

A Nördlingen-Ries és a Steinheim meteoritkrátereket létrehozó szimultán becsapódás mechanizmusa és lehetséges következményei

Mihályi Krisztián¹, Gucsik Arnold^{2,3}, Szabó József¹

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

²*Max Planck Institute for Chemistry, Department of Geochemistry, D-55020 Mainz, Joh.-J.-Becherweg 27., Germany*

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

Bevezetés

A becsapódásos kráterek (impakt-szerkezetek) a Naprendszer szilárd felszínnel rendelkező égitesteinek nagy részén a legáltalánosabb felszíni formaelemnek tekinthetők. Közös jellemzőjük a körszimmetrikus megjelenés, amely azonban nem feltétlenül szükségszerű: a ferdeszögű becsapódások (kb. 5-10 fok alatt) (Scherler et al., 2006), illetve a becsapódás utáni (poszt-impakt) geológiai folyamatok, amelyek nem feltétlenül 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 korára.

A meteoritkráterek földtudományokban betöltött szerepe az utóbbi évtizedekben jelentősen megnövekedett, azzal összefüggésben, hogy az egyértelműen becsapódásos eredetűnek elfogadott kráterek és kráterroncsok száma rohamosan emelkedett: 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 176 darab, bizonyítottan becsapódásos eredetű kráter ismert a Földön (Earth Impact Database, 2009). Mindezek mellett az egyéb adatbázisok (pl.: *SEIS database*; *omzg.ssc.ru*) még kb. 600-700 egyéb olyan formát tartanak számon, amelyek kapcsán a becsapódásos eredet sem zárható ki teljesen (az ilyen esetek túlnyomó többségében csupán valamilyen körszimmetrikus felszíni megjelenés alapján feltételezhető - többek között - akár az extraterresztrikus eredet is). Ez azonban önmagában közel sem elegendő, ui. a becsapódásos eredet egyértelmű bizonyításához jól meghatározott ásványtani és geokémiai jellegzetességek kimutatása szükséges, mint pl. különféle kristály-deformációk (főleg a kvarckristályokban); impakt-breccsák és olvadékok; ozmium- és iridium-anomáliák, stb. (French, 1995).

Az 1970-es és az 1980-as évek fordulóján jelentős előrelépés történt a meteoritkráterek és a becsapódási események kutatásának, ill. megítélésének vonatkozásában: olyan feltevések és eredmények láttak napvilágot, amelyek arra utaltak, hogy a becsapódások nem csak a bolygók (konkrétan a Föld) korai fejlődéstörténetében játszottak szerepet, és nem csak geológiai-geokémiai szempontból jelentősek. Alvarez (et al., 1981) vetette fel azt az elméletet, amely szerint a kréta-tercier határán (rövidítve: K-T határ), 65 millió éve bekövetkezett tömeges kihalás összefüggésbe hozható egy globális hatású, katasztrofális

meteorit-becsapódással (amely kihalásnak legismertebb vonatkozása a dinoszauruszok 65 millió évvel ezelőtti eltűnése). Az elmélet a Föld több, egymástól távoli pontján, a K-T határokon fellelhető (agyag)rétegek nagyon magas iridium-tartalmán alapszik: ilyen magas iridium-koncentráció (még hozzá globális elterjedésben) csakis kozmikus eredetű test becsapódásából származhatott. A becsapódás eredményezte és a globális felső-kréta iridium-anomáliához köthető, feltételezett (de akkor még nem ismert) krátert azután Glen T. Penfield fedezte fel a Yucatán-félszigetnél. Ez a kráter a kb. 180 km átmérőjű, 65,4 millió éves Chicxulub meteoritkráter, félig a Yucatán-félsziget alatt, a Mexikói öbölben, több száz méter vastag üledéktakaró által befedve. Mindezek után az addig sokat támadott elmélet elfogadást nyert tudományos körökben, bár egyes szerzők még napjainkban is vitatják az ok-okozati összefüggést a Chicxulub becsapódás és a késő-kréta kihalás között (Keller-féle hipotézis) (Keller, 2008). Jelen esetben pedig azért fontos mindez, mert nyomatékosan felhívta a figyelmet arra, hogy a becsapódások – bár a jelenlegi valószínűségük rendkívül csekély (főleg a Chicxulub nagyságúaké) – még akár napjainkban is drasztikus behatásként érhetik a bolygókat (még ha a Chicxulub-eseménynél jóval kisebbek is), köztük a Földet is, annak ellenére, hogy az ilyen események főleg az égitestek korai fejlődéstörténetére voltak jellemzőek.

A földi impakt szerkezetek, (jelenleg 176 darab, bizonyítottan becsapódásos eredetű kráter ismert) (Earth Impact Database, 2009) esetében kimutathatóak bizonyos törvényszerűségek a méret (átmérő), ill. a kor szerinti eloszlásokat illetően (Mihályi és Gucsik 2008), annak ellenére, hogy bolygónk geológiailag igen aktív, illetve meteoritkráterekben rendkívül szegény égitestnek számít. A Naprendszer egyéb, szilárd felszínnel rendelkező (és kellő részletességgel megfigyelhető) égitesteinek esetében is kimutathatóak ezek a törvényszerűségek. A Föld jelenlegi kráterszegénységében bolygónk geológiai aktivitása mellett a légkörnek is jelentős szerepe van: túl alacsony becsapódási szög esetén lepattan a meteorit a légkör külső rétegeiről, mint pl. ahogyan azt az 1972-ben megfigyelt Teton-kisbolygó (más néven a Great Daylight Fireball) ~1000 km-es útvonalhosszú, felső-légköri szakaszon megfigyelhető „lepattanása” is megmutatta. Ha pedig elégséges a becsapódási szög a légkör mélyebb rétegeibe történő belépéshez, de túl gyors-, kicsi- vagy instabil a test, akkor a légkör közegellenállásával felemésztí az ilyen meteorokat, vagy pedig szét darabolódásra (fragmentálódás) kényszeríti 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 mérethatár alatt a meteorit nagy valószínűséggel már nem éri el egy darabban a felszínt (ez a mérethatár nagyban függ a becsapódó test anyagi minőségétől, a légkör szerkezetétől és a belépési sebességétől). Ennek eredményeként a keletkező törmelék vagy elég/lelassul a légkörben, vagy pedig sok, kisméretű krátert hoz létre (földi körülmények között jellemzően méteres, ill. néhányszor tíz- vagy százméteres átmérőjű kráterekből álló *krátermezők*, nagyságrendileg ~5-100 kráterrel), amelyek erózióval szembeni ellenálló képessége kisebb, mint ha az adott meteorit egy darabban csapódott volna be, egyetlen, nagyobb méretű meteoritkrátert alakítva ki ez által. Ilyen krátermezők a Földön is ismertek: Kaalijärvi (Észtország), Morasko (Lengyelország), Henbury (Ausztrália).

Ezek mellett meg kell még említeni a kettős kisbolygók (kisbolygó és holdja), ill. a légkörben mindössze két darabra széteső meteoritok becsapódása által kialakított kettős krátereket is. Pl.: Kara és Ust Kara kráterek (Észak-Oroszország), Gusev és Kamensk (Nyugat-Oroszország); Clearwater West és East (Kanada), valamint ide tartozik a Nördlingen-Ries és a Steinheimi-medence kráterkettőse (Németország) is. A különbség a krátermezők és a kettős kráterek között nem csak a képződő kráterek számában nyilvánul meg, hanem a kráterek szerkezetében is: a földi krátermezők kis krátereik jellemzően ún. egyszerű kráterek; még a kettős kráterek több tíz km (de minimum néhány km) átmérőjűek és komplex szerkezetűek lehetnek (örzik a becsapódási célterület

hidrosztatikai mozgásának és a becsapódáskor fellépő sokk-hullámoknak a nyomait mind mikro-, mind pedig makro szinten).

Bár bolygónk becsapódásos kráterekben rendkívül szegény (a Naprendszer ismert, szilárd felszínnel rendelkező égitestei közül az egyik leggyéribben kráterezett), az a lehetőség, hogy impakt formái testközelségből 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, de ma már több laboratórium (pl. Ames Vertical Gun Range) és fejlett szimulációs programok (pl. a Hydrocode-simulation) is segítik a kísérleti és terepi megfigyelések értelmezését.

A Földön a becsapódás után egy ideig a felszabadult hő (amely nem csak az olvadákképződésben nyilvánulhat meg, hanem hidrotermális aktivitásban is; de okozhatja a kidobott törmeléktakaró hőenergiája is) (Hofmann et al., 2001), valamint hosszabb távon az eróziós-akkumuláció folyamatok jellemző együttese alakítja ezen formák utótörténetét, amelyet poszt-impakt fázisnak nevezhetünk.

A tanulmány célja

A jelen tanulmány célja – szakirodalmi adatok alapján – átfogó kép nyújtása a Ries-Steinheim kettős becsapódás vizsgálata során eddig elért eredményekről és a további, még megválaszolásra váró kérdésekről. A kráterek, ill. a ZERIN (Ries Kráterkutató Központ) felkeresése a távolabbi célkitűzések között szerepel, s ennek során előreláthatólag terepi vizsgálatok és laboratóriumi mintagyűjtések végezhetőek majd el. A tanulmány ezen felül felvet néhány új kérdést is a Ries-kráter törmeléktakarójának képződése, ill. jelenkori morfológiája és vízhalózata kapcsán.



1. ábra. A jelenleg ismert földi meteoritkráterek földrajzi eloszlása. Zölddel a Nördlingen Ries-, pirossal kiemelve pedig a Steinheim-meteoritkráter látható. A korongok átmérői nem tükrözik a meteoritkráterek valódi átmérőit és egymáshoz viszonyított távolságait.
(McCall, 2009; módosítva)

A Nördlingen Ries és a Steinheim meteoritkráterek jellemzése

A *Nördlingen Ries meteoritkráter* Németország déli részén, Bajorországban található, átmérője ~24 km; a kialakult végleges kráter mélysége kb. 600-700 méter lehetett (Kenkmann és Ivanov, 2006). A *Steinheim meteoritkráter* (gyakran említik Steineimi-medenceként is) a Ries krátertől kb. 42 km-re, DNy-ra fekszik, amelynek átmérője ~3,8 km; eredeti mélysége kb. 200-220 méter volt (Tütken et al., 2006). A meteoritkráterek középpontjainak földrajzi koordinátái: Ries: É 48°53', ill. K 10°37'; Steinheim: É 48°41', ill. K 10°4'.

A utóbbi időben egyre újabb koradatok láttak képződésükről napvilágot, és annak ellenére, hogy az abszolút értékek némileg bizonytalanok, az egymáshoz viszonyított korértékek minden módszernél azonosnak adódtak: a szakirodalmi hivatkozások többsége ~15 (15,1) millió éves kort említ (Hofmann et al. 2001; Pierazzo et al., 2001; Stöffler et al., 2002; Osinski et al., 2003; Ivanov és Stöffler, 2005). Újabbban azonban a 14,3-14,5 millió éves kort feltüntető források is gyakoriak (Osinski, 2004; Kenkmann és Ivanov, 2006; Buchner et al., 2007; Stöffler, 2008). Más szerzők ~14,7 millió évet említenek a Ries becsapódáskor létrejött Moldavit-tektitek korára (Di Vincenzo és Skála, 2008) (ld. lejjebb). Az ikerkráter nagyobbik tagja, a Ries jelenleg a Föld egyik legjobban tanulmányozott meteoritkrátere (ez részben igaz a Steinheimi-medencére is).

Ez a térség a szimultán (kettős) becsapódásoknak (és közvetve a meteoritok feldarabolódásának, ill. kettős kisbolygók becsapódásának), a becsapódási olvadék- és breccsaképződésnek, a törmeléktakaró különböző típusainak (közeli és távoli törmeléktakaró), valamint a becsapódás utáni (poszt-impakt) folyamatok (hidrotermális aktivitás, tavi feltöltődés) vizsgálatának klasszikus mintaterülete, amely sok információt szolgáltat a meteoritkráterek, mint ökológiai élőhelyek szerepére is. Több, általánosan használt szaknyelvi kifejezés is innen ered (mint pl. az olvadékfázis nélküli becsapódási-breccsa, a Bunte-breccsa; vagy az olvadékfázist tartalmazó Suevit- és Suevit-breccsa). Különösen jól tanulmányozható itt a törmeléktakaró képződése, mozgása, ill. egy viszonylag frissen feltárt jelenség: a Ries kráter középpontjától kb. 0,8-1,8 krátersugárnyi távolságban, a középidei üledékekből rétegzett célkőzetben megfigyelhető horizontális repedések és az ezek menti, maximum párszor tízméteres, radiális irányú elmozdulások (max. 50 méteres mélységig fordulnak elő), amelyek valószínűleg a sokk-hullámoknak és a visszahulló, ún. közeli törmeléktakaró által átadott mechanikai energiának az összjátéka által jöttek létre (Kenkmann és Ivanov, 2006). Az utóbbi időkben a Ries kráter egyre több adatot szolgáltat a becsapódás keltette sokk-hullámok terjedését, ill. hatását illetően is. A sokk-metamorfizált cirkon tulajdonságainak (mint sokk-indikátor ásvány), valamint a különböző mértékben metamorfizált változatainak kráteren belüli elterjedési jellegzetességei alapján felmerült a sokk-hullámok antiszimmetrikus terjedésének a lehetősége (Gucsik, 2007), amelyet a ferdeszögű becsapódás, illetve a becsapódási célterület rétegzettsége (Hercyniai aljzatra települő középidei rétegek) nagyban elősegíthetett, a réteghatárokon történő sokk-hullám irányváltozások és visszaverődések (interferenciák) által (Gucsik, 2007). A klasszikus modell szerint a sokk-hullám frontja táguló félgömb vagy elliptikus alakot formálva halad lefelé és oldalra a célkőzetben.

2006 májusa óta a Ries és a Steinheim meteoritkráterek speciális státuszt élveznek a mintegy 1800 km² területű Ries Nemzeti Geopark keretein belül. (Ez Bajorország első geoparkja) (Stöffler et al., 2008). A geopark népszerűsítő és ismeretterjesztő szerepe mellett a tudományos célokat a Ries Kráterkutató Központ (ZERIN) hivatott szolgálni: itt tárolják a kráter fúrásmagjait, egyéb anyagmintáit és a dokumentációs anyagot is (Stöffler et al., 2008).

A Ries-Steinheim szimultán becsapódás mechanizmusa

1963 óta elfogadott az a tény tudományos körökben, hogy a Nördlingen Ries és a Steinheim meteoritkrátereket, valamint az ún. közép-európai Moldavit-szórásmezőt (becsapódási, ún. tektitüvegek, ld. lejjebb) egyidejű becsapódások hozták létre (Stöffler et al., 2008), bár a mechanizmus még sok ismeretlen elemet tartalmaz.

Első kérdésként az merül fel, hogy a két becsapódó meteorit milyen kapcsolatban állt egymással? Annak az esélye ugyanis, hogy egy időben, két egymástól teljesen független meteorit csapódik be, egymáshoz ilyen közelségben (~42 km), rendkívül csekély (gyakorlatilag nulla); illetve ilyen esetben a világűrbeli pályáknak igen hasonlóknak kell lenniük, ez pedig eleve feltételez valamiféle kapcsolatot a két test között.

Ennek feloldására két magyarázat lehetséges:

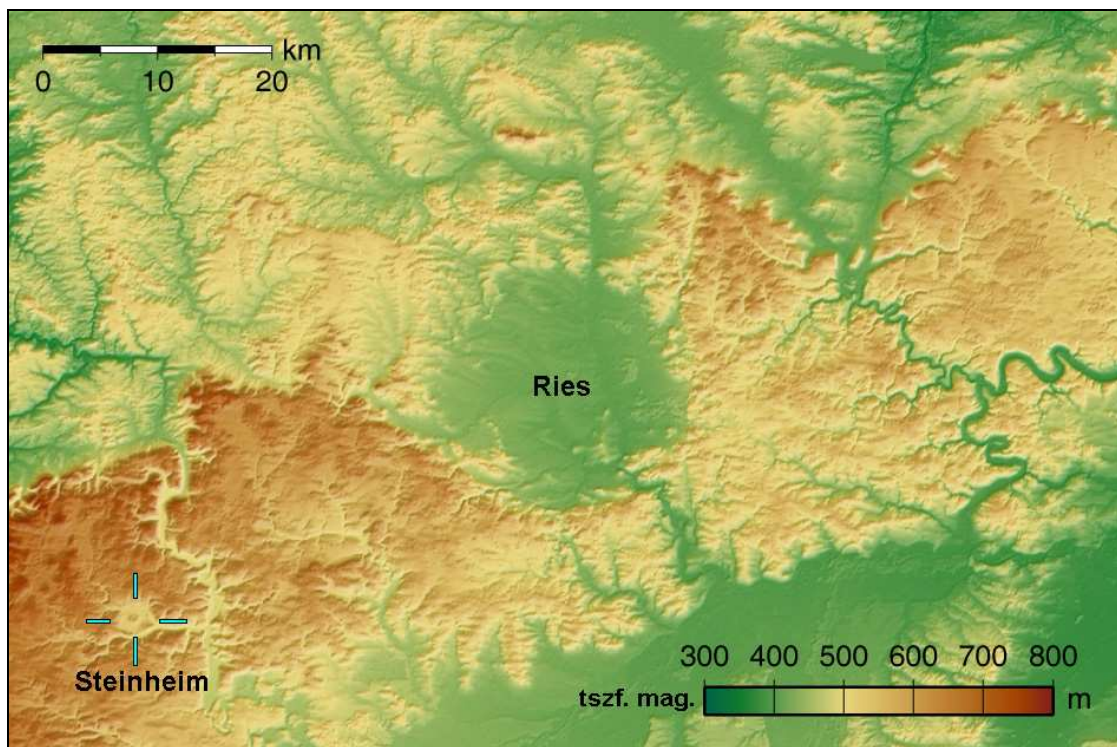
(1) a meteorit egy darabban érkezik a légkörbe, és csak a légköri áthaladás során darabolódik fel (fragmentálódik).

(2) különálló testekként lépnek a meteorok a Föld légkörébe, ún. kettős kisbolygó formájában (egy kisbolygó és még kisebb holdja, gyenge, de még elégséges gravitációs erő által közös pályán tartva, amelyek létezésére jelenleg is több példát lehet megfigyelni: pl. Ida/Dactyl). Ennek tisztázására a numerikus modellezés módszerét használták fel (Hydrocode simulation), különféle kezdeti paraméterek felhasználásával (Stöffler et al., 2002): a becsapódási sebességet 11,2 km/s (a Földre vonatkoztatott szökési sebesség) és 21 km/s között variálták; a becsapódási szöveget pedig 10 és 60° között (habár a kráterek körszerű megjelenése ellentmond a túlzottan ferdeszögű becsapódásnak). Az esetleges légköri feldarabolódást feltételezve pedig még a szétesés felszínétől számított magasságát is lehet variálni, amely kapcsán a következő eredmény adódott: 50 km feletti feldarabolódási magasság (amely feldarabolódás azonban még a földi atmoszférában történt) érdemben nem befolyásolta a szimuláció kimenetelét, ez alatt pedig minél kisebb magasságot állítottak be a széthullás kezdetére a szimuláció során, annál kevésbé távolodtak el egymástól a becsapódó testek a felszín eléréséig. Viszont a széthullás maximális, 50 km-es magasságú értékénél is csak kb. a Ries és Steinheim között megfigyelhető ~42 km-es távolság ezredrészét kapták a meteoritdarabok egymástól való eltávolodására, a felszín eléréséig (Stöffler et al., 2002). Ezen szimuláció tanulsága alapján nem okozhatta a légköri fragmentáció a kettős becsapódást, marad tehát a kettős kisbolygó becsapódásának elmélete. A modellezések a becsapódó meteoritok lehetséges méreteire is utalnak: a Steinheimi-medencét (D=3,8 km) egy kb. 150 méter átmérőjű kisbolygó becsapódása eredményezhette (ez kb. 25-szörös méretkülönbség); a Ries krátert (D=24 km) pedig egy kb. 1,5 km-es átmérőjű test hozta létre (ez 16-szoros méretkülönbség). Amellett, hogy ezek természetesen csak közelítő értékek, jó összhangban vannak azon feltételezésekkel, amelyek szerint a nagysebességű becsapódásoknál (ha a becsapódó test sebessége minimum néhány km/s-os nagyságrendű) a képződő végleges kráter átmérője ~10-20-szorosa lesz a becsapódó test átmérőjének.

További kérdést vet fel a becsapódás iránya és szöge, amelyre a közép-európai tektitüveg szórásmező (amelyet az ún. Moldavitok alkotnak) adhat választ: maga a szórásmező a Ries kráter távoli-, vagy szakadozott törmelék-takarójaként definiálható (4. ábra). Ez azt jelenti, hogy a kidobott anyag (jelen esetben a tektitüveg [Moldavit]) nem képez folyamatos borítást, hanem kisebb-nagyobb szigetekre bomlik, mivel a távolabbra dobott törmelék nagyobb területen kell, hogy szétoszoljon, mintha ugyanez a mennyiség a kráterhez közelebb ér földet. A képződési mechanizmus bizonyos tekintetben hasonló a Holdon vagy éppen a Merkúron látható sugársávok kráterek sugársávjainak képződéséhez, csak a Föld esetében a légkör és az utólagos erózió erősen módosítja a megjelenést. A közép-európai

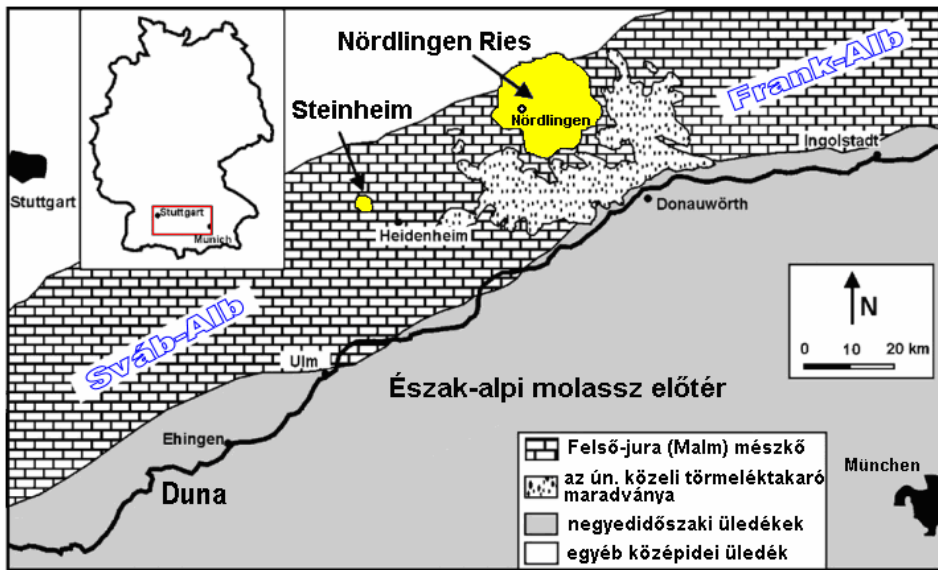
szórásmező több részmezőre bomlik, amelyek egy 57°-ban kinyíló legyezőformát alkotnak, maximum 350-400 km távolságig (4. ábra). Maguk a tektitek egyébként (amelyek közé a Moldavitok is tartoznak) a becsapódáskor több km/s sebességgel kidobott szilikátolvadék-cseppek, amelyek a ballisztikus pályán történő repülésük közben gyorsan hűlnek le, ezért üveges szerkezetet vesznek fel, színük jellemzően opálos-zöldes, üvegesen átlátszó, de van köztük barnás és szürkés-feketés változat is (6. ábra). Alakjuk sok esetben jellemzően aerodinamikai jellegeket hordoz: süllyzű; csepp; lencse vagy éppen gömb alakjuk a légköri repülés közbeni megszilárdulás jele (5. ábra). Vannak azonban szabálytalan alakúak is. A Földön jelenleg négy nagy tektit-szórásmező ismert, ezek közül egy kivételével (az ún. ausztrálázsiai-szórásmező) valamennyit sikerült valamelyik meteoritkráterhez kötni (Gucsik, 2003).

Megjegyzendő, hogy léteznek még utalások, egyéb, igen ősi (prekambriumi) szórásmező-maradványokra utaló, sok esetben csak közvetett nyomok is (Abbott és Mazumber, 2007). A részletes geokémiai vizsgálatok nemcsak azt bizonyították be, hogy a moldavitok konkrétan a Ries becsapódáshoz kötődnek, hanem azt is, hogy a Moldavit-tektitek túlnyomó része (~90%) a becsapódás célterületének legfelső 40-50 méteres vastagságú rétegéből alakult ki, annak megolvadása és kidobódása által (Artemieva, 2003). Azaz, a becsapódás igen korai szakaszában keletkeztek, tekintettel arra, hogy a becsapódás után néhány másodperccel már egy kb. 4000-4500 méter mély, tranzien (elsődleges, vagy átmeneti) kráter alakult ki. Az egyértelmű geokémiai kapcsolat, valamint a szórásmező geometriai elhelyezkedése alapján a numerikus szimulációk arra utalnak, hogy a jelenleg megfigyelhető Moldavit-tektitmező paraméterek kialakulásához mintegy 30-45 fokban, felszínnel bezárt becsapódási szög és ~18-20 km/s becsapódási sebesség a legideálisabb (Stöffler et al., 2002).

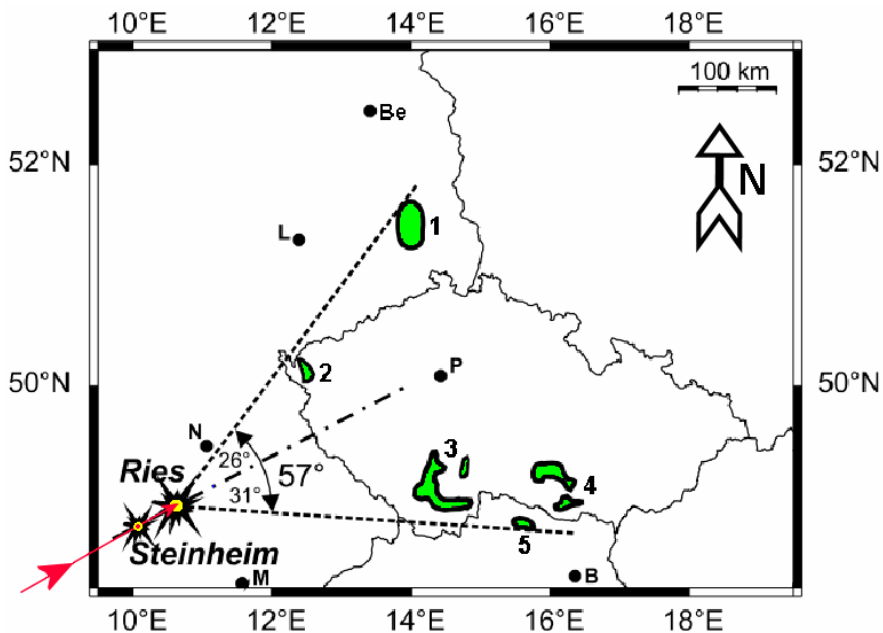


2. ábra. A Ries és a Steinheim (kék szálkeresztben) meteoritkráterek és környezetük domborzati viszonyai.

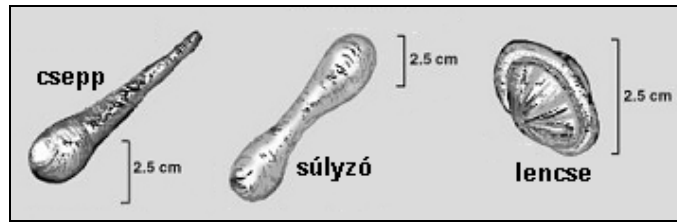
(wikipedia.org, 2009; kiegészítve)



3. ábra. A becsapódás területének nagyszerkezeti-geológiai felépítése, ill. a Ries kráter közeli törmeléktakarója. (Tütken et al., 2006; kiegészítve)



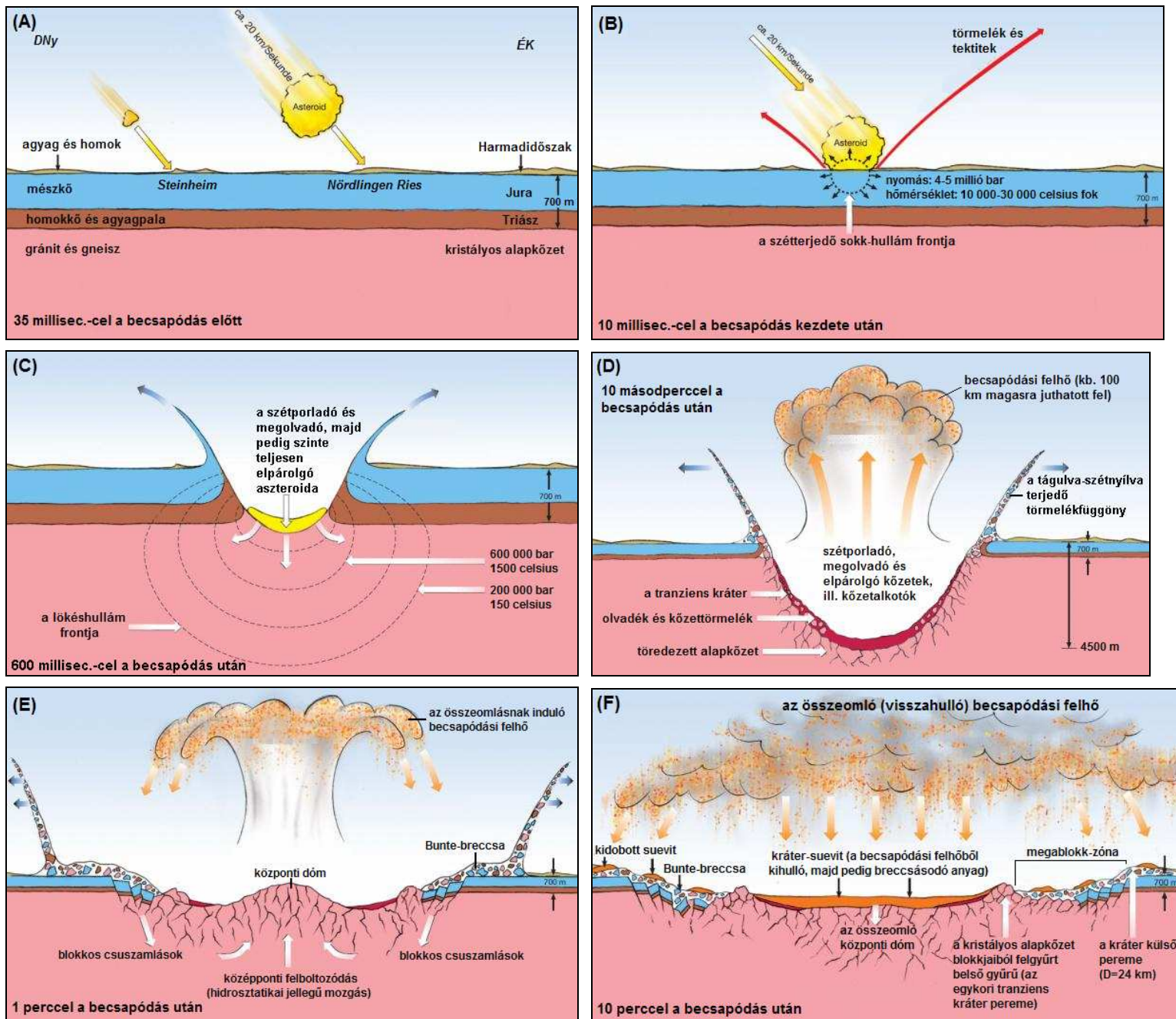
4. ábra. A Ries meteoritkráterhez köthető, jelenleg ismert közép-európai tektit (Moldavit) szórásmező és annak egyes részmezői (zölddel). Jelmagyarázat a részmezők jelöléséhez: (1) Lusatiai-mező; (2) Cheb-medencei mező; (3) Dél-csehországi mező; (4) morvaországi mező; (5) ausztriai mező. A szaggatott fekete vonal a jelenleg ismert szórásmező nyílása (57°); a piros nyíl a becsapódás iránya (a Ries és a Steinheim kráterek középpontjait összekötő vonal); a pontozott-szaggatott fekete vonal pedig ennek a vonalnak az ÉK-i irányú, képzeletbeli meghosszabbításaként értelmezhető (ez tehát a jelenleg ismert szórásmezőre vonatkoztatott szimmetriatengely). A 26, ill. 31° értékek az 57°-os, jelenleg megfigyelhető nyílási szög enyhe szimmetria-eltolódásait jelzik a pontozott-szaggatott szimmetriatengelyhez képest. Egyéb jelölések: (B) Bécs; (Be) Berlin; (L) Lipce; (M) München; (N) Nürnberg; (P) Prága. (Skála et al., 2009; kiegészítve)



5. ábra. Az alapvető aerodinamikai tektitformák: csepp, súlyzó és lencse. Ezek a formák a szilikátolvadék-cseppek nagy sebességű (minimum 2-3 km/s) légköri repülés alatt történő hirtelen megszilárdulásának az eredményei. Ezt támasztja alá az üveges (amorf) szerkezet is. Méreteik a mikroszkópikustól (gyakran gömb alakú mikrotektitek vagy mikroszferulák) kezdve a néhányszor tíz centiméteres darabokig terjednek.
 (www.psi.edu, 2009; kiegészítve)



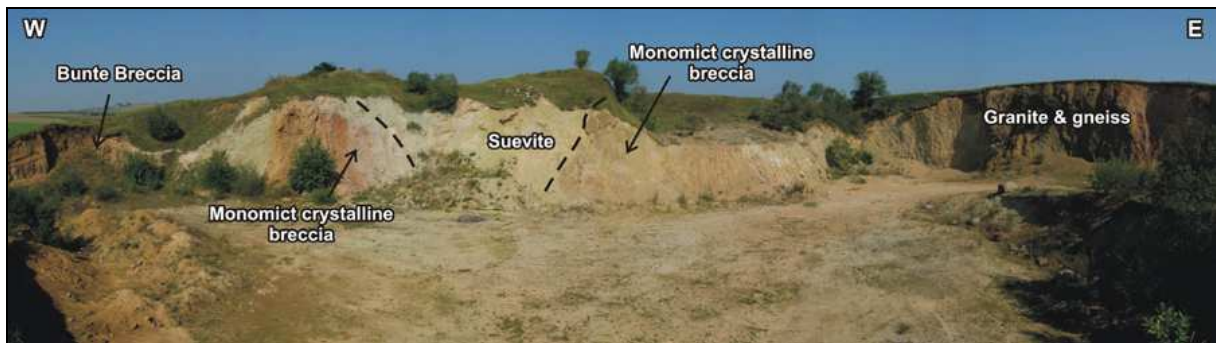
6. ábra. Tektitek Csehországból (Moldavitok) (a bal oldali és a középső képek) és az ún. ausztrálázsiai-szórásmezőből (a jobb oldali kép). A bal oldali szabálytalan alakú, míg a középső aerodinamikai (jelen esetben csepp) alakot vett fel, a repülés közbeni megszilárdulása során (ezek a Ries-becsapódáshoz kötődő Moldavit-tektitek). A jobb oldali képen három szürkés-feketés tektitváltozat látható. Ez utóbbiak nem a Ries becsapódáshoz tartoznak, hanem a földfelszín kb. 10 %-án nyomozható ausztrálázsiai-szórásmező tagjai, amelyeknek kora egységesen kb. 700 000 év. Ezeknek a -feltételezhetően igen nagy átmérőjű- szülőkráterét még nem sikerült megtalálni (a szórásmező geometriája alapján azonban valahol Dél-Kínában feltételezik). Az itt bemutatott valamennyi példány néhány cm-es nagyságú.
 (www.psi.edu, 2009)



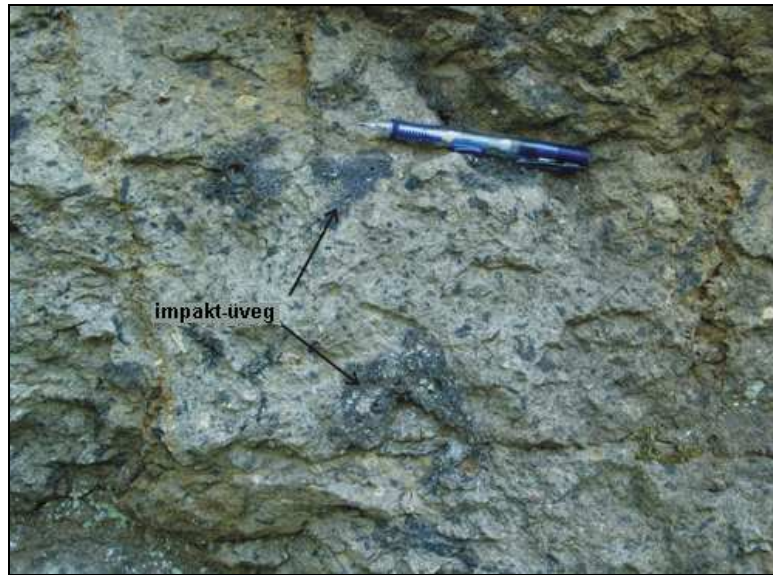
7. ábra (A-F). A Nördlingen Ries meteoritkráter képződésének főbb fázisai, ahogyan az a jelenlegi fizikai, geológiai és geokémiai ismeretek, valamint a modell-szimulációs kísérletek alapján elképzelhető. A becsapódás kezdetéhez viszonyított relatív időpillanatok az egyes ábrák bal alsó sarkaiban vannak feltüntetve, kivéve a (D) fázist: ott a bal felsőben. Az (A) fázis képén még a Steinheimi meteorit is látszódik, közvetlenül a becsapódás előtti pillanatban, az azt követő ábrák (B-F) viszont már csak a Ries becsapódás mechanizmusát mutatják. Az ábrásor nem mutatja be a poszt-impakt lepusztulási és feltöltődési fázisokat; ill. az ún. távoli törmeléktakarók képződését sem.
 (www.geopark-ries.de, 2009; kiegészítve)



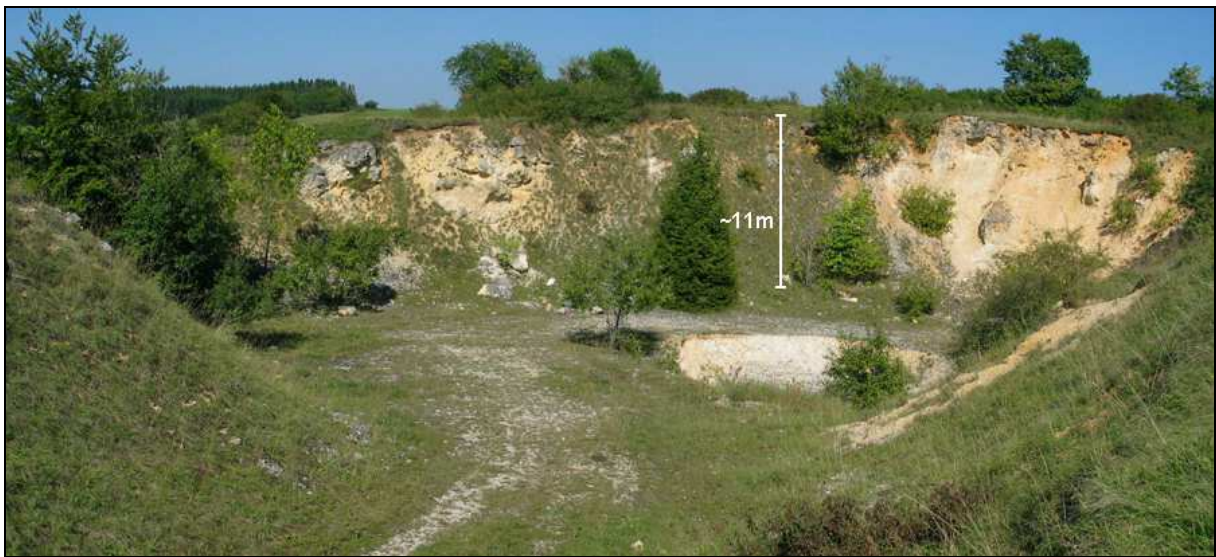
8. ábra. *Egymás mellé és egymásra települt becsaódási-breccsák: Suevit (szürke-sárga) és Bunte-breccsa (vörös) összletek (a jobb oldali kép kb. 100 m széles területet ábrázol).*
(www.psi.edu, 2009)



9. ábra. *Egymás mellé települt Suevit, Bunte-breccsa és monomikt breccsa összletek, valamint a kristályos Hercinyai alapkőzetből felszínre gyűrt gránit és gneisz (a kép kb. 200 m széles szakaszt ábrázol).*
(www.psi.edu, 2009)



10. ábra. Közeli kép a Suevitről, beágyazott impakt-üvegekkel.
(www.psi.edu, 2009)

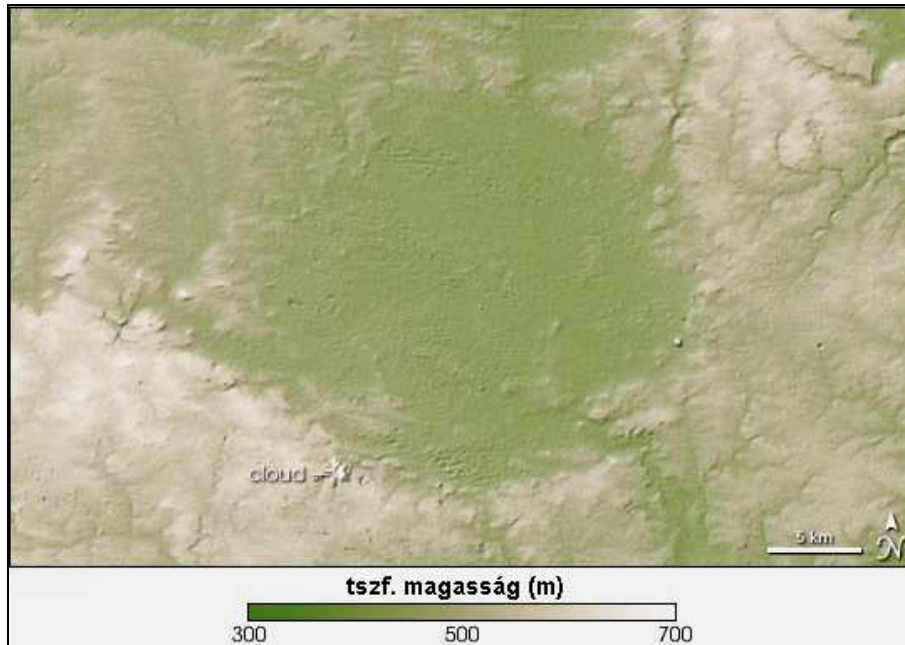


11. ábra. Egy kb. 11 méter magasságú és 500 m átmérőjű Malm-mész-kő blokk, amelyet a becsapódás dobott ki a kráterből (a peremtől 8,5 km-re!), majd pedig a visszahulló, kevert törmelékből összeálló Bunte-breccsa ágyazott körül. A kép a kráter peremétől 8,5 km-re készült. (www.psi.edu, 2009; kiegészítve)

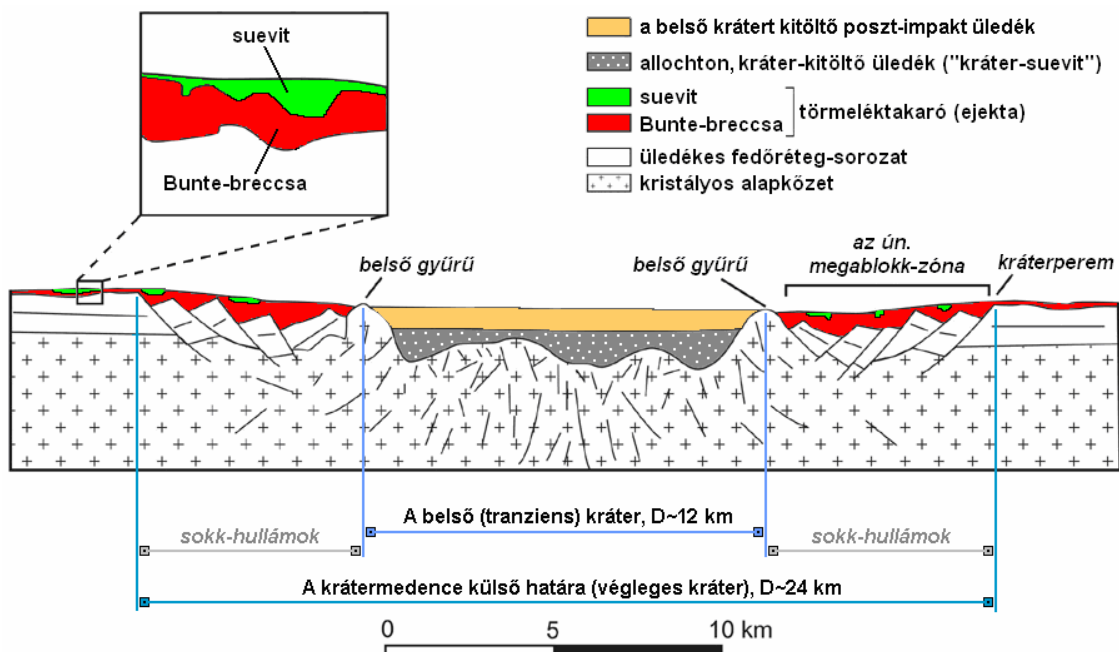
A Ries és a Steineim meteoritkráterek geológiai felépítése

Mindkét kráter komplex meteoritkráterként definiálható, azaz szabad szemmel (Steinheim) vagy geofizikai módszerekkel (Ries) megfigyelhetőek a becsapódási terület hidrosztatikai mozgásának nyomai: a becsapódás után nem sokkal gravitációs összeomlásnak induló központi dóm maradványa (Steinheim); ill. még nagyobb magasságú központi dóm (amely dóm percekkel a becsapódás után már ~1 km-rel magasodott a tranziens kráter

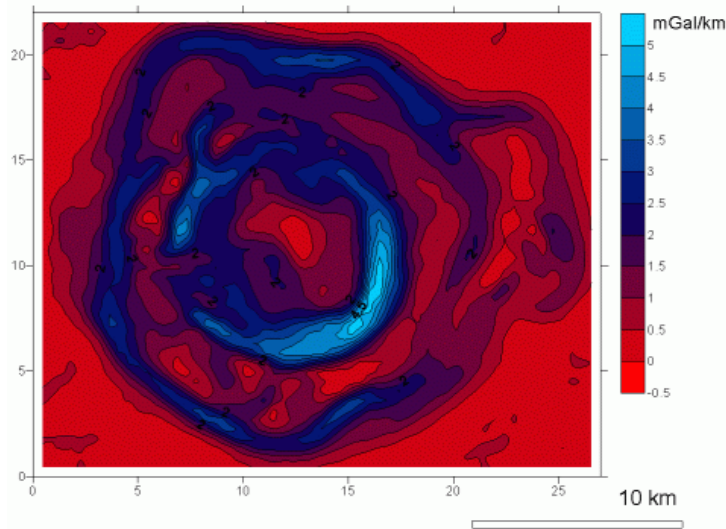
padlósíntje fölé összeomlása nyomán kinyíló belső gyűrű (Ries). Ezen kívül a Ries esetében a kráterperemi részeken nagyméretű blokkos csuszamlások is kimutathatóak.



12. ábra. A Ries meteoritkráter magassági modellje. A komplex kráterekre jellemző szerkezet itt nem figyelhető meg szabad szemmel, a krátert utólag kitöltő tó üledékei miatt, a geológiai és geofizikai vizsgálatok azonban jól feltárják a valós szerkezetet.
 (earthobservatory.nasa.gov, 2009)



13. ábra. A Ries meteoritkráter jelenkori keresztmetszéne.
 (Hüttner és Schmidt-Kaler, 1999; kiegészítve)



14. ábra. A Ries kráter Bouguer-anomália térképe (gravitációs maradék-anomália), a felszín alatti sűrűségkülönbségek kimutatására. Az ábra a pirostól a világoskék területek felé haladva egyre nagyobb sűrűségű felszín alatti kőzet-öveget jelöl (-0,5 és +5 mGal értékek között). A koncentrikus, felszín alatti szerkezet jól kivehető, amely szokványosnak mondható a becsapódásos formák esetében, és amelyet a rendkívül koncentrált becsapódási energia pillanatszerű szétterjedése, ill. a központi dóm gyors összeomlása idéz elő, kialakítva ez által a változó sűrűségű kőzetöveget. Jól kivehető a tranziens kráter belső gyűrűje, amely a legnagyobb sűrűségű, Hercyniai kristályos kőzeteket tartalmazza (világoskék). – Ezek a kőzetek egyrészt eleve nagyobb sűrűségűek, mint a jórészt középidői fedőüledékek, másrészt a becsapódás mechanizmusa a felszín közelébe is hozta (gyűrű alakban felgyűrte) őket. A kráter peremi részein pedig a kidobott-felgyűrűt sáncanyag okoz pozitív gravitációs anomáliaként megjelenő tömegetöbbletet.
(www.impact-structures.com, 2009)



15. ábra. A Ries meteoritkráter belső gyűrűjének (a tranziens kráter peremének) magasabbra nyúló blokkjai helyenként szelíd dombokat formálva emelkednek a poszt-impakt tavi üledékek alkotta, jelenkori felszín fölé (ez a belső gyűrű az utólagos lepusztulás és betemetődés előtt ~1 km magas lehetett a legmagasabb részein).
(www.psi.edu, 2009)



16. ábra. A belső gyűrű felszínig érő csúcsainak egyik feltárása: kristályos breccsából épül fel. (www.psi.edu, 2009)



17. ábra. A Ries meteoritkráter sánc-lejtője. A sánc valós méretének (és az emiatt fellépő kráterperemi pozitív gravitációs anomáliának) az érzékeltetésére érdemes megfigyelni a kép bal felső sarkában, a fekete nyíl hegyénél álló emberalakot! (www.psi.edu, 2009)



18. ábra. Kilátás a nördlingeni Daniel-toronyból a kráter sáncának egy részletére (a fekete nyilak jelzik). A történelmi városrész épületeinek jelentős része a jól faragható becsapódási breccsából épült fel.

(www.psi.edu, 2009; kiegészítve)

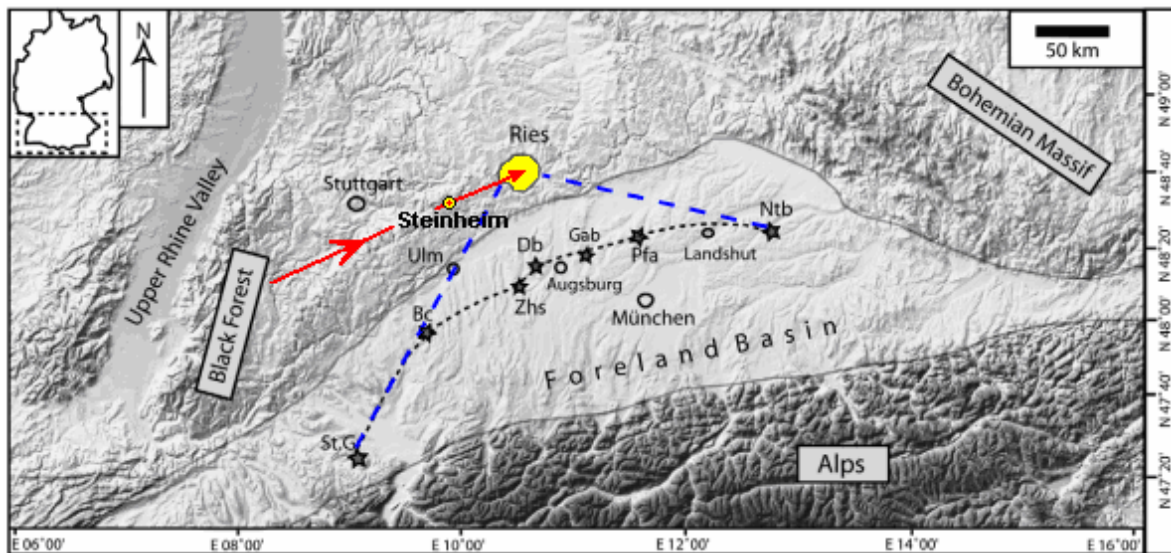
A Ries kráter egy kevésbé ismert, lehetséges távoli törmeléktakarója: a “Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont”

A Moldavitok alkotta távoli törmeléktakaró és a jórészt Bunte-breccsából, ill. Suevit-breccsából álló közeli törmeléktakarók mellett létezik még egy lehetséges, távoli törmeléktakaró is (a Riestől maximum 200 km-es távolságig), amelyről kevesebb szó esik. Habár, már az 1970-es évek közepén történtek rá utalások (Buchner et al., 2007): “Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont” néven írták le azokat a többnyire közép- és felső-jura mészkő és kisebbrészt agyagkő blokkokat és rétegeket, amelyek az Észak-alpi molassz-előtér közép- és késő-miocén rétegeibe ágyazódtak be, és amelyeket a Ries távoli törmeléktakarójaként értelmeztek (Buchner et al., 2007). A “Reutersche Blöcke” elnevezést a mindössze pár cm³-estől a több, mint 1 m³-es tömbökre alkalmazzák; a “Ries-Brockhorizonte” ezzel szemben az 1-10 cm-es nagyságrendbe tartozó törmelékeket foglalja magában (Buchner et al., 2007). Azóta több pro- és kontra érvet sorakoztattak fel a lehetséges impakt-kapcsolattal összefüggésben:

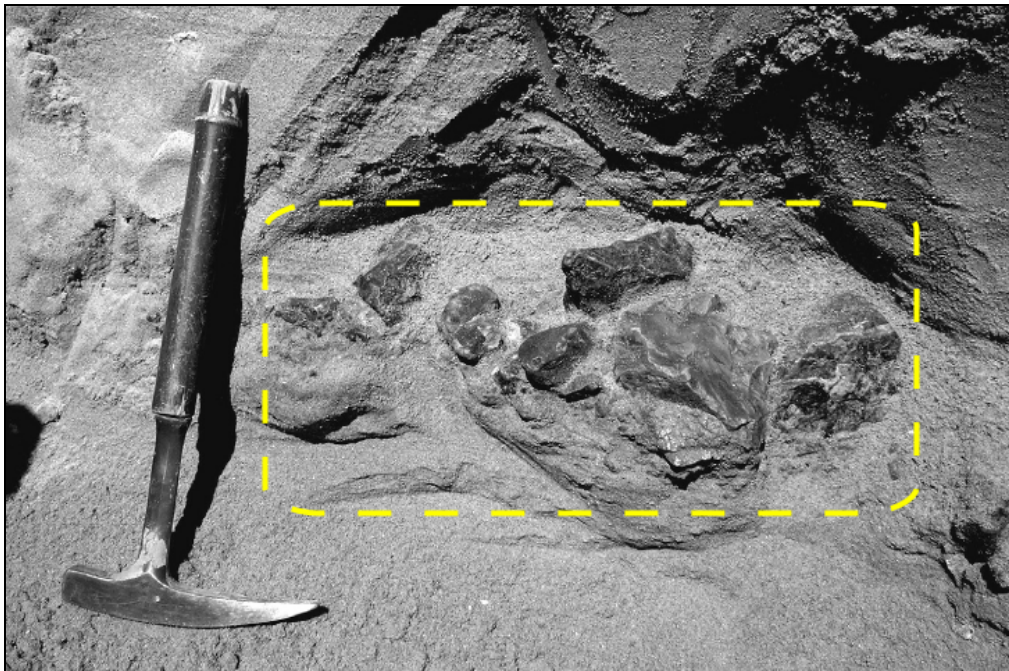
- A. *Érvek a “Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont” becsapódásos eredete mellett (Buchner et al., 2007):* (1) – valószínűsíthető (de még egyértelműen nem bizonyított) időbeni egyezés a Ries-becsapódás és a kérdéses áthalmazódás között. (2) – ha a becsapódásos eredetet elvetjük, akkor erőteljes áradásokat kell feltételezni, amelyek az Észak-alpi előtérbe szállíthatták a tömböket, erre pedig nincs ismert szedimentológiai bizonyíték.
- B. *Érvek a “Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont” becsapódásos eredete ellen (Buchner et al., 2007):* (1) – a “Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont” rétegek nem egységeseek mindenhol; némely alkotójuk autochton (helyben képződött), esetleg két-három rétegben is kimutathatóak (azaz több ülepedési fázis volt, esetleg utólag került át egyéb rétegekbe is). (2) – a térbeli eloszlás inkább hosszanti (sőt, inkább a Ries kráter közelebb eső D-i, DK-i pereméhez képest), és nem pedig radiális (vagy legalábbis

szigetszerű), mint az elvárható lenne. (3) – a jelenlegi előfordulási ismeretek alapján ez az elhelyezkedés ellent mond a Ries valószínűsített, DNy-i becsapódási irányának. Azaz, minimum az átellenes oldalon (É, ÉNy) is lennie kellene egy hasonló jellegű távoli törmeléktakarónak, hogy legalább egy lepkeszárny-szimmetria adódjon.

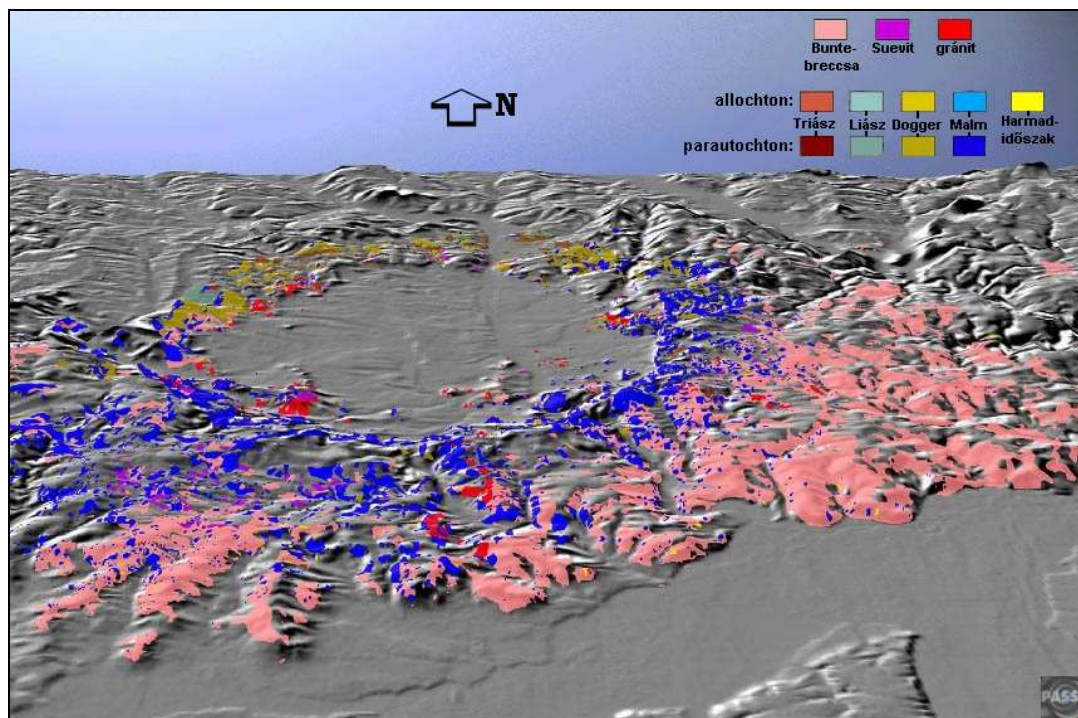
Mindezek az ellenérvek azonban részben feloldhatóak azzal, hogy a jelenleg ismert, pontszerű előfordulások nem feltétlenül jelentik az összes előfordulást is egyben. – Azaz létezhetnek még olyan, eddig feltáratlan “Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont” törmelékmezők, amelyek megadhatják az egyértelmű rétegtani bizonyítékot vagy szimmetrikussá egészíthetik ki a földrajzi eloszlást. Az is lehet azonban, hogy ha léteztek is egykoron ezek az egyéb takaró-részletek, már csak múlt időben említhetőek, az utólagos lepusztulás (áthalmazódás) miatt. További érv lehet a becsapódásos eredet mellett, hogy a Riestől 130 km-nél nagyobb távolságban elhelyezkedő blokkokban a becsapódási kőzetekre jellemző sokk-metamorf jegyek egyikét sikerült kimutatni (a nyomási kúpokat [shatter-cones]), az ettől közelebbiekben azonban nem (Buchner et al., 2007).



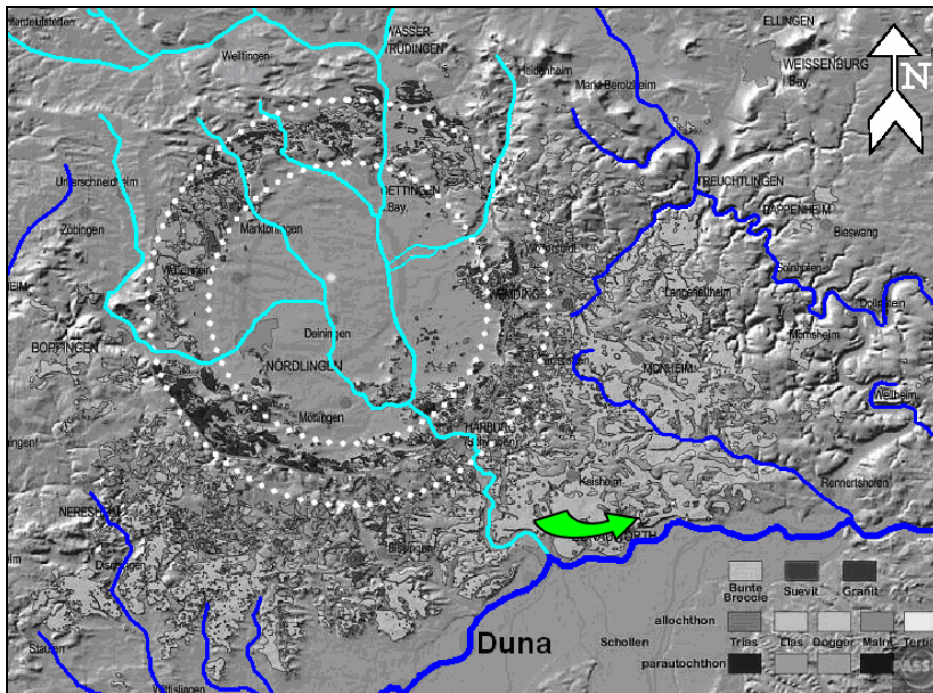
19. ábra. A Nördlingen Ries meteoritkráter D-i és DK-i irányba kidobott, feltételezett törmeléktakarójának jelenleg ismert elterjedése (“Reutersche Blöcke” és “Ries-Brockhorizont”) (a tektit-szórásmezőhöz hasonlóan ez is az ún. távoli törmeléktakaró része).
 Jelmagyarázat: a piros vonal a nyíllal a becsapódó meteoritok repülési vonalát és irányát jelzi (a sárga területek maguk a kráterek), amelyből következik a jelenlegi, féloldalas aszimmetria; a csillagok a D és DK felé kidobott törmeléktakaró-maradványainak jelenleg ismert lelőhelyeit mutatják, a kék szaggatott vonal pedig az ezek alapján kijelölhető nyílási szöveget. Ez, a feltételezett törmeléktakaró-maradvány féloldalas aszimmetriát mutat a becsapódás irányára, és eddig csak az Alpok északi, előtéri medencéjében találták meg őket.
 (StG – St. Gallen; Bc – Biberach/Riß; Zhs – Ziemetshausen; Db – Deubach; Geb – Gebratshausen; Pfa – Pfaffenhofen; Ntb – Niedertrennbach).
 (Buchner et al., 2007, kiegészítve)



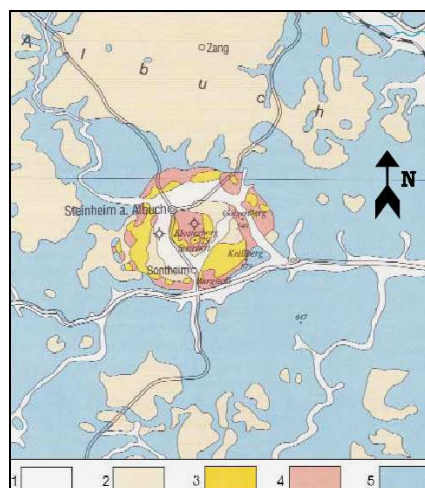
20. ábra. Elkülönülő, szögletes- vagy gyengén lekerekített felső-jura mészkőblokkok kevés középső-jura agyagkővel keverve (a sárga szaggatott keretben); mindez középső- és felső miocén folyóvízi üledékekbe ágyazva, az Észak-alpi előtéri medencéből (Ziemetshausen, ld. még a 19. ábrát).
(Buchner et al., 2007, kiegészítve)



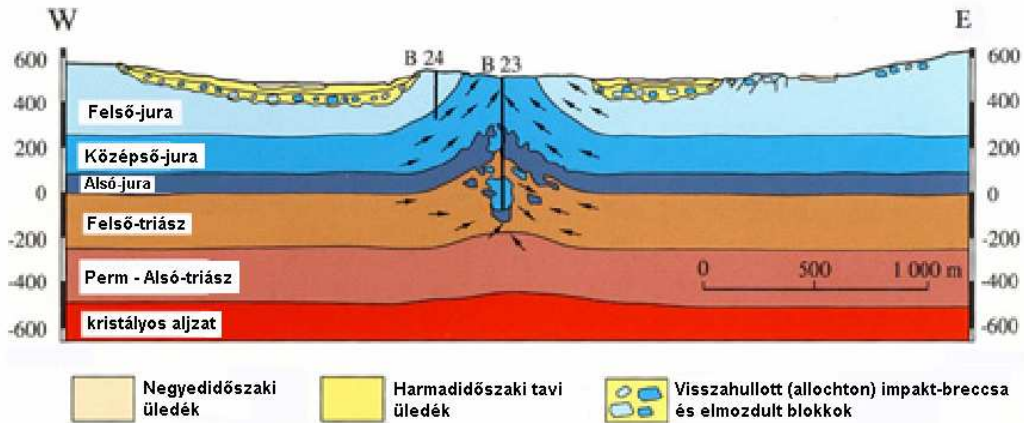
21. ábra. A Ries meteoritkráter kidobott, ún. közeli törmeléktakarójának digitális magasságmodellje és kőzettani felépítése (déli irányból szemlélve).
(Earth Impact Database, 2009; kiegészítve)



22. ábra. A Ries meteoritkráter vízhálózata. A fehér pontozott vonal a sánc horizontális kiterjedését jelöli. A világoskékkel kiemelt folyók a krátermedence belsejével összeköttetésben álló vízfolyások (ott erednek vagy átfolynak rajta); a sötétkékkel kiemelték pedig a közeli törmeléktakaró által meghatározott lefutású, külső folyók. Jól látható a krátermedence féloldalasan aszimmetrikus vízhálózata; ill. az egész terület ÉNy-DK-i általános lejtése. A zöld nyíl a medence Dunába történő lefolyását jelzi. Ez a fajta mintázat hasonlóságot mutat egyéb meteoritkráterekkel is (pl. Siljan és Haughton kráterek) (Mihályi, 2008; Mihályi et al., 2008). Az a tény, hogy a vízfolyások tanúsága alapján az egész terület DK-i irányba lejt, utalhat az É-i, ÉNy-i, közeli törmeléktakaró (mint magasabb térszín) lepusztultságára is. (Earth Impact Database, 2009; kiegészítve)



23. ábra. A Steinheim meteoritkráter földtani térképe. (1) fiatal völgykitöltés (holocén, felsőpleisztocén); (2) lösz, kavics, homok, lejtőtörmelék (harmadidőszak, negyedidőszak); (3) kráterkitöltő üledékek: mészkő, agyag, márga, homokkő, konglomerátum; (4) Suevit, üveges impakt breccsa, a kristályos alaphegység kőzeteinek törmelékzemcséivel; (5) márga, mészkő, dolomit (felső-jura). (Don és Solt, 2006)



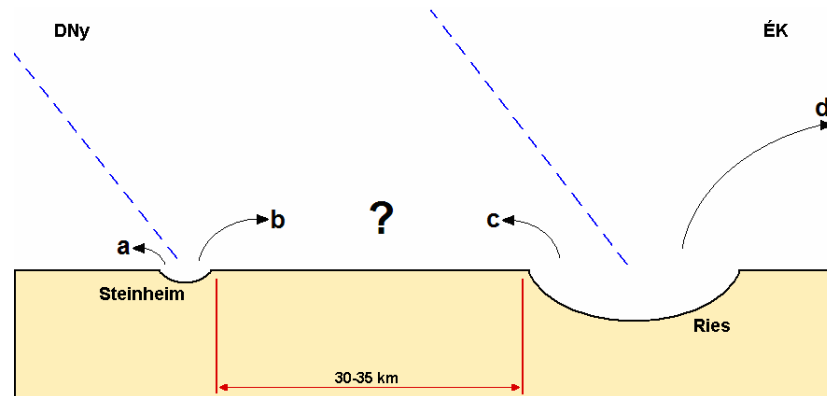
24. ábra. A Steinheim meteoritkráter nyugat-keleti irányú metszete. A fekete nyilak a becsapódáskor fellépett kompressziós erők irányait mutatják (hidrosztatikai mozgás), amelyek a központi dómot is kialakították. A B 23, ill. B 24 jelű fúrások a központi dóm szerkezetét hivatottak feltárni.
 (Ivanov és Stöffler, 2005; kiegészítve)



25. ábra. A Steinheim meteoritkráter központi dómja. A fehér nyilak a központi dóm kontúrvonalát jelzik; a fekete nyilak pedig a kráter sáncának a gerincét. A kép jobb oldalán jól megfigyelhető a sánc belső lejtője is.
 (Earth Impact Database, 2009; kiegészítve)



26. ábra. A Steinheim meteoritkráter panorámafotója. A fehér nyilak itt is a központi dóm kontúrvonalát jelzik; a fekete nyilak pedig a kráter peremét.
 (Earth Impact Database, 2009; kiegészítve)



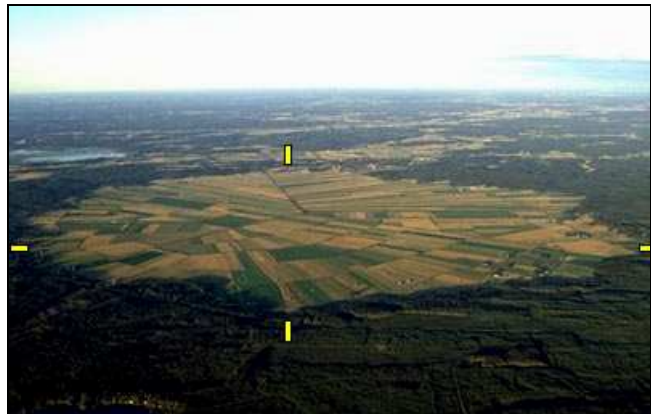
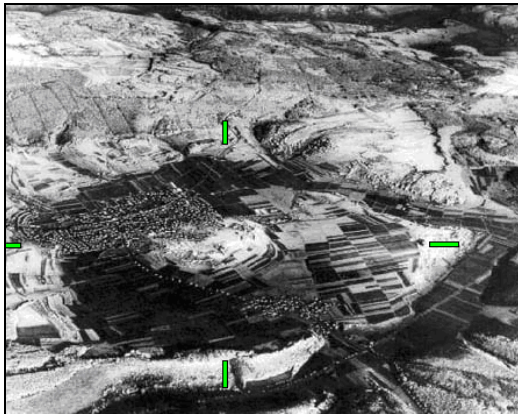
27. ábra. A Ries és a Steinheim becsapódások kidobott törmeléktakaróinak feltételezhető mozgásai, a becsapódási irány (kék szaggatott vonal) síkjában. (a) a Steinheim-becsapódás hátrafelé dobott, kisebbik törmeléktömege. (b) a Steinheim-becsapódás előre dobott, nagyobbik törmeléktömege. (c) a Ries-becsapódás hátrafelé dobott, kisebbik törmeléktömege. (d) a Ries-becsapódás előre dobott, nagyobbik törmeléktömege (Moldavit-tektitek). A kérdőjel arra vonatkozik, hogy találkozhatott-e a Steinheim előredobott, ill. a Ries hátradobott törmelékanyaga, és ha igen, akkor milyen formában lehet ezt jelenleg nyomozni, esetleg az összeütköző törmeléktakarók rétegzettségéből lehet-e következtetni arra, hogy valamelyik becsapódás megelőzte-e a másikat (akár csak tized- vagy századmásodperccel is)? (Az ábra nem méretarányos és nem tükrözi a becsapódási terület rétegzettségét sem.)
(Mihályi et al., 2009)

A kráterek becsapódás utáni fejlődéstörténete

Közös jellemzője a Ries és a Steinheim meteoritkráterek poszt-impakt fejlődéstörténetének a krátertavak kialakulása. Az endemikus fajoktól eltekintve a puhatestűekből álló mollusca-fauna közeli rokonságot mutat a közeli, észak-alpi előtéri vízenyős területek egykorú életközösségeivel (Harzhaue és Mandic, 2008). A steinheimi üledékrétegekben talált, ún. szimpatrikus fajok csontmaradványainak (földrajzi és környezeti elkülönülést mellőző fajképződés által kialakult fajok) C, O és Sr izotóptartalmának elemzése alapján a tavi állapot 14,3 és 13,5 millió évek között létezhetett a Steinheim kráterben (Tütken et al., 2006). Az eredetileg 600-700 m mély Ries; és a kb. 220 m mély Steinheim kráterekben vastag tavi üledékek halmozódtak fel: a Riesben 200-300 m; a Steinheimben pedig kb. 40-50 m vastagságban (Ivanov és Stöffler, 2005; Tütken et al., 2006). A Steinheim-medence esetében nem sikerült kimutatni múltbéli folyóvízi kapcsolatot a környezetével (ilyen jelenleg sincsen, amely kapcsolat a Riesnél manapság is megvan), ezért itt felszín alatti hozzá-, ill. lefolyás valószínűsíthető. A ^{18}O viszonylag magas értékei is izolált víztestre utalnak, eloszlási jellegzetességei pedig kismértékben ingadozó felszín-alatti vízutánpótlást valószínűsítene (Tütken et al., 2006). Külön kérdés a Ries jelenlegi vízvezetési rajzolatának a megértése és kialakulásának rekonstruálása, amely további válaszokat adhat a feltöltődés folyamatára.



28. ábra. Kb. 4,5 m vastagságú, becsapódás után lerakódott tavi üledékösszlet a Ries kráterből.
(www.psi.edu, 2009)



29. ábra. Bal oldalon: a Steinheim meteoritkráter (zöld szálkeresztben); jobb oldalon: összehasonlításként a délnyugat-finnországi Söderfjärden meteoritkráter (sárga szálkeresztben, kora: ~600 millió év; $D=6,6$ km – a felparcellázott és megművelt rész). Mindkét kráter tavi üledékein és a magas ásványianyag-tartalmú impakt-breccsáin jó minőségű talajok képződtek, amely jó alapot nyújt a földműveléshez.
(*Earth Impact Database*, 2009)

Összefoglalás

Bár a Nördlingen Ries és a Steinheim meteoritkráterek a Föld legjobban feltárt krátereire közé tartoznak, sok olyan nyitott kérdés van még a kráterképződés mechanizmusa, a becsapódások lehetséges környezeti hatásai, valamint a becsapódások földtörténeti időskálán

történő eloszlásainak kapcsán (úgy az egyedi kráterekre vonatkozóan, mint globálisan) (Mihályi és Gucsik, 2008), amelyek megválaszolásában a földrajzi adatbázisok sokat segíthetnek. A késő-kréta Chicxulub-bechapódás vonatkozásában már létezik egy ilyen adatbázis (*KTbase*) (Claeys et al., 2002). Ez 345 darab, kréta-harmadidőszaki réteghatár (rétegfeltárás vagy fúrás minta) geológiai, rétegtani és izotóp-geokémiai adatait tartalmazza a Föld különböző pontjairól, és amely adatok GIS alapú adatbázis-rendszerbe történő egybefoglalásával jól lehet rekonstruálni a Chicxulub-bechapódás egész bolygóra kiható törmelékfelhőjének mozgását, szerkezetét és kiüledését; valamint a bechapódás keltette rengéshullámok és cunamik terjedését a kinyíló Atlanti-óceánban (Claeys et al., 2002).

A Ries-Steinheim kettős bechapódásról elmondható, hogy a kráterképződés folyamata már viszonylag jól feltárt területnek számít. A különböző törmelékterakók kialakulásának mechanizmusa (Mihályi et al., 2009), valamint a bechapódás minél pontosabb korának a meghatározása azonban még további vizsgálatokat igényel, csakúgy, mint a bechapódás környezeti hatóságának és hatásának (többek között az élővilágra nézve), ill. a poszt-impakt folyamatoknak a rekonstruálása. Mindezek megértését nagyban elősegítheti az adatok megfelelő adatbázisokba tömörítése és rendszerezése. Továbbá segítséget nyújthat a többi bechapódásos eredetű kráterre vonatkozó adatokkal történő összehasonlítás, amely által jobban szét lehet választani azt, hogy mi tekinthető általános folyamatnak a bechapódások kapcsán, és mi számít csupán egy adott kráterre vonatkozó, specifikus jellegzetességnek.

Irodalomjegyzék

- Alvarez, L. W. – Alvarez, W. – Asaro, F. – Michel, H. V., 1980: Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction – Experimental results and theoretical interpretation. *Science*, Vol. 208, No.4448, p. 1095, 1107.
- Artemieva, N. A., 2003: Distal ejecta from the Ries crater – Moldavites and projectile. *Large Meteorite Impacts*, abstract #4050
- Bérczi Sz. – Gucsik A. – Hargitai H. – Horvai F. – Illés E. – Kereszturi Á. – Nagy Sz. J., 2005: Kis atlasz a Naprendszerrel – A Naprendszer formakincse (I): Bechapódások folyamata, nyomai és hatásai. ELTE TTK – MTA Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, p. 17, 56.
- Buchner, E. – Grässlin, M. – Maurer, H. – Ringwald, H. – Schöttle, U. – Seyfried, H., 2007: Simulation of trajectories and maximum reach of distal impact ejecta under terrestrial conditions: Consequences for the Ries crater, southern Germany. *Icarus* 191, pp. 360-363, 369.
- Claeys, P. – Kiessling, W. – Alvarez, W., 2002: Distribution of Chicxulub ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Geological Society of America, Special Paper 356*, pp. 55-56, 65.
- Di Vincenzo, G. – Skála, R., 2009: $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ laser dating of tektites from the Cheb Basin (Czech Republic): Evidence for coevality with moldavites and influence of the dating standard on the age of the Ries impact. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, p. 493, 511.
- Don Gy. – Solt P., 2006: Meteoritkráter-tanulmányok. A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése, pp. 160-162.
- French, B. M., 1998: Traces of catastrophe. – A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. *LPI Contribution No. 954*, Lunar and Planetary Institute, Houston. pp. 31-36.
- Greely, R., 1985: Planetary landscapes. Allen & Unwin, London, p. 40.
- 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, p. 36.
- Gucsik A., 2007: "Antisymmetric" shock wave distribution at Ries impact crater, Germany? – A Micro-Raman spectroscopical study of shocked zircon. *Workshop on Impact Cratering II*, abstract #8050
- Harzhauser, M. – Mandic, O., 2008: Neogene lake systems of Central and South-Eastern Europe: Faunal diversity, gradients and interrelations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 260, p. 421.
- Hofmann, P. – Leythaeuser, D. – Schwark, L., 2001: Organic matter from the Bunte Breccia of the Ries crater, southern Germany: Investigating possible thermal effects of the impact. *Planetary and Space Science* 49, p. 850.
- 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 #1443
- Keller, G., 2008: Cretaceous climate, volcanism, impacts and biotic effects. *Cretaceous Research* 29, p. 754, 769.

- Kenkmann, T. – Ivanov, B. A., 2006: Target delamination by spallation and ejecta dragging: An example from the Ries crater's periphery. *Earth and Planetary Science Letters* 252, pp. 15-17.
- Mihályi K., 2008: Hydrogeological features of terrestrial impact structures. *Acta GGM Debrecina, Geology, Geomorphology, Physical Geography, Series Vol. 3.* (nyomtatás alatt)
- Mihályi K. – Gucsik A. – Szabó J., 2008: Drainage patterns of terrestrial complex meteorite craters: A hydrogeological overview. *Lunar and Planetary Science XXXIX*, abstract #1200
- Mihályi K. – Gucsik A., 2008: Distributions of the terrestrial meteorite craters: A review. 71st Meeting of the Meteoritical Society, abstract #5012 (printed in *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 43, Supplement, A98)
- Mihályi K. – Gucsik A. – Szabó J. – Bérczi Sz., 2009: Facts, theories and further questions around the Ries-Steinheim simultaneous impact event: A review. 40th Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1542
- Osinski, G. R. – Spray, J. G. – Grieve, R. A. F., 2003: Impact melting in sedimentary target rocks? Workshop on Impact Cratering, abstract #8009
- Osinski, G. R., 2004: Impact melt rocks from the Ries impact structure, Germany: an origin as impact melt flows? *Earth and Planetary Science Letters* 226, pp. 531-532.
- Pierazzo, E. – Spitale, J. N. – Kring, D. A., 2001: Hydrocode modeling of the Ries impact event. *Lunar and Planetary Science XXXII*, abstract #2106
- Scherler, D. – Kenkmann, T. – Jahn, A., 2006: Structural record of an oblique impact. *Earth and Planetary Science Letters* 248, p. 43.
- Skála, R. – Strnad, L. – McCammon, C. – Čada, M., 2009: Moldavites from the Cheb Basin, Czech Republic. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, pp. 1145-1146.
- Spray, J., (PASSC director), 2009: Earth Impact Database, <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>
- Stöffler, D. – Artemieva, N. A. – Pierazzo, E., 2002: Modeling the Ries-Steinheim impact event and the formation of the moldavite strewn field. *Lunar and Planetary Science XXXIII.*, abstract #1871
- Stöffler, D. – Pösges, G. – Barfeld, R., 2008: Development of geotourism in the National Geopark Ries, Southern Germany. *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV*, abstract #3070
- Tütken, T. – Vennemann, T. W. – Janz, H. – Heizmann, E. P. J., 2006: Palaeoenvironment and palaeoclimate of the Middle Miocene lake in the Steinheim basin, SW Germany: A reconstruction from C, O, and Sr isotopes of fossil remains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 240, p. 459, 461, 486.