

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

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

Mihályi Krisztián

Témavezetők: Dr. Szabó József és Dr. Gucsik Arnold



DEBRECENI EGYETEM

Földtudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2013

Bevezetés

A meteoritkráterek léte az égitesteken egy hosszú folyamat eredményeként vált elfogadottá, amely a 17. század környékén kezdődött el, majd egy újabb lépcsőfokként a 19.-20. század fordulójától kezdve a Földre terelődött a figyelem: egyre több földfelszíni forma kapcsán merült fel a lehetségesen becsapódásos eredet. Ez megmutatkozik a bizonyítottan becsapódásos eredetű földi formák számának meredek emelkedésében is, főleg az 1930-as évektől kezdődően. Napjainkban mintegy 183 forma tekinthető bizonyítottan becsapódásos eredetűnek, az aktuális kritériumok alapján. Ez a szám nagyságrendekkel alacsonyabb, mint a Naprendszer egyéb, szilárd felszínű égitestén. Ennek fő okai a földi eróziós folyamatok hatékonysága, ill. az aktív lemeztettktonikai ciklusok (a kőzetlemezek körforgása a hátságképződés-szubdukció rendszerben) intenzitása.

Célkitűzés

A dolgozatban két fő, egymással is szervesen kapcsolódó témakörben végzett kutatási eredményeimet ismertetem.

Az első témakörben azt vizsgálom, hogy a Földön jelenleg ismert meteoritkráterek átmérő-, kor- és jelenkori földrajzi helyzet szerinti eloszlásai tükröznék-e valamilyen szabályszerűséget; ill. hogy ezek az eloszlási

jellemzők (a speciális Földi körülmények figyelembe vételével) beilleszthetőek-e a Naprendszer jelenleg ismert kráterképződési törvényszerűségeinek rendszerébe.

Az eloszlások kapcsán további alfejezetként fogalmazódik meg az a kérdés, hogy a Földet ért meteorit-beccsapódások (ill. az általuk közvetített energia) hatással lehetett-e a földi élővilág fejlődésére.

A második témakörben néhány földi kráter vízhálózati rajzolatát ismertetem, és belőlük vonok le közös jellemzőket az impakt formák folyóhálózati rajzolatait illetően. Ez két ponton is kapcsolódik az eloszlások témaköréhez: *egyrészt* magyarázatot ad arra, hogy az egyik leghatékonyabb földi eróziós folyamat, a folyóvízi erózió hogyan erodálja a krátereket; *másrészről* pedig arra mutat rá, hogy miközben a vízhálózat pusztítja a krátereket, az eközben formaspecifikusan kialakuló vízhálózati rajzolati rendszer egyszersmind felismerhetővé is teszi az amúgy sok esetben nem könnyen felfedezhető beccsapódási krátereket.

Anyag és módszer

Az eloszlások vizsgálatánál a földi meteoritkráterek hivatalos online adatbázisát (Earth Impact Database – EID) tekintetem kiindulási alapnak. Ezeket esetenként módosítani kellett (pl. a kontinensek szerinti

besorolásnál; ill. a krátermezők esetében az átmérőknél). Az itt megadott földrajzi koordináták szolgáltak alapul a globális térképi ábrázolásokhoz, amelyek ArcGis szoftverrel készültek. A 3D-s ábrázolások alapját Google Earth és SRTM adatok szolgáltatták, amelyeket Global Mapperrel dolgoztam fel.

A statisztikai elemzéseket és a grafikonokat Microsoft Excel programmal készítettem. A kráterekre vonatkozó alapadatokból (átmérő, kor, földrajzi koordináta) másodlagos statisztikai mérőszámokat számoltam, és ezeket illesztettem a földtörténeti időskálára, melynek alapjául az International Stratigraphic Chart geokronológiai beosztását használtam. Az így meghatározott mérőszámok lehetővé teszik az ismert kráteradatok alapján annak hozzávetőleges megbecslését, hogy a különböző földtörténeti koregységekből fennmaradt kráterek mennyire tükrözik az akkori eredeti becsapódási tendenciákat; ill. mennyire az erózió utólagosan torzító hatásait.

A vízhálózati térképek alapját a Microsoft Encarta World Atlas szolgáltatta, amelyet grafikai szoftverrel dolgoztam fel. A feldolgozás során fő célom az volt, hogy vizuálisan minél jobban kiemeljem és rendszerbe foglaljam a vizsgált kráterek folyórendszereinek normáleróziós rajzolatit; ill. a szerkezetileg preformált elemeit; valamint a vízgyűjtők-, ill. a lefutási (pl. koncentrikus, radiális) irányok alapján kirajzolódó jellegzetességeit. Ahol

lehetőség nyílt rá, ott az így elkészített vízhálózati térképet összevettem az adott kráter geológiai térképével is, és következtetéseket vontam le arra nézve, hogy milyen a szerepe a szabadon fejlődő-, valamint a szerkezetileg kötöten (preformáltan) fejlődő folyóhálózati rendszereknek. Vizsgáltam azt is, hogy ha folyórendszerek helyett csak egyetlen kiemelt folyó (amely a kráter vízhálózatának fő folyója) rajzolatát nézzük, akkor ott milyen rajzolati mintázat utalhat a becsapódásos eredetre. Ezek alapján megszerkesztettem egy olyan összefoglaló ábrát a földi meteoritkráterek lehetséges vízhálózati rajzolatitípusairól, amely amellest, hogy érthetőbbé teszi a kráterek fluviális lepusztulási folyamatát, segíthet újabb kráterek kimutatásában is.

A kutatási eredmények tézisszerű bemutatása

Az alábbi fejezetek a kutatási eredményeimet mutatják be, két fő témakörre bontva azokat: az első témakör (I.) tézisei és altézisei az ismert földi meteoritkráterek eloszlási szabályszerűségeit és összefüggéseit mutatják be; a második témakör (II.) pedig a meteoritkráterek hidrokeográfiai, ezen belül is folyó-rajzolati jellemzőit foglalja össze tézisekbe foglalva. A két témakör szervesen kapcsolódik egymáshoz, mert a folyóvízi erózió, mint az egyik legáltalánosabb földfelszíni eróziós folyamat, hatékonyan pusztítja a krátereket (azaz ilyen

szempontból negatívan befolyásolja az eloszlási vizsgálatok elemszámát); másrésről pedig egyúttal pozitívan is befolyásolhatja az eloszlási vizsgálatok elemszámát (mivel a krátereken kialakuló eróziós vízhálózati mintázatok könnyebben felismerhetővé tehetik a még ismeretlen krátereket).

I. – Az ismert földi meteoritkráterek eloszlási jellemzői

1.1. tézis – Az ismert földi meteoritkráterek alapvető eloszlási jellemzői rendszerbe foglalhatóak, azaz az eloszlások nem teljesen véletlenszerűek. Az alábbi főbb tényezők befolyásolják az ismert kráterek jelenkori eloszlását:

a, Lemeztetktonika. A lemezmozgások által a kráterek időarányosan egyre távolabb kerülnek az eredeti, képződési földrajzi koordinátaiktól, miközben a tektonikai ciklusok sok krátert el is tüntetnek.

b, Légkör. A legkisebb testeket (méteres-tíz méteres nagyságrendig) a légkör már a becsapódás előtt felemésztheti (olvadás és aprózódás által). Emiatt a legkisebb, kb. tíz méter átmérő alatti kráterek (amelyek a légkör nélküli égitesteken a leggyakoribbak) a Földön nem, vagy csak rendkívül

kis számban találhatóak meg (ebben azonban szerepet játszik az ilyen kis kráterek gyors eróziója is).

c, Éghajlat. Az éghajlati zónákhoz kapcsolódó jellegzetes eróziós viszonyok befolyásolhatják a kráterek morfológiai megtartottságát. Legalább ilyen jelentős a szintén éghajlati övekhez köthető zonális növényzeti borítás, ami pedig a kráterek felfedezhetőségére van nagy hatással.

d, Humán tényező. Ez a faktor nem a kráterek eloszlását befolyásolja antropogén úton, hanem a kráterek felfedezésére van hatással (azaz az eloszlások elemszámára), ui. kráterek felfedezésének fontos tényezője az, hogy pl. egy adott területen mekkora a népsűrűség, milyen fokú a gazdasági fejlettség.

1.2. tézis – Vannak olyan kráter-eloszlási eloszlási törvényszerűségek a Földön, melyek bár kisebb-nagyobb torzulásokkal is, de követik a Naprendszer egyéb égitesteinek krátereződési jellemzőit:

a, Minél kisebb egy kráter átmérője, annál több található belőle (ez tükrözi az űrben keringő testek méret szerinti eloszlását, és kifejezi azt is, hogy a minél kisebb kráterek képződési valószínűsége egyre növekvő adott felszíndarabon adott időegységre számolva; másképp fogalmazva: minél nagyobb egy kráter, statisztikailag annál nagyobb eséllyel lesz egyre idősebb).

A Föld esetében is igaz ez, kivéve a legkisebb (méteres nagyságrendű) krátereket, aminek két oka is van: az ilyen kisméretű krátereket kialakító meteorokat a légkör még az ún. légköri áthaladás alatt felemésztí. A másik ok az, hogy ha ilyen kis kráter netán ki is alakul, azt az eróziós folyamatok nagyon gyorsan eltüntetik (ld. még: *1.1.b*).

b, Az egyre nagyobb átmérő-kategóriák felé haladva fokozatosan egyre kisebb mértékben csökken az adott átmérő-kategóriába tartozó kráterek száma.

A Föld esetében az 50 km feletti átmérőjű kráterek esetében ez a csökkenő tendencia érvényét veszíti, és véletlenszerűvé válik az eloszlás (1. ábra – 181 kráter adatait tartalmazza, kettőnek ugyanis nem volt megbízható átmérő-adata). Ennek oka az, hogy mára már az amúgy is ritkábban képződő nagyobb kráterek is javarészt eltűntek az erózió és a lemeztektonika miatt (ld. még az előző bekezdésből: *minél nagyobb egy kráter, statisztikailag annál nagyobb eséllyel lesz egyre idősebb*), ezért a kis elemszám miatt nem tudnak a statisztikailag várható tendenciák kifejeződésre jutni (jelenleg mindössze 13 darab, ötven kilométeres átmérőnél nagyobb krátert ismerünk a Földön). További bizonytalansági faktor, hogy nem tudjuk, vajon ismerjük-e a jelenleg a Földön (akár csak nyomokban is) meglévő összes nagyobb krátert.

c, Minél idősebb egy felszíndarab, annál több kráter található rajta.

Ebben a törvényszerűségben az tükröződik, hogy az idővel (pontosabban az adott felszíndarab korával) arányosan növekszik a becsapódás valószínűsége a felszín minden pontján. A Föld esetében is kimutatható, hogy legtöbb kráter az ősi felszíndarabokon (Balti- és Kanadai-pajzs, Dél-Afrika, Ausztrália) található, bolygónk esetében azonban további tényezőket is figyelembe kell venni ennek kapcsán: a Balti- és Kanadai-pajzsok területén belül is a legnagyobb kráttersűrűség ott fordul elő, ahol a legintenzívebb volt a pleisztocén jégletarolás (az exhumált felszíneken), azaz nem tudhatjuk pontosan, hogy a fedett ősföldeken mekkora lehet a kráttersűrűség. Az elfedett, de geológiai alaposan feltárt Ukrán-pajzs pajzsfelszínébe mélyülő, s emiatt szükségszerűen eltemetett kráterek nagy száma azonban arra utal, hogy a fedett pajzsokon is ott vannak a kráterek, csak a mélyben eltemetve. Dél-Afrikában, a Szaharában és Ausztráliában pedig a sivatagi körülmények (a növényzet hiánya) teszik az átlagnál könnyebben észrevehetővé a krátereket.

1.3. tézis – Léteznek olyan, kizárólag a Földre jellemző kráter-eloszlási törvények is, amelyek a fentebb ismertetett, általános érvényű krátereződési

törvényszerűségek, valamint a speciálisan földi eróziós törvényszerűségek egymásra hatásaiból erednek.

a, A szárazföldeken megfigyelhető térbeli kráter-eloszlásokban bizonyos fokú övezetesség mutatható ki, amely a hagyományos éghajlati-növényzeti övezetességgel mutat helyenként átfedést.

Legjellegzetesebb példája ennek a trópusok vidéke, ahol is az Egyenlítő környéki trópusi esőerdők vidékén alig ismert 1-2 kráter, miközben a tőlük közvetlenül északra és délre húzódó térítői zónákban több tucat kráter található. Feltűnő továbbá a poláris területek (mindenekelőtt Grönland és az Antarktisz) kráternélkülisége is. Ez felveti a jégtakarók pajzs-szerepét becsapódások alkalmával (a jégpajzs elnyeli a becsapódási energiát); illetve az ezzel egyidejű kráter-exhumáció szerepét a jégtakaró aljzata és az alatta fekvő alapközet határán.

b, A kontinensenként vett átmérő-kategóriák eloszlási diagramjainak lefutása alapján két csoportra bonthatóak a kontinensek.

Az első csoportba tartozik Európa és Észak-Amerika; a másodikba pedig Ázsia, Afrika, Ausztrália és Dél-Amerika (2. ábra). Legfőbb különbség köztük a kisebb kráterek (a 30 kilométer alatti átmérőjűek [$d > 30\text{km}$]) kategóriáiban találhatóak: az első csoport két kontinense átlagosan sokkal több krátert tartalmaz

ezekben a $d > 30$ km alkategóriákban, mint a második négy kontinens átlagos darabszámai ugyanezen kategóriákban. A nagyobb átmérő-kategóriák felé haladva az elemszámok rohamos csökkenése miatt ezek a statisztikai különbségek is erősen csökkennek, és egyre inkább véletlenszerű értékeket vesznek fel (ld. még az *1.2.b pontot*). A különbségek fő okát a két kontinenscsoport fejlődéstörténetének különbségeiben látom. Ezen belül is a legfőbb különbség, ami Észak-Amerikát és Európát kiemeli a többi kontinens közül, a jelentős pleisztocén jégtakarók megléte az utolsó jégkorszak idején. Véleményem szerint ezek a jégtakarók exhumálhatták azt a nagyszámú, főleg kisebb méretű krátert ($d > 30$ km), ami kiemeli ezt a két kontinenst.

c, A kor szerinti eloszlások szempontjából vizsgálható, biztos koradattal rendelkező kráterek (118 darab) földtörténeti kor szerinti eloszlása a jelenkorhoz egyre közelebb eső koregységekben egyre jobban tükrözi a kráterképződés általános (egész Naprendszerre érvényes) törvényszerűségeit.

Ennek fő oka az, hogy az időben egyre távolabbra visszatekintve, egyre hatékonyabb eróziós és tektonikai tényezőkkel kell szembesülnünk (mivel ezek időarányosan fejtik ki hatásukat), ezért az egyre régebbi földtörténeti koregységekből egyre hiányosabb adataink vannak (azaz egyre kevesebb

krátert ismerünk). A csökkenő elemszám pedig az összefüggések felismerését nehezíti. Az összehasonlítások megkönnyítése érdekében két olyan, származtatott mérőszámot határoztam meg az alapstatisztikai adatokból, amelyek tömör formában fejezik ki az adott földtörténeti koregység időarányos kráterképződési tendenciáit (3. ábra). Ezek egyike a *kráterképződési intenzitás*, amely megmutatja, hogy az adott földtörténeti koregységben (pl. középső-devon, vagy felső triász) az ismert adatok alapján átlagosan hány kráter képződött egymillió év alatt a Földön (ennek mértékegysége: db/millió év). A másik mérőszám az ún. *közvetett energia-felszabadulási intenzitás*, amely azt mutatja meg, hogy ugyanezen földtörténeti koregységekben hány kilométert tesz ki (átmérőben értelmezve) az egymillió év alatt képződött kráterek összessége (a kráterek átmérője, ill. jelen esetben az összesített átmérők közvetve utalnak a becsapódások által felszabadított impakt energia mértékére) (km/millió év). Ez a két mérőszám kivonatosam és leegyszerűsítve mutatja meg, hogy időarányosan hogyan oszlik el a becsapódások száma és az általuk felszabadított energia közvetett értéke. Fontos megjegyezni, hogy ezek az értékek csak az ismert és ezen belül is csak az ismert korú becsapódások adatait tartalmazzák, tehát sok esetben csak bizonyos torzulással tükrözik a valós folyamatokat. Ezek figyelembevételével az alábbi

következtetéseket vontam le a Föld krátereződésének kapcsán a legtávolabbi időktől napjainkig (nagy földtörténeti korszakokra bontva):

Prekambrium

- Az *archaikum* időszakából nem ismert becsapódási kráter.
- A *proterozoikum* időszakából kevés, viszonylag nagy átmérőjű kráter ismert (a kisebbek lepusztultak az eltelt évmilliárdok alatt) – ez illeszkedik a kráterképződés általános törvényszerűségei közé. Kivételként említhető, hogy az ismert legősibb kráter (Suavjarvi, Karélia, paleoproterozoikumi: 2400 millió éves) egy viszonylag kis forma ($d=16$ km), miközben a paleoproterozoikum krátereinek átlagos átmérője 73,2 km.

Paleozoikum

- A paleozoikum folyamán végig megfigyelhető az a tendencia, hogy a jelenkorhoz közeledve a *kráterképződési intenzitás*, ill. a *közvetett energia-felszabadulási intenzitás* értékei is egyre inkább időarányossá válnak (szinkronizált lefutásúvá válnak a grafikonok). Egyszerűbben fogalmazva, minél hosszabb egy földtörténeti koregység, mindkét mérőszám is annál magasabb lesz az adott koregységben (ez egyben utal a fentebb ismertetett

általános krátereződési törvényszerűségek és az eróziós-tektonikus folyamatok hatékonyságának összjátékára is).

Mezozoikum

- A mezozoikumban a két mérőszám görbéi egymáshoz-, valamint az adott koregység hosszát jelző görbéhez viszonyított lefutásai egyre rendezetlenebbé válnak. Mindenekelőtt a közvetett energia-felszabadulási intenzitás válik erősen ingadozóvá az egyes kor-egységekben.

Kainozoikum

- Az újidőre jellemző, hogy a görbék lefutása az eddigiekhez képest még inkább rendezetlenebbé válik a jelenkor felé haladva, amely változás arra mutat rá, hogy a jelenkorban milyen kráterképződési tendenciák figyelhetők meg. Különösen jól megfigyelhetők ezek a tendenciák a legutolsó, jelenleg is tartó *holocén* korszakban, amelyek az alábbiakban foglalhatóak össze:

→ A *holocénben* ugrásszerűen megnő a *kráterképződési intenzitás*, ill. a *közvetett energia-felszabadulási intenzitás* értékei, miközben a képződő kráterek *átlagos átmérőjének* értéke, ill. az adott korszak *millió években kifejezett időtartama* hirtelen és drasztikusan lecsökken. Ez a (minden jel szerint csak látszólagos) intenzitás-növekedés valószínűleg

nem azt jelenti, hogy valamilyen csillagászati ok miatt a holocénben megemelkedett volna az időegységre jutó becsapódások száma. Inkább annak köszönhető ez a látszólagos növekedés, hogy az általános krátereződési törvényszerűségnek (a kisebb kráterek gyakoribb képződése) köszönhető, nagyobb holocén kráteresűrűséget az erózió még nem tudta eltörölni (amely erózióra érvényes, hogy a kisebb krátereket törli el elsőként). Ennek oka a holocén viszonylag rövid időtartama (kb. az utolsó 17 ezer év), amely alatt az erózió még nem tudta időarányos hatását érdemben kifejteni.

1.4. tézis – A jelenleg ismert földi meteorit-becsapódási események lehetséges ok-okozati kapcsolatban állhatnak a globális fajkihalási eseményekkel.

a, A becsapódások mindenképp előtt az általuk felszabadított energia által tudják befolyásolni az élővilág fejlődését. Az elsődlegesen fő kérdés ezzel kapcsolatban az, hogy globális fajkihalásokat meteoritbecsapódás önmagában ki tud-e váltani; vagy csak már egy (más okok miatt) megkezdődött kihalási folyamatot tud felgyorsítani és intenzívebbé tenni. A másodlagos kérdés ennek kapcsán az, hogyha befolyással bírnak egyáltalán a becsapódások az élővilágra, akkor azt milyen mechanizmus alapján tudják a leghatékonyabban megtenni: ha ugyanaz a becsapódási energia kevés (szélső esetben egy darab)

nagy erejű; vagy netán több, de kisebb energiájú és közel egyidejű becsapódás formájában szabadul fel.

A tézisben felvetett kérdés megválaszolásának érdekében összevettem az előbbieken ismertetett, becsapódásokkal kapcsolatos alapstatisztikai- és az ezekből származtatott adatok földtörténeti időskálára vetített eloszlásait az ismert globális kihalási (12 darab) eseményekkel, amelyből kilenc kihalás vizsgálható becsapódási szempontok alapján, három kihalás földtörténeti koregységében ugyanis nincs ismert kráter. Ehhez egy új mérőszámot dolgoztam ki, az $[(F)/(B)]$ hányadosokat, ahol (F) a már fentebb ismertetett *közvetett energia-felszabadulási intenzitás (km/millió év)*; és (B) *az ismert kráterek darabszáma az adott koregységben (db)*. Ez a hányados tömören fogalmazva azt fejezi ki, hogy mennyire koncentrált formában érkezett az impakt energia: minél kisebb ez az érték, az adott koregységben annál kevesebb becsapódás szabadította fel az adott energiamennyiséget, azaz annál koncentráltabb volt az energia-felszabadulás (az ismert adatok alapján). A krátereződés általános törvényszerűségeinek és a földi tektonikai-eróziós törvények összhatásaként az $[(F)/(B)]$ hányadosok értékeinek trendje nem monoton, de emelkedő jelleget mutat, ami szintén a földi erózió időarányosan növekvő hatékonyságára utal (azaz arra, hogy a rendelkezésre álló adatok alapján az jelenthető ki, hogy adott mennyiségű

becsapódási energia a jelen kor felé egyre inkább elaprózva érkezik a Földre). A kinyert adatok és a kihalások időbeli összevetéséből az olvasható ki, hogy abból a kilenc kihalásból, amely vizsgálható becsapódási szempontok alapján, öt esetben az $[(F)/(B)]$ hányadosok nagyon közel esnek 1-hez (1,31 és 0,91 közé). Három esetben kissé távolabb (0,56-0,25 között); ill. egy esetben viszonylag távol (0,09) állnak 1-től. A teljes földtörténeti időskálát tekintve az értékek sokkal tágabb (0,013 és 18,91 közé eső) szélső értékek között mozognak (4. ábra).

II. – A földi meteoritkráterek vízhálózati rajzolattípusai és hidrogeográfiai jellemzői

2.1. tézis – A földi meteoritkráterek vízhálózati rajzolatai jellegzetesen forma-specifikus rajzolati elemeket tartalmaznak, emiatt karakterizálhatóak; valamint az ismert kráterek felismerhetőségének (azaz a minta elemszámának) növelésével kihatnak az eloszlásokkal kapcsolatos következtetésekre

A kráterek vízhálózati rajzolattípusai, illetve a vízhálózati vizsgálatok szervesen kapcsolódnak a fentebb vázolt, eloszlásokkal kapcsolatos tézisekhez. Egyrészt (az egyéb eróziótípusokhoz hasonlóan) torzítják az eloszlásokat, azáltal, hogy a kráterek eltüntetésére törekednek; másrészt pedig bizonyos tekintetben pont eközben teszik jobban felismerhetővé a morfológiailag sok

esetben már nem feltűnő meteoritkrátereket, amennyiben a kráteren kialakult, forma-specifikus eróziós vízhálózati rajzolatot sikerül felismerni. Vizsgálataim alapján hidrogeográfiai szempontból két vízhálózati rajzolatípust különítettem el a földi becsapódásos kráterekhez kötődően: az *átfolyó rendszerű*; ill. a *nem-átfolyó rendszerű* kráterekét.

2.2. tézis. – Átfolyó rendszerű (ép) vízhálózati rajzollal rendelkező meteoritkráterek folyórajzlati jellemzői.

Az ilyen, viszonylag jól fejlett, teljes rajzollal jellemezhető folyóhálózatok kialakulásának (pl. a Manicouagan kráter esetében, ld. 5. ábra) a megfelelő éghajlati feltételek mellett előfeltétele a jól megtartott, viszonylag ép kráterforma is (ép törmeléktakaró és sánc, valamint morfológiailag jól elkülöníthető medence). Ilyenkor két vízhálózati rendszer alakul ki. Egy külső, amely a medencétől kifelé lejtő sánchrész és a szintén kifelé lejtő törmeléktakaró által meghatározottan fut, a kráter középpontjához képest koncentrikus és radiális futásirányú folyókból felépülve. Kialakul ezen kívül egy belső vízhálózat is, melynek fő jellemzője, hogy átfolyik a medencén. A medencén történő átfolyáshoz a folyóknak egyrészt be kell jutniuk a medencébe, a sáncon át, másrészt ki is kell onnan folyniuk (szintén a sáncon át). Ezeket a feltételeket két természetföldrajzi folyamat teszi lehetővé: a sánc *hátravágódásos átréselése*; ill. a *kapturák általi folyó-eltérítések*.

Átfolyó rendszerű (ép) vízhálózati rajzollattal rendelkező meteoritkráterek vízhálózatának fő jellemzői (7. ábra):

- Egynél több folyó táplálja a krátermedence vízhálózatát.
- Minden vizsgált esetben csak egy darab lecsapoló folyó vezeti el a medence vizét.
- A tápláló vízfolyások átréselési helyei, ill. a lecsapoló folyó kilépési pontja általában a sánc átellenes oldalain vannak, amely elrendeződés egyben a kráter tágabb környezetének fő lejtésirányát is tükrözi.
- A sáncon át belépő folyók a medencében haladva gyakran tükörszimmetrikus rajzollati mintát követve egyesülnek.
- A sánc külső peremein a nagyobb folyók és folyószakaszok lefutása koncentrikus rajzollatot alkot (a kráter középpontjához viszonyítva), ez segít a sánc eredeti kiterjedésének meghatározásában.
- A belső hálózat lecsapoló folyója és a külső folyóhálózat esetenként egyesülhet (a krátertől nagyobb távolságban), miután a lecsapoló folyó már kilépett a kráterből.
- A leginkább a kráterek sáncszerkezetének külső peremén előforduló kapturák és az ezek által kialakított folyó-eltérítések miatt ezen a részen gyakoriak az éles, gyakran közel derékszögű törések a folyók futásirányának rajzollatában.

- Bizonyos esetekben (pl. Vredefort-szerkezet) már akár egyetlen, a krátert szerencsésen átmetsző folyó ún. kvázi-szimmetrikusan cikkcakkos mintázata is utalhat a nagyobb kráterekre jellemző, koncentrikus-gyűrűs szerkezetre, ill. a nagyobb gyűrűk méretére, helyzetére és számára (6. ábra).

2.3. tézis. – Nem átfolyó rendszerű vízhálózati rajzolattal rendelkező meteoritkráterek folyórajzlati jellemzői.

Az előző típussal ellentétben, itt az eredeti kráterforma erodáltsága, roncsoltsága, vagy egyéb gátló tényező (pl. a medence és a törmeléktakaró részleges vagy teljes vízborítása) eredményezi a részlegesen kifejlődött, nehezen kategorizálható folyórajzlatot. Itt is megfigyelhető azonban, hogy ezeknek a krátereknek a viszonylag épebb formában megtartott részein még ilyenkor is törekszik a folyóhálózat a fentebb ismertetett jellegzetes rajzolatok kialakítására (pl. Charlevoix meteoritkráter).

Thesises

Preface

Acceptance of meteorite craters is the result of a long procedure, which began in the 17th. century. A new stage started at the turn of the 19-20th. centuries, when scientific attention focused on terrestrial meteorite craters. As a result, number of possible craters was increasing, and also the number of confirmed impact craters increased rapidly, mainly from the 1930's. In present days 183 craters can be regarded as confirmed impact structures. This number is lower with orders of magnitude, than the averages in the Solar System. This can be explained the effectiveness of terrestrial erosion processes and the intensity of active tectonic cycles (rift valley-subduction zone systems).

Aims

In the dissertation I would like to give an insight into my two main research areas, that are connected to each other.

In the first topic I investigate the possible principles and rules of distribution of terrestrial meteorite craters by diameter; age and present geographical location; and if these principles can be fit into the presently known

cratering rules of the Solar System (considering special terrestrial circumstances as well).

According to crater distributions there is the question of a possible casual link between terrestrial impact events (by impact energy) and the development of life on Earth.

In the second topic I made an overview on river drainage patterns of some terrestrial meteorite craters and drew some common conclusions for drainage patterns of impact structures. It can be linked to the topic of distributions in two ways: *one the one hand*, it can explain, how one of the most efficient terrestrial erosion form (the fluvial erosion) can erode craters; and *on the other hand*, it points out that while a fluvial system erodes a crater, the forming specific drainage patterns can make the finding of these craters more easier.

Experimental procedure

For examination of distributions I used the official database of terrestrial meteorite craters (Earth Impact Database – EID). In some cases I had to modify the data (e.g. distributions by continents or diameter of crater fields). Topographic presentation of craters was also based on EID's crater coordinates. Distribution maps were made with ArcGis software. For 3D presentation of

some craters I used Google Earth and SRTM data processed with Global Mapper.

Statistical analyses and graphs were made by using Microsoft Excel. Based on different types of crater data (age, diameter, geographical coordinate) I calculated various statistical indexes, and after I fit these index numbers into a geochronological time scale (based on International Stratigraphic Chart data). These index numbers allow us to estimate the roles and interactions between original cratering tendencies and subsequent distortion effects of erosion.

Drainage pattern maps are based on Microsoft Encarta World Atlas maps, post-processed with graphical softwares. Main purpose was to identify erosion and geologically preformed drainage systems and visual identification of catchment areas and river flow directions (e.g. concentric, radial). As far as possible, I compared drainage pattern maps to geological maps of the given crater, to identify the roles of freely developed and geologically preformed fluvial systems. I also investigated the possible role of only one single river channel (main river of the crater's river system, instead of the whole drainage system) to identify the geological structure of an impact crater. Besides these I made an idealized sketch for possible drainage patterns of the terrestrial meteorite craters for the better understanding

of fluvial crater-erosion, and to give an aid to discover unknown impact craters.

Thesis-form interpretation of the scientific results

The next chapters summarize my scientific results, divided in two main chapters: theses and subtheses of the first chapter (I.) explains the principles of terrestrial crater distributions; while the second chapter (II.) is about hydrogeographical features and drainage systems of meteorite craters. These two chapters are connected to each other, because fluvial erosion wipes out impact craters efficiently, thus reduces the number of craters. But on the other hand, the simultaneously evolving and specific drainage pattern can help us to identify unknown impact craters (increasing the number of known craters).

I. – Distribution of the known terrestrial meteorite craters

Thesis 1.1. – Distribution features of known terrestrial impact structures can be set in a coherent system therefore distributions are not absolutely stochastic. Factors below determine the distribution of known craters:

a, Plate tectonics. Craters move away from the coordinates of their original place of form through

plate movements. These tectonic cycles stamp out many craters.

b, Atmosphere. Smallest meteors (up to meters or tens of meters in diameter) perish during atmospheric entry (through fragmentation and melting). Therefore smallest craters, under 10 m in diameter (which are the most common on planetary bodies without atmosphere) are absent, or their number is very small on Earth (partly because of the fast erosion of these small craters).

c, Climate. Climate related erosion features influence the craters' morphological characteristics. Climate related vegetational zones are also important through influencing the craters' visibility.

d, Human factor. This factor does not influence crater distribution through anthropogenic way, but influences it through discovering mechanisms of new craters, because discoveries depend e.g. on population density or state of economic development.

Thesis 1.2. – Certain principles of terrestrial crater distribution reflect the cratering principles of the Solar System with some distortions.

a, *The smaller the craters are, the larger their number will be (it reflects the size-scaled distribution of planetary bodies; and the higher chance of forming for a smaller crater on a given surface under a given time-period; or in other words: the larger a crater is, the higher will be the chance for it to be older).*

This is true for the Earth, except for the smallest craters (meters in diameter) because of two reasons: smallest meteorites perish during atmospheric entry and they are eliminated by fast erosion (see also: 1.1.b).

b, *Number of craters decreases towards the larger diameter categories.*

In the categories above 50 km in diameter of terrestrial craters this relationship does not apply and distribution becomes stochastic (Fig. 1. – contains data of 181 craters, because diameter data for two craters were uncertain). The reason for it is that larger craters forming more stochastic than smaller ones, stamped out by erosion and plate tectonics (see also in previous paragraph: *the larger a crater is, the higher the statistical chance will be for it to be older*). The resultant low number of craters in these categories does not allow statistical trends to see (we know only 13 craters in the >50 km diameter categories). Another factor for uncertainties is, that we can not be sure

whether we have discovered all of the craters >50 km in diameter, or not.

c, The older a surface is, the more craters can be found on it.

It reflects the growing probability for an impact event with higher age of a surface. It can be seen also on Earth, that higher crater intensity is found on the oldest surfaces (Baltic shield, Canadian shield, South Africa, Australia). On Baltic- and Canadian shields the most cratered areas coincide with the extent of Pleistocene ice-sheets and geomorphological exhumation generated by ice-movements (Canadian- and Baltic shields mostly can be regarded as exhumed shields). We have no information on the number of craters located on sedimentary covered shields, but large number of craters on the buried but well explored Ukrainian shield suggests similar numbers on other buried shields as well. In South-Africa, Sahara and Australia the desert climate and the lack of rich vegetation makes the craters more visible.

Thesis 1.3. – Some cratering principles are valid only for the Earth, which can be regard as a kind of interference between the cratering principles of the Solar System and principles of the special terrestrial erosion and tectonic principles.

a, Spatial distribution of terrestrial craters shows latitude zonality, which coincides with climatic-vegetational zonality.

Most significant example for it is the tropical zone, where there are only 1-2 craters in the tropical rainforest zone, while in the neighbouring savannah zones dozens of craters can be found. Noticeable furthermore is the lack of craters in polar zones (Greenland and Antarctica). This implies the possible shield function of ice sheets against impacts, and their simultaneous role in crater-exhumation at icemass-basement border.

b, Diagrams of crater diameter categories by continents divide continents in two groups.

First group consists of Europe and North-America; second is Asia, Africa, Australia and South-America (Fig.2). Differences between them can be found in the smaller diameter categories (under 30 km in diameter [$d > 30 \text{ km}$]): the two continents of the first group have much more craters in these categories on average than the second group's four continents. Towards larger diameter categories these statistical differences decrease rapidly and became more stochastic, according to the decreasing number of craters in the larger crater diameter categories (see also 1.2.b). The reason of this difference is the difference between the evolutionary history of the two

continent groups. And this difference can be derived from the large Pleistocene ice coverings of North-America and Europe, while the other four continents were iceless. These large ice sheets exhumed the small craters ($d > 30$ km), in my opinion. Spatial distribution of these small craters also supports this theory.

c, Only craters with age data (118) retractable in geochronological distribution examinations. These examinations imply, that moving forward from past to present, distributions by age tends to reflect the cratering principles of the Solar System more-and-more.

Main reason of this is that going back in time erosional and tectonic processes become more efficient (because this kind of efficiency is a function of time), and therefore crater related data become increasingly stochastic. To make these studies easier I worked out two statistical indexes: one of these is *cratering intensity* which shows impact events per one million years (My) for each geochronological unit (e.g. middle Devonian or upper Triassic) (*impacts/My*). The other index is the *indirect energy-releasing index* which shows the sum of the crater diameters formed during one million years in the same geochronological units (*km/My*). In this index-number crater diameter was used as a function of released impact energy. These index numbers are concise

indicators of the number of impact events and released impact energy during the known history of the Earth. Important to note, that these data are based only on known craters with known ages, therefore sometimes they show the real processes with distortions. Considering the above mentioned, the following conclusions can be made from the Precambrian up to our days:

Precambrian

- From the *Archean* there are no known meteorite craters.
- From the *Proterozoic* we know a few, relatively large craters (smaller ones had been eroded during the billions of years). An interesting exception is the oldest known crater (Suavjarvi, Karelia, paleoproterozoic, 2400 My) that is a relatively small one (d=16 km), while the average diameter of known paleoproterozoic craters is 73.2 km.

Paleozoic

- One characteristic tendency can be seen during the entire Paleozoic: graphs of *cratering intensity* and *indirect energy-releasing index* are synchronized with time. It means that the longer the duration of a given geochronological unit is, the higher these index numbers will be in it. This implies interference

between cratering principles of the Solar System and erosion-tectonic principles of the Earth.

Mesozoic

- The above mentioned synchronicity is disappears, especially for the *indirect energy-releasing index*.

Cenozoic

- Disappearance of the synchrony of graphs continues and becomes more characteristic, reflecting the cratering tendencies of present days, especially in the *Holocene*:

→ Cratering intensity and indirect energy-releasing index values began to grow rapidly in the *Holocene*, while averaged diameters of craters and duration of the given geochronological unit (Holocene) are decreasing strongly, compared to previous units. These growths in cratering intensity are „virtual”, and can be derived from the efficient erosion and tectonic processes eliminating these small craters more effectively, looking back in time. In contrast, the 17 000 years of the Holocene were too short for erosion and tectonics to eliminate even the smallest craters.

Thesis 1.4. – There is a possible causal link between presently known impact events and ecological mass extinctions.

a, Impact events can disturb ecological processes by releasing impact energy. The main question is whether impact events can cause extinction by themselves, or can only speed up or intensify a previously started extinction event. The other question is in case impact events have any role in extinctions, which way is more efficient: one big, or many small impacts in a relatively short period of time.

To answer this question, I defined a new index number for each geochronological unit, the so called $[(F)/(B)]$ index, where (F) is the above described *indirect energy-releasing index (km/My)* and (B) is the *number of known impact craters (pc)*. Low $[(F)/(B)]$ index means that impact energy dissolves in only few (or one) impact events, while high index means that impact energy dissolves in several impact events. Nine extinctions (with overlapping impact events) of the known 12 global extinctions can be studied with impact aspects. As a result of interference between cratering principles of the Solar System and principles of the special terrestrial erosion and tectonic principles, the $[(F)/(B)]$ index (calculated from presently known crater-data) tend to increase from past to present. Acquired data show that the $[(F)/(B)]$

index values are very close to 1 (between 1.31 and 0.91) in the case of five extinctions. In three cases between 0.56-0.25 and in one case 0.09 (out of the nine, that have impact overlapping). This also implies the interference between general principles of cratering in the Solar System and terrestrial erosion processes.

II. – Hydrogeographical features and drainage patterns of terrestrial meteorite craters.

Thesis 2.1. – Drainage patterns of terrestrial impact craters contain characteristic features.

Drainage patterns of craters and the theses of crater-distribution are connected to each other by two ways: on the one hand, fluvial erosion increases speed of crater elimination. 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. Based on hydrogeographical aspects, I separated two types of drainage systems according to meteorite craters: *hydrogeographically open* and *hydrogeographically closed systems*.

Thesis 2.2. – Characteristic features of hydrogeographically open drainage patterns.

Characteristic and well preserved crater morphology (ejecta, rim and basin) and relatively humid climate are needed for the development of this type of drainage system on impact forms. In this case two drainage systems develop: an outer system according to the outward slopes of the rim and ejecta including concentric and radial oriented rivers (referenced to the centre of the crater). Another drainage system also forms running through the crater basin. To run into and out of the crater, rivers must cut through the crater's rims by headward erosion and captures.

Features of hydrogeographically open drainage patterns:

- More than one river flow into the crater basin (feeding rivers).
- Only one river flows out of the crater (drain river).
- Headward erosion points of the above mentioned two river types (feeding rivers and drain river) are on the opposite sides of the crater rim. These spatial positions reflect the main slope directions of the crater and its surrounding area.
- Feeding rivers often form a symmetric pattern in crater basins.

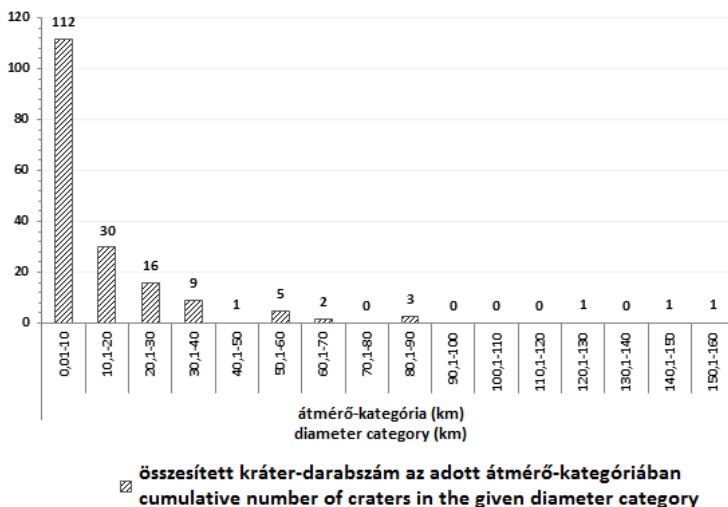
- Rivers flow alongside the outer rims can form a concentric pattern (referenced to the centre of the crater), that implies the original area of ejecta blanket.
- Drain river of the basin and the surrounding river systems sometimes unite in a greater distance from the crater.
- Captures and resulted changes can be seen as sharp, rectangular like fractures in river flow directions mainly alongside the outer parts of the rim.
- In some cases (e.g. the Vredefort structure) a single river can also imply impact origin by cutting through the structure. If this occurs, potentially forming quasi-symmetric and characteristic zig-zag pattern refers to impact structures with concentric structure (Fig. 6).

Thesis 2.3. - Characteristic features of hydrogeographically closed drainage patterns.

In contrast to the previous type, in this case the crater is eroded, or other factors traverse the forming open-systems (e.g. water coverage of the crater or arid climate). However, characteristics mentioned in Thesis 2.2. may form also on morphologically well preserved segments of these craters (e.g. Charlevoix meteorite crater).

Melléklet az ábrák jegyzékével

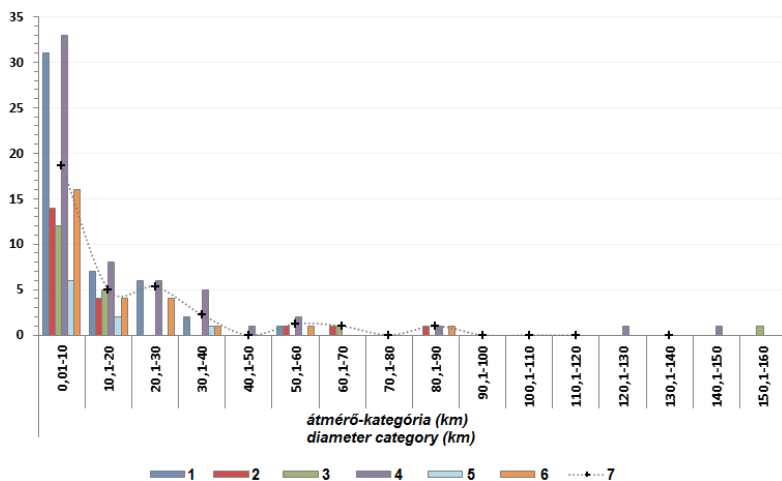
Appendix with list of figures



1. ábra. Az ismert földi meteoritkráterek átmérő-kategóriák szerinti összesített eloszlása (181 kráter adatai alapján).

Figure 1. Distribution of the known terrestrial meteorite craters by diameter categories (based on 181 crater data).

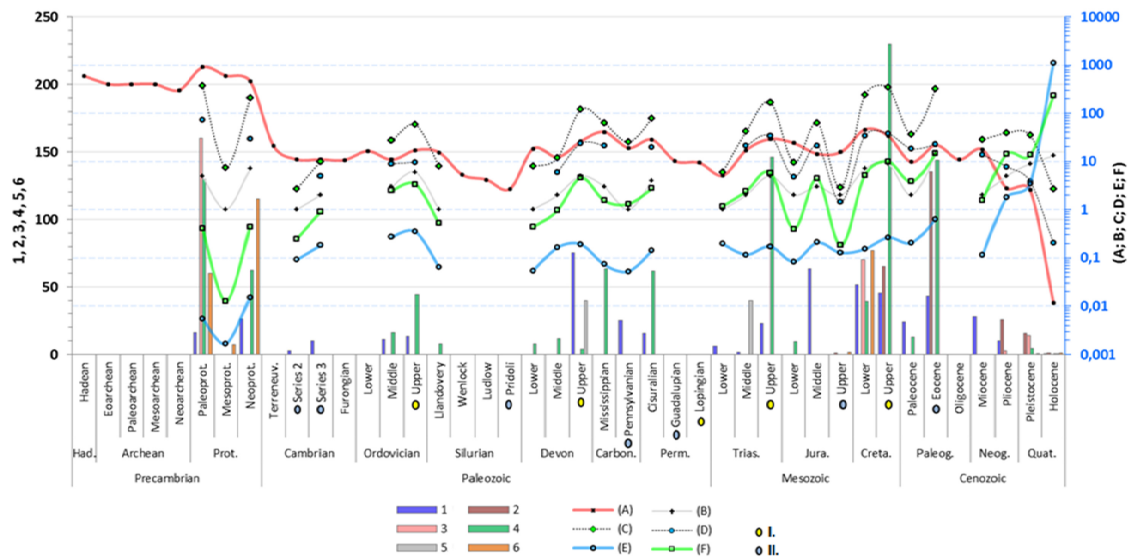
(módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés / based on modified Earth Impact Database, 2012 data)



2. ábra. A földi meteoritkráterek átmérő-kategóriák szerinti eloszlása, kontinensenként. 1 – Európa; 2 – Ázsia; 3 – Afrika; 4 – Észak-Amerika; 5 – Dél-Amerika; 6 – Ausztrália; 7 – átlagos kráterdarabszám az adott átmérő-kategóriában.

Figure 2. Distribution of terrestrial meteorite craters by diameter categories on the continents. 1 – Europe; 2 – Asia; 3 – Africa; 4 – North-America; 5 – South-America; 6 – Australia; 7 – average number of craters in the given diameter category.

(*módosított Earth Impact Database, 2012 adatok alapján saját szerkesztés / based on modified Earth Impact Database, 2012 data*)



3. ábra. Az ismert korú földi meteoritkráterek alapvető statisztikai jellemzőinek változásai a földtörténeti időskálán (jelmagyarázat a következő oldalon).

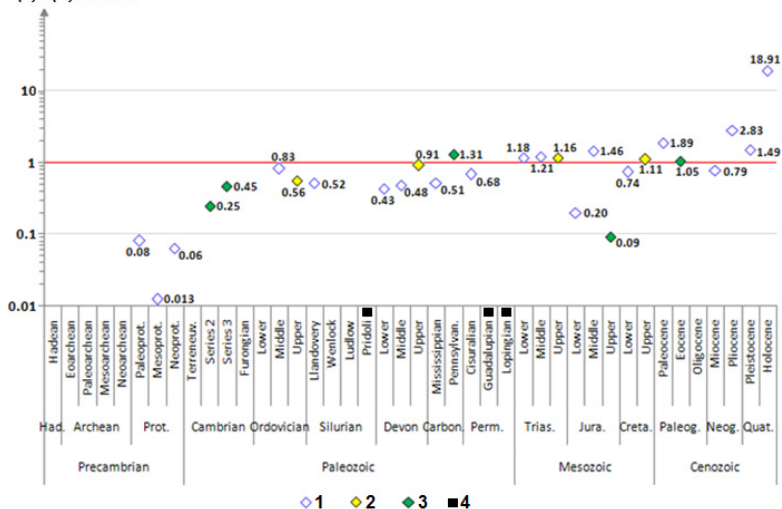
Figure 3. Statistical features of terrestrial meteorite craters with known age data, by geochronological time-scaling (legend on next page).

Jelmagyarázat a 3. ábrához (folytatás az előző oldalról): 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 energiafelszabadulási intenzitás $[(C)/(A) = (\text{km}/\text{millió év})]$. I. – nagy kihalási esemény; II. – kis kihalási esemény.

Legend for *Figure 3.* (continued from previous page): 1-6. – summarized values of crater diameters by continents, where 1 – Europe, 2 – Asia, 3 – Africa, 4 – North America, 5 – South America, 6 – Australia. (A-F) – staistical values, where (A) – duration of the given geochronological unit (million years [My]); (B) – number of craters in the given geochronological unit (pieces [pcs]); (C) – summarized diameter of the Earth's craters in the given geochronological unit (km); (D) – averaged diameter of the Earth's craters in the given geochronological unit (km); (E) – cratering intensity $[(B)/(A) = (\text{pcs}/\text{My})]$; (F) – indirect energy-releasing index $[(C)/(A) = (\text{km}/\text{My})]$. I. – big extinction event; II. – small extinction event.

(módosított Earth Impact Database, 2012 és International Stratigraphic Chart, 2009 adatok alapján saját szerkesztés / based on modified Earth Impact Database, 2012 and International Stratigraphic Chart, 2009 data)

(F) / (B) hányadosok
(F) / (B) indexes

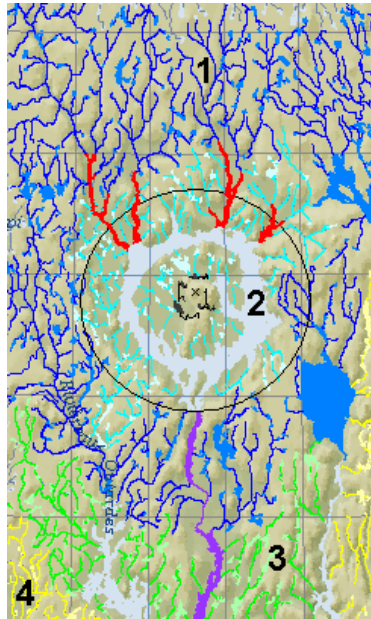


4. ábra. Az (F)/(B) hányadosok az egyes földtörténeti

koregységekben, valamint lehetséges kapcsolatuk a földtörténeti kihalásokkal, ahol (F) = [a kráterek összesített átmérője az adott koregységben (km)] / [az adott koregység időtartama (millió év)] = [km/millió év]; ill. (B)=[a kráterek darabszáma az adott földtörténeti koregységben (db)] = [db]. 1 – (F)/(B) hányados kihalás nélkül; 2 – (F)/(B) hányados nagy kihalással, 3 – (F)/(B) hányados kis kihalással; 4 – kihalás (F)/(B) hányados (ismert becsapódás) nélkül.

Figure 4. (F)/(B) indexes in the geochronological units, and their possible relation to the extinction events, where (F) = [summarized diameter of the craters in the given geochronological unit (km)] / [duration of the given geochronological unit (My)] = [km/My]; and (B) = [number of craters in the given geochronological unit (pcs)] = [pcs]. 1 – (F)/(B) index without extinction; 2 – (F)/(B) index with big extinction, 3 – (F)/(B) index with small extinction; 4 – extinction without (F)/(B) index (lack of known impact event).

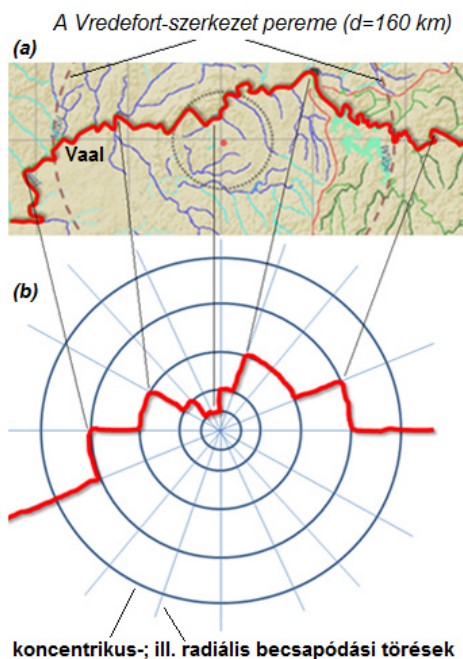
(*módosított Earth Impact Database, 2012 és International Stratigraphic Chart, 2009 adatok alapján saját szerkesztés / based on modified Earth Impact Database, 2012 and International Stratigraphic Chart, 2009 data*)



5. ábra. Jól kifejlett, átfolyó rendszerű vízhalózati példája: a Manicouagan meteoritkráter vízhalózata. A fekete kör a kb. 85 km-es átmérőt jelöli. Jelmagyarázat: 1 – a kráter környékének faágas folyóhalózata; 2 – a krátermedence vízhalózata; 3, 4 – a déli előtér vízhalózata. Pirossal kiemelve a medencét tápláló hátravágódások; lilával a lecsapoló folyó látható.

Figure 5. Well developed open system drainage on the example of Manicouagan meteorite crater. Black circle shows the diameter of 85 km. Legend: 1 – dendritic pattern of the crater surroundings; 2 – fluvial system of the crater basin; 3, 4 – drainage of the southern foreground. Red: headwardings of the feeding rivers. Purple: drain river of the basin.

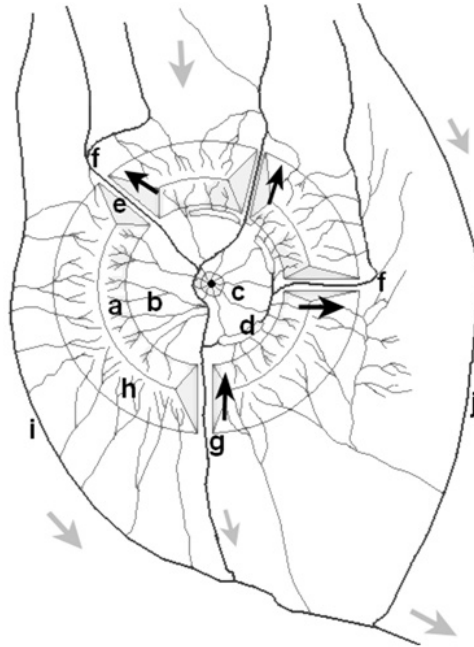
(a térkép területe / map area: 280×190 km)



6. ábra. Példa a szerkezeti elemek által reformált folyószakaszok szerepére, a Vredefort-szerkezeten. A Vredefort (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 törésrendszerek mentén. A Vaal folyó és a modell egymásnak megfelelő főbb vonásait (a szerkezetből adódó, jellegzetesen preformált folyórajzlati-töréseket) a fekete vonalak kötik össze.

Figure 6. Example for the roles of geologically preformed rivers, on the example of Vredefort-structure. Vredefort (a) is a good example for that only one river's direction can show the crater's structure (red coloured Vaal river). The sketch below (b) is a structural model, which shows the forming mechanism of this characteristic zig-zag

pattern, alongside impact generated faults. Black lines link identical fractures in river's run direction between Vaal's pattern and the model.



7. ábra. A meteoritkráterek lehetséges vízhálózati rajzolattípusai. 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 – kapturas folyóeltérítés; g – a lecsapoló folyó átréselése; h – dendrikus; i, j – ívelt (a törmeléktakaró külső pereme által meghatározottan).

Figure 7. Possible drainage patterns of meteorite craters. The sketch is idealized, therefore contain elements, which are rare together on one a given crater in nature. Grey arrows show slope directions; while black arrows show directions and locations of headward erosion through rim. Legend: a – dendritic; b, c – centripetal and radial; d – arcuate and concentric; e – headward segment; f – river captures; g – headward movement of the drain river; h – dendritic; j – arcuate (forced by the outer borders of the ejecta-blanket).

A disszertációhoz kapcsolódó publikációk listája

Publications according to the dissertation

Szakmai folyóiratokban / In professional journals

- [1] A. Gucsik; T. Endo; H. Nishido; K. Ninagawa; M. Kayama; Sz. Bérczi; Sz. Nagy; P. Ábrahám; Y. Kimura; H. Miura; I. Gyollai; I. Simonia; P. Rózsa; J. Posta; D. Apai; K. Mihályi; M. Nagy; U. Ott (2013): Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of forsterite from Kaba meteorite: An application to study of the hydrothermal alteration of parent body. *Meteoritics & Planetary Science*. *IF értéke: 2,8 (megjelentetésre elfogadva/in press)*
- [2] 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 Közöny 139/4*, pp. 367-378.
- [3] 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.
- [4] K. Mihályi, (2008): Hydrogeological features of terrestrial meteorite craters. *Acta GGM Debrecina, Geology, Geomorphology, Physical Geography Series Vol. 3.*, pp. 61-73.
- [5] K. Mihályi, A. Gucsik (2008): Distributions of the terrestrial meteorite craters: A review. *Meteoritics & Planetary Science 43, Nr 7, Supplement, A15–A178. (a folyóirat IF értéke 2008-ban: 1,993)*

***Konferencia-kiadványokban / In conference
proceedings***

- [6] A. Gucsik; K. Mihályi; K. Dobos; Sz. Nagy; Sz. Bérczi; H. Hargitai (2010): Terrestrial meteorite craters and their geomorphological consequences: An overview. *Proceedings of the International Meteor Conference, Poreč, Croatia, 24-27 September, 2009* Edited by Andreic, Z.; Kac, J. *International Meteor Organization, ISBN 2978-2-87355-022-6*, pp. 43-67.
- [7] K. Mihályi, A. Gucsik, J. Szabó (2008): Drainage patterns of terrestrial complex meteorite craters: A hydrogeological overview. *39th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XXXIX), held March 10-14, 2008 in League City, Texas. LPI Contribution No. 1391.*, p.1200.
- [8] K. Mihályi, A. Gucsik, J. Szabó, Sz. Bérczi (2009): Facts theories and further questions around the Ries-Steinheim simultaneous impact event. *40th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XL), held March 23-27, 2009 in The Woodlands, Texas*, id.1542
- [9] K. Mihályi, J. Szabó and A. Gucsik (2008): Geological features and valley networks of terrestrial impact structures. *Planetológia és a Naprendszer Kozmokémiája (III. Planetológiai Szeminárium- A planetológia helye az oktatásban) c. konferencia (ELTE), abstract*
- [10] Mihályi K., Gucsik A., Szabó J. (2008): A földi meteoritkráterek átmérő szerinti eloszlásai. *IV. Magyar Földrajzi Konferencia, Debrecen (konferenciakötet, ISBN 978-963-06-6004-4)*, pp. 147-153.

- [11] Mihályi K., Gucsik A., Szabó J. (2009): A Nördlingen-Ries és a Steinheim meteoritkrátereket létrehozó szimultán becsapódás mechanizmusa és lehetséges következményei. *Geográfus Doktoranduszok IX. konferenciája*, Szeged (megjelent: *Természetföldrajzi folyamatok és formák. Geográfus Doktoranduszok IX. Országos Konferenciájának Természetföldrajzos Tanulmányai*, 2009, Szeged, ISBN 978-963-482-923-2, pp. 197-219.
- [12] Mihályi K.; Gucsik A., (2010): A biztos korral rendelkező földi meteoritkráterek eloszlásai és lehetséges szerepük a földtörténeti kihálásokban. In: Interdiszciplinaritás a természet- és társadalomtudományokban. *Tiszteletkötet Szabó József geográfus 70. születésnapjára.* (szerk.: Lóki J.) Debrecen, 2010 (ISBN 978-963-318-062-4), pp. 237-242.
- [13] A. Gucsik.; T. Endo; E. Nakazato; H. Nishido; K. Ninagawa; M. Kayama; Sz. Bérczi; Sz. Nagy; P. Ábrahám; Y. Kimura; I. Gyollai; I. Simonia; P. Rózsa; J. Posta; M. Nagy; K. Mihályi; D. Apai; P. Futó (2011): Cathodoluminescence characterization of the forsterite in Kaba Meteorite: An astromineralogical application. *42nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1608*, p.1157.
- [14] A. Gucsik; H. Nishido; K. Ninagawa; I. Simonia; Sz. Berczi; Sz. Nagy; K. Mihályi (2010): In-situ planetary cathodoluminescence microscopy and spectroscopy applied to the robotic missions in Mars. *38th COSPAR Scientific Assembly. Held 18-15 July 2010, in Bremen, Germany*, p.8.
- [15] A. Gucsik.; H. Nishido; K. Ninagawa.; Sz. Bérczi; Sz. Nagy; P. Ábrahám; I. Gyollai; T. Akira; I. Simonia; P. Rózsa; D. Apai; K. Mihályi; M. Nagy; J. Posta (2012): Calcium-aluminium

inclusion in the Kaba meteorite and its application to
astromineralogy. *Japan Geoscience Union Meeting 2012*