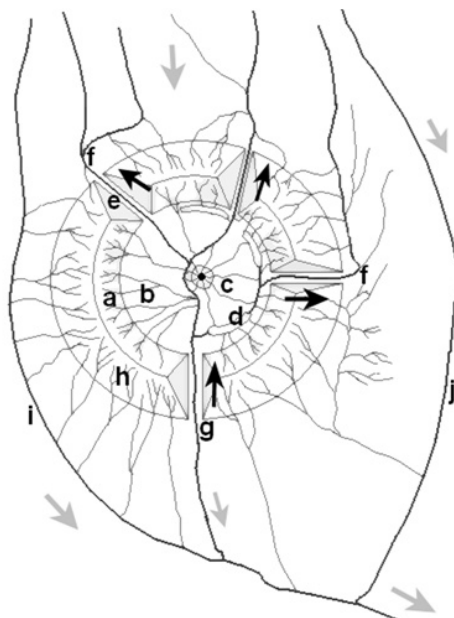


72. ábra. A Clearwater West és East meteoritkráterek vízhálózati mintázata. (1/a, 1/b) – a kettőskráter ÉNy-i és DK-i sánc-maradványain lévő, párhuzamos folyók. (2/a, 2/b) – az ÉK-i és a DNy-i részek sánc-maradványainak párhuzamos folyói.
(a térkép területe: 150×130 km)
(saját szerkesztés)

A Clearwater kráterek sánc-maradványainak folyóhálózata nem mutat különösebb jellegzetességet, jól illeszkedik a környezete ÉNy-DK-i csapású vízhálózatához (72. ábra). Ez arra utal, hogy az erős jég általi letarolás (az ikerkráter poszt-glaciális területen fekszik) esetenként teljesen el tudja tüntetni a sánc-szerkezetet. A két krátertő azonban igen jellegzetes: a Clearwater West tavában (a nagyobb átmérőjű, nyugati tó) egy belső gyűrűív található, amely kisebb szigetekre bomlik, hasonlóan a két tavat elválasztó, kb. 5 km széles szigetsávhoz.

8.4. A meteoritkráterek lehetséges vízhálózati rajzolatípusai

A fentiekben bemutatott, 13 darab földi meteoritkráter vízhálózatának vizsgálata, valamint a hozzájuk kapcsolódó térképek arra utalnak, hogy a krátereknek lényeges, vízhálózatot módosító hatásuk van (Mihályi, 2008; Mihályi et al., 2008; Mihályi et al., 2010). Ez a hatás leginkább a kráterek morfológiájának sajátosságaiból ered, de a becsapódásokhoz kapcsolódó mélyszerkezeti és ásvány-kőzettani elváltozások is hozzájárulnak ehhez. A kialakuló medence jellegzetessége, hogy mindig valamekkora, a becsapódáskor kidobott, majd visszahulló anyagból kialakuló sánc veszi körbe, ami gyakran igen ellenálló, ugyanis a becsapódási hőtől összesül az anyaga. A sánc miatt lesz jellegzetes a kráterek vízhálózata: ahol ugyanis, ahol ez a forma akár csak minimális mértékben is, de még megvan még, kényszerítő erőt fejt ki az útjába kerülő folyókra, ezért azok íves völgy-rajzolattal meg fogják azt kerülni (ez az első fázisa a kráter-vízhálózat kialakulásának). Ezzel együtt azonban megkezdődhet a kráter sáncának az átréselése, a sáncon lefutó folyók által.



73. ábra. A meteoritkráterek lehetséges vízhálózati rajzolatípusai. Az ábra idealizált, ezért olyan rajzolatokat is tartalmaz, amelyek a természetben ritkán fordulnak együtt elő. A szürke nyilak a lefolyás irányát jelzik, a fekete nyilak pedig a peremeken át történő folyó-hátravágódások irányát. Jelmagyarázat: a – dendrikus; b, c – centripetális és

radiális; d – ívelt-koncentrikus; e – átréselő szakasz; f – kapturás folyóeltérítés; g – a lecsapoló folyó átréselése; h – dendrikus; i, j – ívelt (a törmeléktakaró külső pereme által meghatározottan).
(saját szerkesztés)

A 73. ábra tartalmazza azokat a vízhálózati rajzolatok jellegzetességeit, amelyeket az előzőekben vizsgált kráterek hidrogeográfiai vizsgálatából összefoglalóan levonhattunk. Az ábra részletesebb magyarázata: **(a)**: a kráter sáncának és falának befelé néző lejtőin kialakuló, gyakran faágas (dendrikus) mintázat, amelyet leginkább a lejtők befolyásolnak. **(b)**: konvergens folyók, amelyek akkor jönnek létre, ha a medence a kráter középpontja felé lejt folyamatosan (ez leggyakrabban az *egyszerű krátereknél* fordul elő, ui. ott nincs központi csúcs vagy gyűrűív). **(c)**: radiális vízfolyások, amelyek a központi csúcstól futnak a perem felé (jellegéből adódóan ez a mintázat a *komplex krátereknél* a leggyakoribb). A *(b)* és a *(c)* a természetben ritkán fordul elő együttesen. **(d)**: radiálisan kifutó folyók a medenceperem és a kráterfal találkozásánál (amely egy ívelt völgytalpat alkot) szükségszerűen felveszik annak irányát, ívelt lefutású belső folyókat, bizonyos esetekben gyűrű-alakú tavakat, tószakaszokat alakítva ki ez által. **(e)**: a perem (sánc) átvágása által a kráter korábban zárt, belső vízhálózata kapcsolatba lép a tágabb környezet vízhálózatával. **(f)**: A hátravágódó folyók (gyakran hirtelen és élesen megtörő folyásiránnyal jellemezhető kapturák által) a krátermedencét előzőleg (a kaptura bekövetkezése előtt) elkerülő folyók vizét vezetik a krátermedencébe. A *hátravágódás* és az ennek következtében kialakuló *kapturák* azok a folyamatok, amelyek a kráternek és környezetének a vízhálózatát a legerősebben tudják befolyásolni. Gyakorlatilag ez által válik (válhat) a kráter átfolyó vízhálózatává; ill. egy, a kráter földrajzi kiterjedésénél jóval nagyobb terület vízrajzi és vízgyűjtő központjává. Az ilyen kráter vízgyűjtő szerepe a kapturás folyóeltérítések kialakulása előtt csak a saját krátermedencéjére vonatkozott. **(g)**: a kráter kívülről induló regresszió révén keletkező *lefolyása* (lecsapoló folyója). Ilyen rendszerint csak egy van (ellentétben a folyókat a kráterbe *térítő*, a *kráter belsejéből induló* hátravágódásokkal, amelyek azután már a kráteren kívülről eredve táplálják a krátermedence vízhálózatát). A lecsapoló folyó vízgyűjtőterülete a kráter belsejében egyre nagyobb területekre terjedhet ki, és szaporodó belső regressziók útján akár az egész kráterbelső vízhálózatát magához vonhatja („belső lecsapolás”). A hátravágódás egy vagy több ága azonban a kifolyással nagyjából átellenben lévő kráterfalat is átréselheti, és a lecsapoló folyó így tovább terebélyesedő

vízgyűjtőterülete a kráter környezetének vízhálózati rajzolatát is megváltoztathatja („átfolyásos lecsapolás”). **(h)**: a sánc külső lejtőin (a belsőkhöz hasonlóan) a lejtők által befolyásolt, faágas (dendrikus) mintázat alakul ki leggyakrabban. **(i)**: a külső sánctól kifutó vizeket gyakran egy ívelt folyó gyűjti össze, amely íveltségnek két oka is lehet: 1 – a törmeléktakaró pereme határozza meg azt, hogy a kráterhez milyen közeli íven tud folyni a folyó. 2 – a kráter szűkebb környezetében lévő, impakt eredetű koncentrikus törések által preformált völgyek jelölik ki a folyásirányt. Minél közelebb van egy ívelt folyó a kráterhez, annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy egy becsapódás okozta törés mentén fut. A sánctól kifelé futó vízfolyások *együttese* a felső részek (alacsonyabb folyórendek) dendrikus jellege ellenére egészében véve radiális, vagy (mérettől függően) párhuzamos mintázatot alkot. **(j)**: ívelt folyók a krátertől távolabb is megjelenhetnek, a krátertől vízrajzilag viszonylag függetlenül is. Ilyenkor az a valószínűbb, hogy a törmeléktakaró külső pereme határozza meg ívelt futásukat (Mihályi, 2008).

9. Összefoglalás / Summary

A disszertációm végén esedékes összefoglalásban szeretném a fő fejezetek jelen ismereteink szerinti összefüggéseit rendszerbe foglalni.

Tudománytörténeti szempontból elmondható, hogy viszonylag hosszú idő telt el, amíg a meteorit-becsapódások formaképző hatását felismerték az emberek, noha magukat a meteoritokat, és azok égi eredetét már évezredek óta ismerték, csakúgy, mint ahogyan magának a légkörbe lépésnek a folyamatát is megtapasztalta már a korai ember is, mitológiai-vallási magyarázatokat adva rá. Az ezen folyamatokra irányuló, több ezer éves ismeretek ellenére maguknak a becsapódási formáknak a léte csak a 19. század végére kezdett elfogadottá válni a tudomány számára. Annak felismerésére pedig, hogy a Naprendszer szilárd felszínű égitest-felszíneinek és morfológiájának az egyik legalapvetőbb formáló tényezői a becsapódások és az ezeket kísérő kráterképződések, a 20. század közepéig kellett várni.

A nemzetközi szakirodalom is a 19. századtól kezdte komolyabban venni a meteorit-becsapódások lehetséges formaképző hatásait, de az igazán nagy lökést a témakörnek az űrkutatás fellendülése adta meg a 20. század közepétől kezdve, és habár a környező közetbolgók és holdjaik krátereit sok tanulmány tárgyát képezték, a földi kráterek vizsgálata

háttérbe szorult, aminek oka a bolygónk geológiai, éghajlati (és kisebb részben ökológiai) aktivitásával összefüggő kráteresegénysége. Magyarországon az 1960-as évektől kezdődően indult meg a becsapódási kráterek mai értelemben vett, tudományos szemléletű megközelítése. A témával kapcsolatos kutatások azóta is folytatódnak, úgy a nemzetközi, mint a hazai tudományos életben, amely kutatások legjelentősebb részét a különféle anyagvizsgálati és geológiai-geofizikai vizsgálatok teszik ki. Mindezen megközelítési módok mellett a természetföldrajzi szemléletű megközelítés jobbra háttérbe szorul. Doktori dolgozatomban fő célként ennek a hiánynak a pótlását tűztem ki.

Alkalmazott módszereimet ennek megfelelően választottam ki: a geológiai- és geomorfológiai szempontú statisztikai kategóriákat (pl. kráter-átmérő és kor kategóriák; vagy különböző geológiai egységek-, vagy klimatikus és geomorfológiai zónák krátereit) alkottam meg és értékeltem ki; illetve eloszlási és hidrogeográfiai térképeket szerkesztettem és összehasonlító vizsgálatok végeztem rajtuk.

Ezen vizsgálatok eredményeként kimutattam, hogy az ismert Földi kráterek átmérő-, kor és jelenkori földrajzi helyzet szerinti eloszlása nem véletlenszerű, hanem a Naprendszer szilárd felszínű égitestjeinek általános krátereződési törvényszerűségeinek, valamint a speciális földi tektonikai-eróziós viszonyok törvényszerűségeinek az interferenciáiból eredő szabályszerűségek szerint oszlanak el a Föld felszínén. Fontos azt is kiemelni, hogy a jelenleg ismert kráterek nem tükrözik az eredeti krátereződési rátákat, mivel nagy részük mára már eltűnt a Föld felszínéről. A meteoritkráterek jelenkori földrajzi helyzete az egyre idősebb kráterek felé haladva egyre távolabb esik az eredeti becsapódási koordinátáktól, ami a kontinensvándorlás következménye. A vizsgálataimból kiolvashatóvá vált, hogy minél kisebb egy kráter, statisztikailag annál nagyobb eséllyel lesz fiatal, mivel minél kisebb egy kráter, annál gyorsabban pusztul le. Ez azt jelenti, hogy a kis krátereknél a valószínűsíthető kis kor miatt a jelenkori földrajzi koordináták és a képződésük pontjának koordinátái gyakorlatilag egybe esnek (ez alól is van azonban kivétel). A viszonylag idős kráterek ezzel szemben hosszabb utat tettek meg a kontinensek hátán vándorolva a jelenkori pozíciójukig. A Föld felszínének egy adott pontján (amely jelen esetben akár egy meteoritkráter is lehet) dinamikus változnak az éghajlati, geomorfológiai és geológiai körülmények (és minden egyéb olyan körülmény is, amelyet az előbbieket befolyásolnak), ami már önmagában is nagyban megnehezíti az adott pont paleogeográfiai fejlődésének megismerését. Ezt azonban még jobban bonyolítja, hogy a dinamikus

változó körülmények közepette még az adott pont is mozog a lemeztetktonika által megszabott, ma még sok esetben csak egyes részleteiben ismert útvonalak valamelyikén. Ez még az ismert korú meteoritkráterek ősföldrajzi rekonstrukcióját is megnehezíti, az ismeretlen korúakról nem is beszélve.

Mivel a földi kráterek jelentős részének ősföldrajzi és lepusztulási története csak töredékesen ismert, vagy teljességgel ismeretlen, ezért célravezetőbbnek láttam minél nagyobb csoportokba összevonva vizsgálni őket. Legnagyobb csoportként az ismert Földi kráterek összességét definiáltam. Ezen belül következett az ismert korú földi kráterek csoportja; ill. emellett pedig a kontinens-csoportonként (pleisztocénben nagy kiterjedésű jégtakarókkal fedett – *Észak-Amerika és Európa*; ill. nem fedett kontinensek – *Afrika, Ázsia, Dél-Amerika és Ausztrália* csoportjai), és legvégül a kontinensenként szétválogatott krátereké. A vizsgálatok a kis kráterek már említett, viszonylag gyors lepusztulása és eltűnése mellett kimutatták a pleisztocén jégtakarók exhumáló hatását is. A térképi ábrázolások és a megszerkesztett grafikonok utalnak továbbá a pleisztocén jégtakarók pajzs-funkciójára, valamint arra is, hogy a jelenkori trópusi területeken a növényzet szerepet játszhat az ott esetleg meglévő kráterek elrejtésében.

Habár a kráterek múltja sok esetben bizonytalan, a jelenkori helyzetükből, valamint állapotukból azonban sok és megbízható információ nyerhető. A recens állapotok vizsgálatára egy olyan jellegzetességet választottam, amely sok meteoritkráternél megfigyelhető: a vízhálózati (völgyhálózati) rajzolat típusok elemzését. Ennek keretében 13 darab földi meteoritkráter vízhálózati térképének elkészítésével sikerült a meteoritkráter-vízhálózati rajzolatok főbb jellemzőit meghatározni (pl.: a kráter területénél sok esetben jóval nagyobb vízgyűjtő terület; éles kapturák a sánc környezetében; sok tápláló-folyó és egy lecsapoló folyó a medencében; esetenként koncentrikus és radiális rajzolatú folyószakaszok). Példákkal igazolható, hogy eltérő információk nyerhetőek a rajzolatokból, ha *vízválasztók alapján*; ill. ha *kizárólag a futásirány alapján (a kráter középpontjához viszonyítottan)* vizsgáljuk azokat. Míg az előbbi a krátert a tágabb környezetében segít elhelyezni, addig az utóbbi az egyes morfológiai elemeit (pl. a sánc, vagy a központi boltív) segít lehatárolni. Ezek alapján a kráterek vízhálózati rajzolatának két fő típusát különítettem el, az *átfolyó (nyílt)* és a *nem-átfolyó (zárt)* rendszereket. A vízhálózati elemzés segíthet továbbá a kráterek átmérőjének pontosabb meghatározásában is. Bebizonyosodott az is, hogy az eltemetett krátereknek; ill. az erősen lepusztult kráterroncsoknak is

lehet kimutatható vízhálózati rajzolata. Ezek a rajzlati jellegzetességek egyrészt segítik jobban megérteni azt, hogy hogyan pusztulnak a kráterek; másrészt pedig az eddig ismeretlen becsapódásos kráterek felfedezésének első mozzanata is lehet a megfelelő rajzlat felismerése, akár egyéb geonformatikai módszerekkel kombinálva is (Krogli, 2010; Mihályi et al. 2010). Ezek alapján felmerült a vízhálózatok kettős szerepe a kráterkutatókban: egyrészt a fluviális erózió hatékonyan pusztítja a krátereket (csökkenti a számukat), másrészt pedig az eközben kialakuló specifikus vízhálózati rajzlat a kráter kimutathatóságának növelésével emelheti az ismert kráterek számát.

Summary

At the end of my dissertation, I would like to give a summary of the main chapters.

From the viewpoint of the history of science we can tell, that considering geomorphological consequences of meteorite impacts took a long time, although cosmic origin of meteorites was known for thousands of years. Phenomena of meteorite's atmospheric entry also was known by early mankind, who interpreted these as mythological and religious events. Despite of these above mentioned knowledge, scientific acceptance of meteorite craters began only in the 19th century. Recognizing impact crater's basic morphological role on the surfaces of the Solar System's bodies started in the mid 20th century.

International scientific community began to recognize the possible morphological effects of meteorite impacts from the 19th century, however the real breakthrough is according to the recovery of space explorations in the mid 20th century. Although craters of the planetary bodies (such as Earth-type planets, moons and even on asteroids) are well studied, exploration of terrestrial craters was neglected for a long time, because of the low number of craters on Earth which is the result of geological, climatical (and partly ecological) activity of our planet. Beginning of modern scientific approach of the meteorite craters in Hungary can be dated to the 1960's. Scientific exploration of terrestrial meteorite craters still continues worldwide and also in Hungary, mainly by test of geological, geochemical and geophysical aspects, while geographical approach becomes less focused. Main purpose of my dissertation is to supplement this miss.

I choose exploration methods attached to this purpose by evolving and analysing statistical categories from geological-geomorphological aspects (e.g. crater diameter and age categories; categories by geological units; or craters of different climatical and geological zones). Furthermore I made distribution maps and hydrogeographic maps also, for the purpose of comparative analysis.

Concluded from these investigations I found that distribution of terrestrial meteorite craters by diameter, age and present geographical location is not stochastic, and can be regarded as a kind of interference between the cratering principles of the Solar System and principles of the special terrestrial erosion and tectonic processes. It is also important to highlight that presently known craters does not reflect the original cratering rates because majority of the craters were vanished from Earth's surface. Differences between present geographical coordinates and original coordinates of impact events became more and more higher towards the older craters which is the result of continent drifting. My results imply that the smaller a crater, the higher the probability of it to be younger, because erosion is faster for the smaller craters. It means that the smaller craters' present geographical coordinates and their original impact coordinates practically are the same (excepting a few examples). In contrast of this, older craters drifted much more on the 'continent's back' to their present geographical location. At a given point (e.g. a meteorite crater) of Earth's surface climatical, geomorphological and geological circumstances (and all circumstances derived from these) are in dynamic change permanently, which makes difficult the paleogeographical reconstruction of the given point. Furthermore poorly known plate tectonic generated drifting movements make these reconstructions even more complicated in the case of craters with known age, and makes it impossible in the case of craters with unknown age.

Wherefore paleogeographical and erosion history is poorly known or unknown for most of the terrestrial craters, I found more adequate to analyse the craters contracted in bigger categories. Biggest category is the totality of Earth's impact craters. Within this there is the category of craters with known age; and besides this there is the category of continent-groups (group of continents with large pleistocene ice sheets – *North America and Europe*; and the group of continents without large pleistocene ice sheets – *Africa, Asia, South America and Australia*), and towards to crater-groups by individual continents. Analyses implies the

possible shield-function of large pleistocene ice covers (besides the above mentioned fast erosion of small craters).

Although geochronological past and the evolution of the meteorite craters are uncertain in many cases, many information can be obtain from their present location and structure. For the examination of the recent features of the craters I choose a common feature of them: their drainage (valley) pattern systems. I made hydrogeographical maps of 13 meteorite craters which allowed me to identify main characteristic features of the crater's drainage pattern (e.g. catchment areas of the crater basin are much more larger than the crater itself; sharp captures according to the crater rim; many feeding rivers and only one drain river for the basin; role of concentric and arcuate river segments). Examples proofed that different type of information can be obtained if we made river drainage pattern maps based upon *catchment area*; or based upon *river flow directions (referenced to the center of the crater)*. The first approach can help to fit the crater in its wider surrounding; while the second can help to identify the craters' morphological elements (e.g. the rim, or the central uplift). Derived from these, I identified two types of drainage patterns: *open systems* and *closed systems*. Hydrogeographical investigations furthermore can aid to identify the crater's diameter also. Results show that buried or strongly eroded craters can develop characteristic drainage patterns as well. These hydrogeographic characteristics (through drainage patterns) can give an aid to understand fluvial erosion of meteorite craters, and recognising these drainage features can be the first steps for discovering unknown craters even combined with other geoinformatical methods (Krogli, 2010; Mihályi et al. 2010). Based upon the above mentioned, we can say that drainage systems have a dual role in crater investigations: on the one hand, fluvial erosion increases speed of crater elimination (decreasing the crater numbers for statistical analyses). On the other hand, however, the same erosion drainage patterns can make it easier to find craters, and therefore the number of statistical elements for distribution studies may increase.

9. Köszönetnyilvánítás

Doktori dolgozatom végén köszönetemet szeretném kifejezni mindazoknak, akik segítettek és támogattak a disszertáció elkészítésében:

Köszönetemet fejezem ki témavezetőimnek, Dr. Szabó Józsefnek és Dr. Gucsik Arnoldnak, a dolgozat készítése során nyújtott szakmai segítségükért és emberi támogatásukért.

Köszönöm Dr. Szabó Szilárdnak és Dr. Gyenizse Péternek a hasznos tartalmi és formai észrevételeiket az előzetes vitához kapcsolódóan.

Köszönöm a Debreceni Egyetem Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszéke valamennyi dolgozójának a sok támogatást és türelmet. Köszönetet mondok a Debreceni Egyetem Földtudományok Doktori Iskolájának is az intézményi háttér biztosításáért.

Köszönetem fejezem ki Dr. Ulrich Ott felé is, önzetlen támogatásáért. – I would like to thank to Dr. Ulrich Ott, for his kind helpfulness.

Köszönetet mondok Dr. Ludmány Andrásnak, hogy lehetővé tette számomra az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet Debreceni Napfizikai Obszervatóriuma könyvtárának a használatát.

Végül, de nem utolsó sorban köszönetet mondok mindazoknak, akik bármilyen módon segítettek és bátorítottak a dolgozat megírása során.

A disszertációm elkészültét a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0024 jelű pályázata is támogatta, amiért szintén köszönetemet fejezem ki.

10. Irodalomjegyzék

- 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.
- Bailer-Jones, C. A. L., 2011: Evidence for a variation – but no periodicity – in the terrestrial impact cratering rate. *EPSC Abstracts, Vol. 6, EPSC-DPS2011-153.*
- 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.
- Bérczi Sz., 1993: Planetológia. *Nemzeti Tankönyvkiadó.* pp. 69-108.
- Bodoky T., Don Gy., Kis M., Kummer I., Posgay K., Sörös L., 2007: Is the Magyarmecske telluric conductivity a buried impact structure? *Central European Geology, Vol. 50/3*, pp. 199-223.
- Buchner, E.; Shmeider, M.; Schwarz, W. H.; Trieloff, M.; Hopp, J.; Spray, J. G., 2010: Dating the Charlevoix impact structure (Quebec, Canada) – A tough nut to crack in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *41st Lunar and Planetary Science Conference, abstract no. 2017*
- 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.
- Collins, G. S.; Melosh, H. J.; Marcus, R. A., 2005: Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Meteoritics & Planetary Science 40, Nr 6*, pp. 817–840.

- Currie, K. L., 1968: Mistastin Lake, Labrador: A new Canadian crater. *Nature* 220, pp. 776-777.
- Csizmadia Á., 2003: Égből hulló kövek. – Meteorit-becsapódás Aigospotamoiban, i.e. 467-ben.
<http://www.math.bme.hu/~akos/meteorit/aigos/aigos.pdf> (hozzáférés: 2013. febr. 05.)
- Csizmadia Á., 2004: „Egy csillag zuhant le...” Feltételezett meteorithullások az ókori egyiptomi szövegekben.
<http://www.math.bme.hu/~akos/meteorit/egypt/egypt.pdf> (hozzáférés: 2013. febr. 05.)
- Dietz, R. S.; Fudali, R.; Cassidy, W., 1969: Richat and Semsiyat domes (Mauritania): Not Astroblemes. *Geological Society of America Vol. 80, no. 7*, pp. 1367-1372.
- Dojcsák Gy., 1979: A meteoritkráterek morfogenezise és gazdasági jelentőségük. *Kandidátusi értekezés tézisei, Budapest.*
- Dressler, B. O.; Reimold, W. U., 2001: Terrestrial impact melt rocks and glasses. *Earth-Science Reviews* 56, pp. 205-284.
- 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.
- Fudali, R. F., 1969: Coesite from the Richat Dome, Mauritania: A misidentification. *Science Vol. 166, no. 3902*, pp. 228-230.
- Gábris, Gy., 1987: A vízhálózat geomorfológiai célú elemzése. *Kandidátusi értekezés. Budapest*, p. 136.
- Gábris Gy., Marik M., Szabó J., 1991: Csillagászati földrajz. *Tankönyvkiadó, Budapest*. pp. 147-241.
- Gibson, R. L.; Oglivie, P., 2008: The hottest rocks in the Vredefort dome, South Africa – Extending the links between impact-induced and „normal” metamorphism. *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV, abstract no. 3108.*

- Glikson, A., 2005: Asteroid/comet impact clusters, flood basalts and mass extinctions: Significance of isotopic age overlaps. *Earth and Planetary Science Letters* 236. pp. 933-937.
- 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, No. 29*, pp. 27-41.
- Gyenyisz P.; Nagyvárad L.; Pirkhoffer E., 2002: A feltételezett bakonyi meteoritkráter vizsgálata. In: Czuppon V.; Gerendás R.; Kopári L.; Tóth J. (szerk.): *Földrajzi tanulmányok a pécsi doktori iskolából III., PTE TTK FI, Pécs*, pp. 46-67.
- Gyenyisz P., 2008: Becsapódások. (In: Geomorfológia II. – Földfelszíni folyamatok és formák. szerk.: Lóczy D.), *Dialóg Campus*, pp. 330-340.
- Hargitai, H.; Császár G.; Bérczi Sz.; Kerszturi Á., 2008: Földön kívüli égitestek geológiai és rétegtani tagolása és nevezéktana. *Földtani Közlöny* 138/4, pp. 445–468.
- Hawke, P. J., 2003: A re-evaluation of the size of the Acraman impact structure, Australia. *66th Annual Meteoritical Society Meeting, abstract no. 5169*
- Ivanov, B. A.; Stöffler, D., 2005: The Steinheim impact crater, Germany: Modeling of a complex crater with central uplift. *Lunar and Planetary Science XXXVI, abstract no. 1443*
- Jakucs L., 1975: A Fekete-tenger és a Kaszpi-tó asztróblém eredete. *Földrajzi Értesítő* 24, pp. 433–438.
- Jakucs L., 1979: Asztróblémák kimutatása műholdfelvételek segítségével. *Földrajzi Közlemények, XXVII. (CIII.) kötet, 1 – 3. szám*, pp. 28-35.

- Jones, J. H., 1998: Tests of the Giant Impact Hypothesis. *Origin of the Earth and Moon Conference, abstract no. 4045.*
- Kereszturi Á.; Sárrneczky K., 2003: Célpont a Föld? – Kisbolygók a láthatáron. *Magyar Csillagászati Egyesület*, pp. 3-190.
- Kereszturi Á., 2012: Geomorphologic analysis of drainage networks on Mars. *AGD Landscape & Environment 6 (1)*. pp. 15-30.
- Koeberl C., 1994: African meteorite impact craters: characteristics and geological importance. *Journal of African Earth Sciences, Vol. 18, No. 4*, pp. 263-295.
- Krogli, S. O., 2010: Automatic extraction of potential impact structures from geospatial data – examples from Finnmark, Northern Norway. *Dissertation for the degree of Philosophiae Doctor (Ph.D.); Department of Geosciences Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo*, pp. 1-66.
- 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.
- Layer, P. W., 2000: Argon-40/argon-39 age of the El'gygytgyn impact event, Chukotka, Russia. *Meteoritics & Planetary Science 35*, pp. 591–599.
- Lóczy D.; Veress M., 2005: Geomorfológia I. – Földfelszíni folyamatok és formák. *Dialóg Campus*, pp. 66-67, p. 116.
- Marvin, U. B., 1995: Siena, 1794: History's most consequential meteorite fall. *Meteoritics, Vol. 30, no. 5*, p. 540.
- Masaitis, V., 2002: Popigai crater: general geology. In.: Impacts on precambrian shields (eds.: Plado, J; Pesonen, L. J.), *Springer*, p. 81.
- McDonald, I.; Koeberl, C.; Gurov, E., 2009: A meteoritic component in melt rocks from the Boltysh impact structure, Ukraine: First assessment. *40th Lunar and Planetary Science Conference, abstract no. 1252*

- Mihályi K., 2008: Hydrogeological features of terrestrial meteorite craters. *Acta GGM Debrecina, Geology, Geomorphology, Physical Geography, Series Vol. 3.*, pp. 61-73.
- Mihályi K.; Gucsik A., 2008: Distributions of the currently known terrestrial impact structures. *Meteoritics & Planetary Science, Vol. 43, Supplement, A98*
- Mihályi K.; Gucsik A.; Szabó J., 2008: Drainage patterns of terrestrial complex meteorite craters: a hydrogeological overview. *39th Lunar and Planetary Science Conference, abstract no. 1200*
- Mihályi K.; Gucsik A.; Szabó J.; Hargitai H.; Kereszturi Á.; Bérczi Sz.; Nagy Sz., 2009: Az impakt szerkezetek helye a földtudományokban I.: A földi meteoritkráterek általános jellegzetességei és eloszlási jellemzői. *Földtani Közlöny 139/4*, pp. 367-378.
- Mihályi K.; Szabó J.; Gucsik A.; Hargitai H.; Kereszturi Á.; Bérczi Sz.; Nagy Sz., 2010: Vízhálózat-vizsgálatok földi meteoritkrátereken. *Földrajzi Közlemények, 134. 2.* pp. 129-145.
- Milam, K. A.; Kuehn, K.; Deane, B., 2004: Central uplift formation at the Middlesboro impact structure, Kentucky, USA. *Lunar and Planetary Science XXXV, abstract no. 2073.*
- Milton, D. J., 1968: Structural geology of the Henbury Meteorite Craters Northern Territory, Australia. *Contributions to astrogeology. – Geological Survey Professional Paper*
- Moldvay L., 1981: Kriptovulkáni szerkezet a Bakonyban. *Földtani Közlöny, 111.*, pp. 157-158.
- Moldvay L., 1987: Asztrobléma a Bakony-hegység nyugati részén. *Földrajzi Értesítő, XXXVI. évf. 3-4 füzet*, pp. 305-320.
- Naumov, M. V., 2010: Impact-generated sulfide ore from the Suavjärvi impact structure, Russian Kerlia. *41st Lunar and Planetary Science Conference, abstract no. 1117*
- Ormö, J.; Lindström, M., 2000: When a cosmic impact strikes the sea bed. *Geological Magazine, Vol. 137/01*, pp. 67-80.

- Osinski, G. R.; Spray, J., G., 2001: Impact-generated carbonate melts: evidence from the Haughton structure, Canada. *Earth and Planetary Science Letters* 194, pp. 17-29.
- Osinski, G. R., 2004: Impact melt rocks from the Ries structure, Germany: an origin as impact melt flows? *Earth and Planetary Science Letters* 226, pp. 529-543.
- Papasikas, N.; Juhlin, C., 1997: Interpretation of reflections from the central part of the Siljan Ring impact structure based on results from the Stenberg-1 borehole. *Tectonophysics* 269. pp. 237-245.
- Parnell, J.; Lee, P.; Baron, M.; Pearson, M. J.; Feely, M., 2003: Hydrocarbons in the Haughton impact structure, Devon island, Nunavut, Canada. *Lunar and Planetary Science XXXIV*, abstract no. 1118
- Passey, Q. R.; Melosh, H. J., 1980: Effects of atmospheric breakup on crater field formation. *Icarus* 42, pp. 211-233.
- Porter, S. M., 2004: Halkieriids in middle cambrian phosphatic limestones from Australia. *Journal of Paleontology*, 78. pp. 574–590.
- Prother, D. R., 1994: The Late Eocene-Oligocene Extinctions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 22., pp. 145-165.
- Reimold, W. U. – Gibson, R. L., 2006: The melt rocks of the Vredefort impact structure – Vredefort Granophyre and pseudotachylitic breccias: Implications for impact cratering and the evolution of the Witwatersrand Basin. *Chemie der Erde* 66, pp. 1-35.
- Rhode, R. A.; Muller, R. A., 2005: Cycles in fossil diversity. *Nature*, Vol. 434.
- 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.
- Scott, R. G.; Pilkington, M.; Tanczyk, E. I., 1995: Magnetic studies of the Clearwater Lake impact structures. *LPS XXVI*; pp. 1261-1262.

- Sebe K.; Kovács J.; Tóth G.; Csiszár CS., 2004: Angol-magyar geomorfológiai szótár. *Pécs-Szombathely*, pp. 18-152.
- Szabó J., 1998(a): A Föld és a Föld-típusú bolygók fejlődése. *Debreceni Szemle*. pp. 66-72.
- Szabó J., 1998(b): A víz földrajza. In: Borsy Z. (szerk.), *Általános természetföldrajz*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 175-176.
- Szederkényi T., 1996: Revised „impact structure” at Magyarpolány, Bakony Mountains, Hungary. *Ann. L. Eotvos. Univ. Sectio. Geophys. et Meteor. XII.*, pp. 63-78.
- Thompson, L. M.; Spray, J. G.; Whitehead, J., 2010: Re-assessment of large terrestrial impact structures: rim and maximum damage diameters. *41st Lunar and Planetary Science Conference, abstract no. 2712*.
- Thomsen, E., 1980: New light on the origin of the holy black stone of the Ka'ba. *Meteoritics, 15*, pp. 87-91.
- Twidale, C. R., 2004: River patterns and their meaning. *Earth-Science Reviews 67*, pp. 159-218.
- Vyssotski, A. V.; Vyssotski, V. N.; Nezhdanov, A. A., 2006: Evolution of the West Siberian Basin. *Marine and Petroleum Geology 23*. pp. 93–126.
- Webster, W. E., (ford.) 2009: Meteorology by Aristotle. <http://classics.mit.edu/Aristotle/meteorology.1.i.html> (hozzáférés: 2013. febr. 05.)
- White, R. V.; Saunders, A. D., 2005: Volcanism, impact and mass extinctions: incredible or credible coincidences? *Lithos 79*. pp. 299-316.
- Winslow, F. D.; Rasbury, E. T.; Hemming, S. R., 2004: Petrological complexities of the Manicouagan melt sheet: implications for ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Lunar and Planetary Science XXXV; abstract no. 2034*

Internetes adatbázisok, online alkalmazások a meteorit-bechapódások paramétereinek kiszámításához és egyéb internetes források:

Earth Impact Database:

<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html>

Spray, J (as PASSC director)

International Stratigraphic Chart 2009

(International Commission on Stratigraphy):

<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/StratChart2009.pdf>

Earth Impact Effects Program

<http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/>

Marcus, R; Melosh, H. J.; Collins, G., (2010)

Források a tudománytörténeti részekhez:

www.meteoris.de

www.bibliotecapleyades.net

<http://www.historylecture.org/starsfell.html>