

Késő negyedidőszaki szeizmikus aktivitás nyomai futóhomokban, a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzónában

KONRÁD Gyula, SEBE Krisztina & HALÁSZ Amadé

Pécsi Tudományegyetem, Földrajzi és Földtudományi Intézet, Földtani és Meteorológiai Tanszék, 7624 Pécs, Ifjúság útja 6.
konradgyula@t-email.hu, sebe@gamma.ttk.pte.hu (ORCID 0000-0002-4647-2199), ahalasz@gamma.ttk.pte.hu (ORCID 0000-0003-4582-8883)

Traces of late Quaternary seismic activity in aeolian sand in the Dunaszentgyörgy–Harta Fault Zone, Hungary

Abstract

In Upper Pleistocene wind-blown sands exposed in the trenches Pa-21-I and -II, excavated in the framework of the geological research program of the Paks II nuclear power plant extension project, multiple features have been recorded which can be linked to seismic events.

The features can be classified into two groups: plastic soft-sediment deformations and fractures. The first group is represented by asymmetric, inclined or overturned folds and by water escape structures, which are restricted to narrow stratigraphic intervals. Liquefaction-induced deformations could have been produced by earthquakes of a minimum magnitude 5. Based on their orientation, steepness, inner structure and location, the fractures can be linked to the activity of the Dunaszentgyörgy–Harta Fault Zone, a major transtensional structure in central Hungary, and fit into the fault pattern interpreted from seismic reflection profiles. The structures deform sands with an age of approximately 20 ka derived from OSL measurements, thus they prove the late Quaternary activity of the fault zone. Based on the upward penetration of fractures and the position of soft-sediment deformation levels, three seismic events can be inferred. Earthquake recurrence times can be estimated to be of the order of magnitude of around 1 ky. Next to the fractures, sand layers may have experienced a few cm of deformation, and a few cm of extension may have happened along the fractures as well. However, no vertical or horizontal relative displacement of the sand bodies on the two sides of the fractures can be detected. A possible explanation is that displacement at depth was accommodated within thick loose sediments near the surface, over a wide stratigraphic interval, and thus the surface did not get deformed. Most of the documented fractures are probably not direct continuations of fault branches, but instead are dilation fractures or sand injections formed indirectly by earthquake waves above the faults.

Keywords: Paks, neotectonics, seismite, sedimentary structure, late Quaternary, palaeoseismology

Összefoglalás

A Paks II atomerőművi beruházás földtani kutatási programja keretében mélyített Pa-21-I és -II kutatóárokban olyan szerkezeteket észleltünk felső pleisztocén futóhomokban, amelyek kialakulása szeizmikus eseményekhez köthető.

A feltárt szeizmotektonikus jelenségek két csoportba sorolhatók: képlékeny (laza üledékes) deformációk és törések. A képlékeny deformációs szerkezetek aszimmetrikus ferde vagy átbuktatott redőkként, valamint vízkiszökéses szerkezetként jelennek meg egy-egy rétegekben. A törések csapásuk, meredekségük, belső szerkezetük és elhelyezkedésük alapján a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna aktivitásához kapcsolódnak, igazolva a szeizmikus mérések értelmezését. A deformációk legalább 5-ös magnitúdójú földrengések eredményeként jöhettek létre. A földrengések késő pleisztocén – OSL mérések alapján ~20 ezer éves – rétegeket érintettek. A rétegsorban a dokumentált törések felharapozási szintjei és a képlékenyen deformált szintek alapján három szeizmikus esemény valószínűsíthető. A földrengés-visszatérési idő nagyságrendje ezerévesnek becsülhető. A törések közvetlen környezetében a homokrétegek néhány centiméteres, ritkábban deciméteres helyi deformációja figyelhető meg, illetve a törések mentén legfeljebb néhány cm-es dilatáció történhetett, de a törés két oldalán lévő homoktesteknek egymáshoz képest függőleges vagy vízszintes elvetése nem mutatható ki. Ennek oka lehet, hogy az alaphegységben és az idősebb kainozoos kőzetekben még egyértelmű elmozdulást okozó vetőzóna deformációja a felszínközeli laza, konszolidálatlan üledékekben eloszlik. A dokumentált hasadékok legtöbbször valószínűleg nem a vetőágak közvetlen, felszínig hatoló folytatása, hanem közvetetten, a földrengéshullámok hatására kialakult tágulásos hasadék, illetve benyomulások telér.

Tárgyszavak: Paks, neotektonika, szeizmit, üledékszerkezet, késő negyedidőszak, paleoszeizmológia

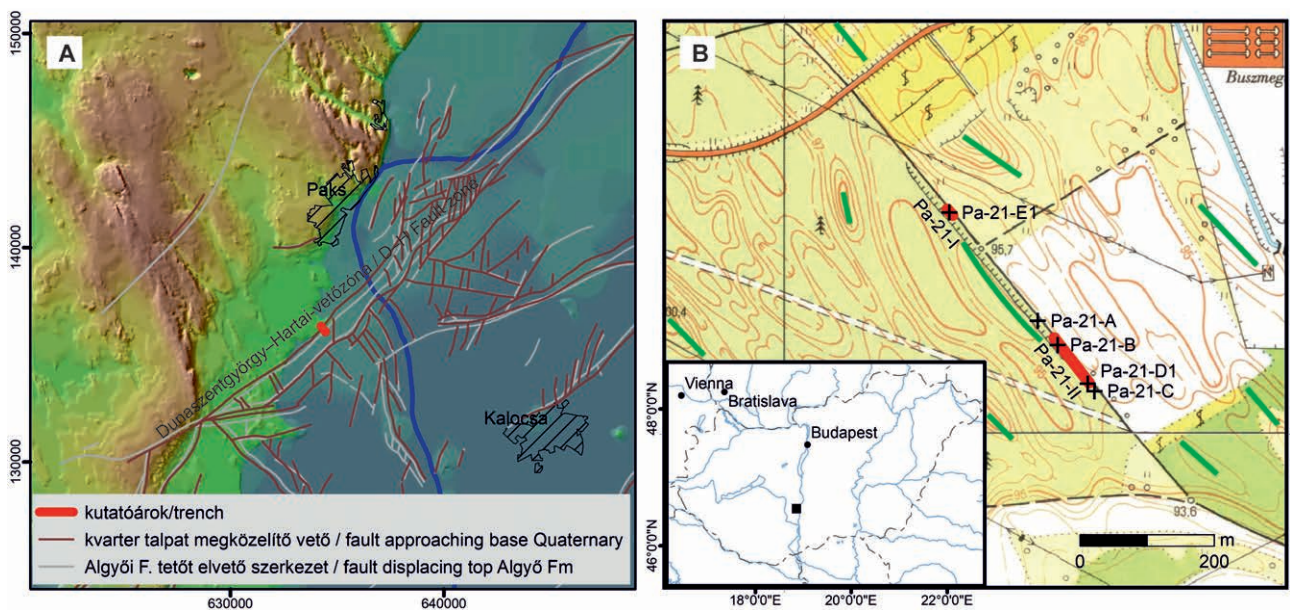
Bevezetés

Írásunkkal – bemutatva a Paks közeli, késő negyedidőszaki szerkezeti aktivitást bizonyító tektonikai elemeket – tisztelgünk HORVÁTH Ferenc professzor emléke előtt, aki munkatársaival már a kilencvenes években kimutatta a terület neotektonikai aktivitását (TÓTH & HORVÁTH 1997, 1999).

A Paks II atomerőművi beruházás földtani kutatási programjának elsődleges célja volt meghatározni, hogy milyen mértékű földtani veszélyekre kell a létesítményt méretezni. E program keretében kutatóárokban vizsgáltuk a legfiatalabb üledékeket, hogy feltárjuk esetleges tektonikus mozgások nyomait. A vizsgálatok elsődleges tárgya a területet átszelő Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna volt (HORVÁTH et al. 2019) (1. ábra A), feltárandó annak negyedidőszaki aktivitását.

vetőkutató sekélyfúrások (1. ábra B) tanúsága szerint 3–9 m vastag futóhomok borítja. Alatta 25–33 m felszín alatti mélységig a Duna negyedidőszaki üledékei (homok, kavics) húzódnak. A II. árok alatt a folyóvízi összlet fekéjében a Tengelici Vörösagyag Formáció található akár 10 m-t meghaladó vastagságban, az I. árok alatt ez hiányzik. Ezek után minden fúrásban a Pannon-tó üledékei (felső miocén Újfalui Formáció) következnek.

A két kutatóárkot (Pa-21-I és Pa-21-II) a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna csapására merőlegesen, egy földtani mentén, a terület morfológiáját meghatározó futóhomokbuckák hossz tengelyével közel párhuzamosan telepítettük (1. ábra). A két árok egy vonalban készült, 310–130° és 320–140° csapásirányban (1. táblázat). A tereprendevezéssel járó humuszeltakarítást követően 2 m mélységig mélyültek, így



1. ábra. A kutatóárok (pirossal jelölve) helyszínrajza. A) A helyszín HORVÁTH et al. (2019) vetőtérképén; B) a közvetlen környezet térképe. A zöld vonalak futóhomokbuckák tengelyét jelzik

Figure 1. Location of the trenches (red). A) Location in the fault map of HORVÁTH et al. (2019); B) the immediate surroundings. Green lines indicate axes of aeolian sand dunes

A földtani és geomorfológiai térképezés és a szeizmikus kutatás eredményei alapján kitűzött vetőkutató fúrások mélyítését követően lehetett megtervezni azon árkokat, amelyekben a felszínközeli rétegeket is érintő szerkezeti hatások előfordulása valószínűsíthető volt (1. ábra). Nem sok reményt fűztünk tektonikai elemek feltáráshoz negyedidőszaki rétegekben – különösen futóhomokban –, de várakozásunkkal ellentétben a kiválóan rétegzett üledékben minden utólagos hatásra bekövetkezett deformáció észlelhető volt (HALÁSZ et al. 2016). Jelen cikkben ezeket a deformációkat mutatjuk be és értelmezzük.

Vizsgálati helyszín, alkalmazott módszerek

A tágabb terület földtani viszonyait HORVÁTH et al. (2019) ismerteti. Az árkok közvetlen környezetében a felszínt a

az eredeti felszíntől számítva az árkok talp –3 méterben volt. Az eredeti felszíntől számított első métert 3,5 m szélességben, az azt követő 2 métert 1,5 m (Pa-21-I), illetve 1 m (Pa-21-II) szélességben mélyítették. A Pa-21-I árok 12 m hosszúságban készült el, a 84 m hosszúságú Pa-21-II árok kialakítása egyenes nyomvonal mentén, 12 méteres szakaszokban, 66 cm mély fogásokkal zajlott (2. ábra).

Az árkok felső szakaszát munkagép mélyítette, majd a munkát kéziszerszámokkal folytatták. Dokumentálás után az oldalfalakat pallókkal biztosították, így mindig csak a legalsó feltárt szakasz volt látható. Dokumentálás előtt – különösen a szerkezeti jelenségek előfordulási helyein – további felülettisztítást végeztünk. Az egyenes vonalban készült árkok sarokpontjait geodéziai bemérés határozta meg (1. táblázat). A szerkezeti elemekhez az első észleléskor azonosítót rendeltünk, ami az árok ÉNy-i kezdőpontjától méterben mért vízszintes távolság volt. Ebből követ-

I. táblázat. A kutatóárkok sarokpont-koordinátái

Table I. Co-ordinates of the trench vertices

Árok megnevezése Name of trench		Pa-21-I			Pa-21-II		
Csapás, hosszúság, szélesség Strike, length, width		310° - 130°; 12 m; 1,5 m			320° - 140°; 84 m; 1,0 m		
Sarokpontok Vertices	Vetületi rendszer Projection	Y	X	Z	Y	X	Z
ÉNy/NW	EOV	634241,69	136333,83	94,17	634401,24	136142,59	95,3
	WGS'84	N46° 34' 16,37"	E18° 50' 30,94"		N46° 34' 10,20"	E18° 50' 38,43"	
ÉK/NE	EOV	634242,9	136334,73	94,16	634402,26	136143,36	95,32
	WGS'84	N46° 34' 16,41"	E18° 50' 30,98"		N46° 34' 10,20"	E18° 50' 38,47"	
DNy/SW	EOV	634249,69	136324,82	94,14	634453,46	136075,9	95,28
	WGS'84	N46° 34' 16,08"	E18° 50' 31,31"		N46° 34' 08,04"	E18° 50' 40,88"	
DK/SE	EOV	634250,8	136325,68	94,17	634454,57	136076,81	95,31
	WGS'84	N46° 34' 16,12"	E18° 50' 31,36"		N46° 34' 08,07"	E18° 50' 40,97"	

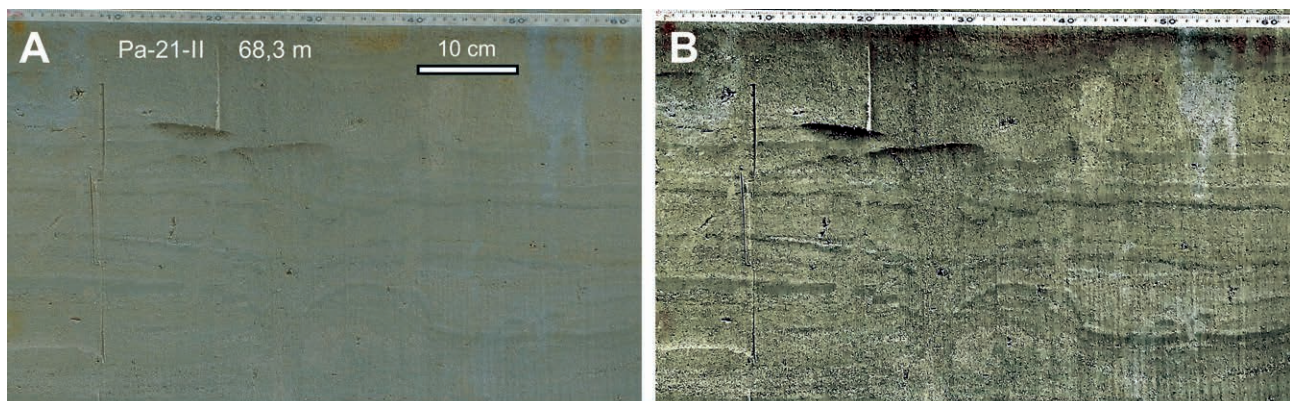


2. ábra. A Pa-21-II árok mélyítésének negyedik szakasza a harmadik mélységi fogással. A második szint már támfallal biztosított

Figure 2. Excavation of the fourth horizontal and third vertical segment of the Pa-21-II trench. The upper segment is already supported by retaining walls

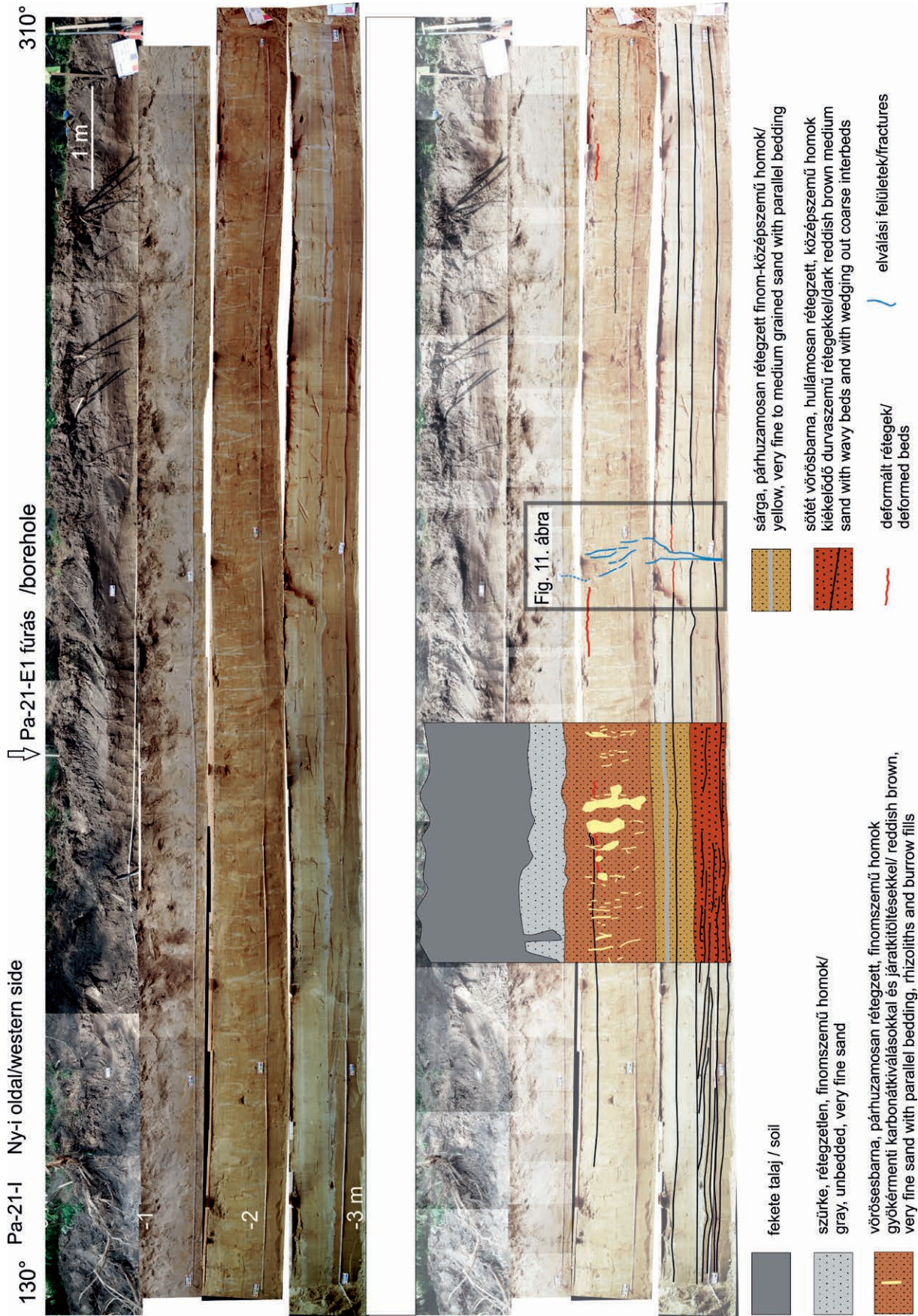
kezik, hogy egy fényképen vagy ábrán a szerkezet – a dőlés-szög, a csapásirány és az adott árokszakaszmélységének függvényében változva – nem feltétlenül az azonosítóként szolgáló távolságvértéknél helyezkedik el.

Az árkok falairól és talpáról fényképsorozat készült. A fényképeket Microsoft ICE programmal illesztettük, majd a panorámaképekre rajzolva emeltük ki a megfigyelt részleteket. Az egyöntetűen sárgásszürke rétegsorban jellemzően csak árnyalatnyi különbségek voltak a rétegek között, ezért az is előfordult, hogy egyes szerkezeteket csak az utólag manipulált fényképen ismertünk fel. A 3. ábra szemlélteti, milyenek voltak a láthatósági viszonyok az árokfalban (A), és hogy mennyire lehetett kiemelni a különbségeket – ACDSee Ultimate 9 – fényképszerkesztési módszerekkel (B). Mivel az árok szakaszosan mélyült, és a felső részeket biztonsági okból szádfalazták, az egyes szinteket különböző fényviszonyok mellett fényképeztük, továbbá a dokumentálás során nem volt



3. ábra. Az üledékszerkezetek láthatóságának szemléltetése. A) A Pa-21-II. árokban 68,3 méternél, 2,8 m mélységben látható üledékszerkezet eredeti fényképe; B) ugyanarról a fényképről ACDSee Ultimate 9 programmal készült kontrasztos változat. Értelmezése a 7A ábrán látható

Figure 3. Illustration of the visibility of structures in the sediment. A) Original photo of the structures in trench Pa-21-II at 68.3 m trench length and 2.8 m depth; B) the same photo after contrast enhancement in software ACDSee Ultimate 9. For the interpretation of the photograph, see Figure 7A



4. ábra. A Pa-21-E1 fúrás közelében mélyített Pa-21-I árok nyugati fala kompozit fényképsorozat, alul a megfigyelt szerkezetek kiemelésével. A bekeretezett részletet a 11. ábra mutatja a nagyobb felbontásban. *Figure 4. Western wall of the trench Pa-21-I close to the borehole Pa-21-E1. Upper image: photomosaic of the trench wall; lower image: the same, with the observed features marked on the photos. The frame shows the location of Figure 11*

kitartóak, több tíz méteren keresztül követhetők. A rétegdőlés vízszintes, egyes helyeken legfeljebb néhány fok, a rétegek igen kis hajlásszöge és egyenetlen felszíne miatt pontosan nem mérhető. A párhuzamos rétegek közé ritkán vékony, keresztarégtezett lencsék települnek.

A rétegek sík, kissé egyenetlen vagy hullámos geometriájúak. Az árok leírása során a dokumentálásra rendelkezésre álló idő nem tette lehetővé, hogy megvárjuk a felület megszáradását, ami szükséges lett volna a finom üledékszerkezetek vizsgálatához. A hullámok alatti esetleges keresztlemezesség így nem volt megismerhető. A hullámos rétegek sokszor egyenletes vastagságúak, de egyes esetekben megfigyelhető, hogy a következő, durvább szemcseméretű réteg elsősorban a hullámok közötti mélyedéseket tölti ki, a kiemelkedő részekre vékonyabban települ (1. 6. ábra A kép „b”-vel jelölt rétege). A Pa-21-II ároktalpon vízszintes metszetben megfigyelhető hullámok csapásiránya 65° – 245° és 110° – 190° között változott (6. ábra B).

A másodlagos üledékszerkezetek között gyakoriak az ásásnyomok. Mivel elsősorban az összlet felső részén fordulnak elő és gyakoriságuk lefelé erősen csökken, továbbá gyakran talajjal szennyezettek, kialakulásuk főként a teljes üledékképződés utánra tehető. A gyökérnyomok legtöbbször függőlegesek, esetenként az ároktalpig követhetők. Általában néhány cm széles, redukált – világosszürke vagy fehéres – színű elszíneződésként jelentkeznek. Középső részükön gyakran 0,5–1 cm vastagságban porózus, változó keménységű mészkiválás figyelhető meg (7. ábra A, 8. ábra).

A jól koptatott, sokszor matt felszínű homokszemcsék, a változatos szemcseméretű, de jól osztályozott rétegek, valamint az eróziós felszínnek és a gradáció hiánya vagy igen ritka előfordulása alapján a feltárt összlet eolikus eredetűnek, futóhomoknak minősíthető.

Az árok a felszínt alkotó, jórészt hosszanti típusú futóhomokbuckák tengelyével közel párhuzamosak, egy bucka

tengelyének két végén helyezkednek el (1. ábra). Emiatt az árkokban a homokdűne hosszmetaszetét látjuk, a rétegek az egykori, közel vízszintes tetőfelszínét képviselik, ennek köszönhető a kitartó, horizontális párhuzamos rétegződés. Az árok körüli buckák által mutatott szélirány illeszkedik a tágabb terület eolikus felszínformái – hosszanti dűnéi, parabolabuckái, deflációs eredetű völgyei – alapján nyomozható, valamint a tágabb környezetre megállapított (SEBE et al. 2011), késő pleisztocén – óholocén, ÉNy–DK-i irányú szélrendszerbe.

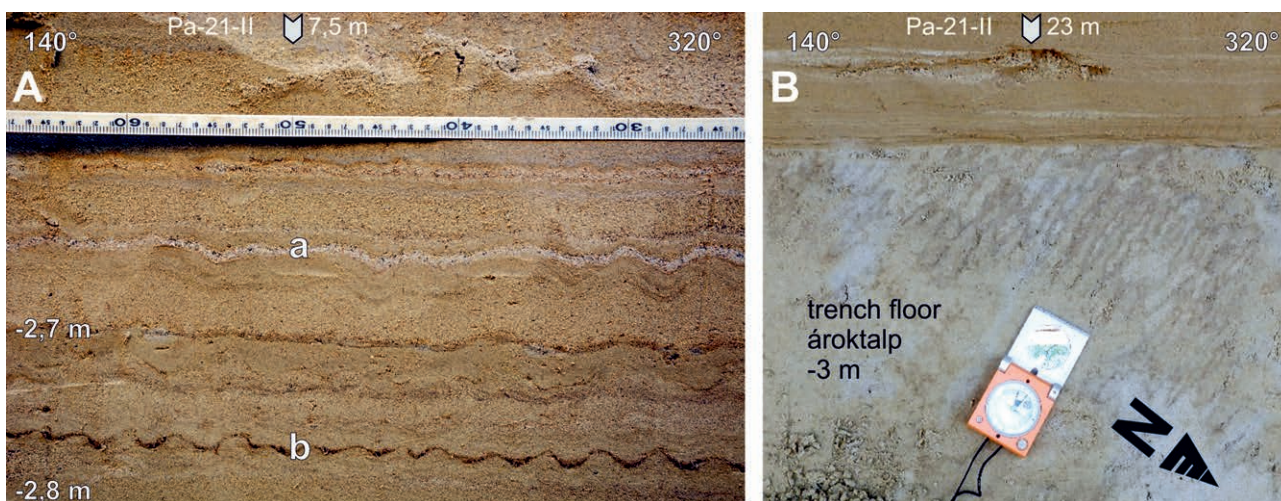
Szerkezeti megfigyelések

A kutatóárokban megfigyelt jelenségek két csoportra oszthatók: képlékeny deformációkra és olyan elválásokra (törésekre), amelyeket homokkitöltés kísérhet. Az üledékszerkezetek értelmezését megnehezítik a későbbi bioturbációs hatások. A Pa-21-I árokban töréseket, míg a Pa-21-II jelű árokban elválási felületeket, redőket és egyéb laza-üledékes deformációkat is dokumentáltunk.

Képlékeny deformációk

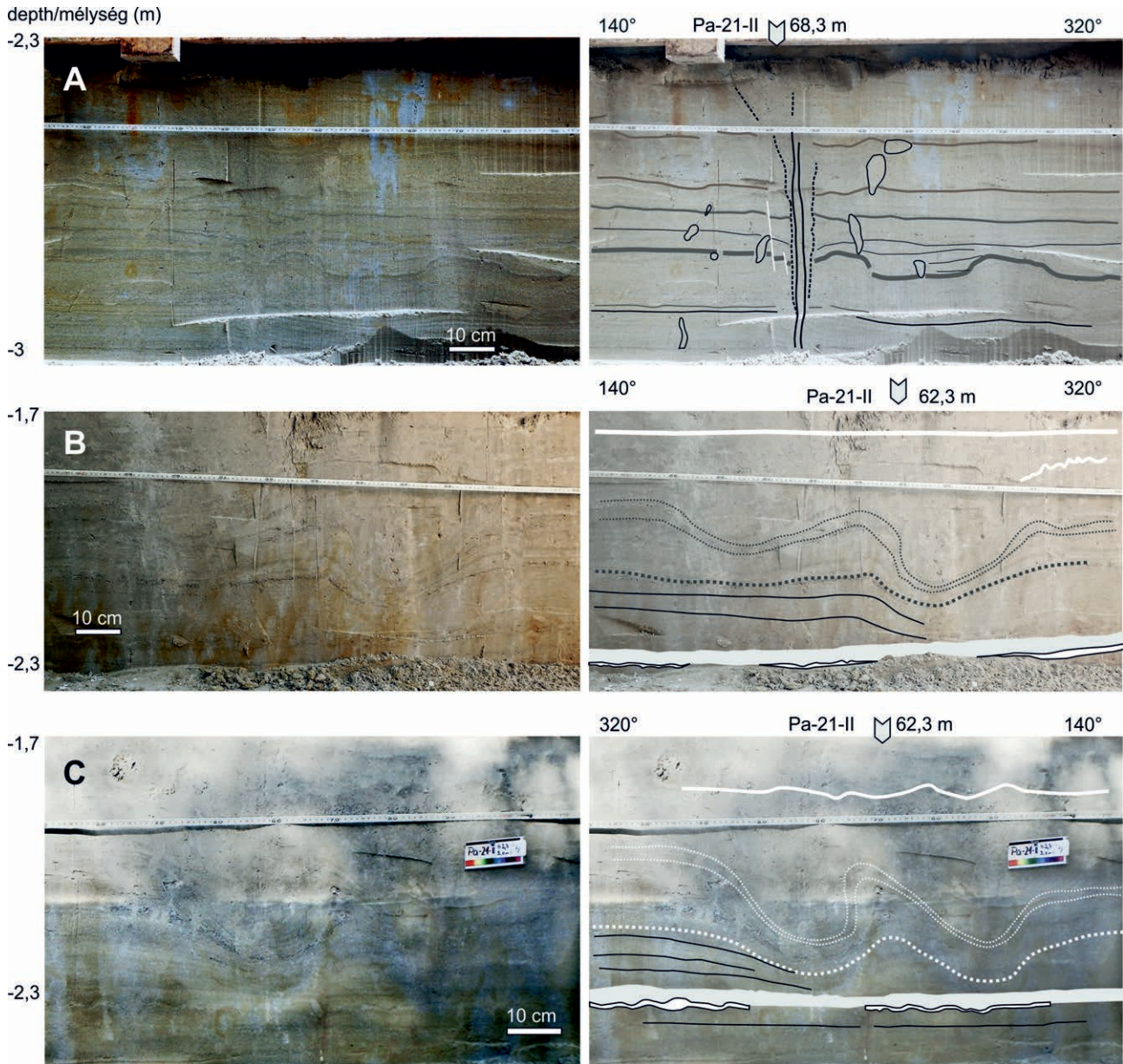
Képlékeny – törés nélkül megvalósuló, folytonos – deformációs jelenségeket egyes rétegcsoportokhoz kötődően, oldalirányban követhető formában, valamint lokálisan, kis kiterjedésben figyeltünk meg.

Az oldalirányban követhető deformációkat néhány dm-es amplitúdójú redők képviselik. Ezek több szintben megfigyelhetők voltak, és minden esetben csak egy szűk rétegcsoportot érintenek, a fekü és fedő rétegeket nem. A leglátványosabb redők sorozatai a Pa-21-II kutatóárokban, ~1,9 m mélységben (1,8–2,3 m mélység között) követhető rétegcsoportjában (5. ábra) fordultak elő, az árok 62,3 méterénél szimmetrikusan, mindkét falban (7. ábra B, C). A redők közül a legnagyobb átbuktatott, amelynek környezetében



6. ábra. Az árokban feltárt futóhomok jellemző üledékszerkezeti bélyegei. A) Párhuzamos, változó mértékben hullámos rétegek, az „a” és „b” réteg 0–52 m között követhető (5. ábra); B) hullámos rétegek vízszintes metszete az ároktalpon

Figure 6. Typical sedimentary features of the aeolian sands exposed in the trenches. A) Parallel, variously wavy beds, 'a' and 'b' can be followed between 0–52 m of the trench; B) horizontal section of wavy beds



7. ábra. Üledékdeformációs szerkezetek. A) Járatköltések és redők egy homoktélér környezetében; B) és C) átbuktatott redő a Pa-21-II árok mindkét falában
 Figure 7. Sediment deformations. A) Burrow fills and folds next to a sand dyke; B) and C) overturned folds in both walls of the trench Pa-21-II

kisebb, aszimmetrikus redők jelennek meg. A redők ÉNy-i szárnya meredek, a DK-i laposabb dőlésű. 46,5 m-nél ugyanebben a szintben, a keleti oldalfalban hasonló méretű redő figyelhető meg (8. ábra).

Az 1,9 mélység környékén láthatókhöz hasonló, de kisebb méretű redők sorozata más szintben is előfordul. 2,7 m mélységben 8–10 cm hullámhosszú, a fentiekhez hasonlóan aszimmetrikus redők (9. ábra, „b” réteg) jelennek meg, amelyek néhány homokrétet érintenek. A deformált rétegekben dél felé a redők mérete lecsökken, a hullámok szimmetrikussá válnak (9. ábra B).

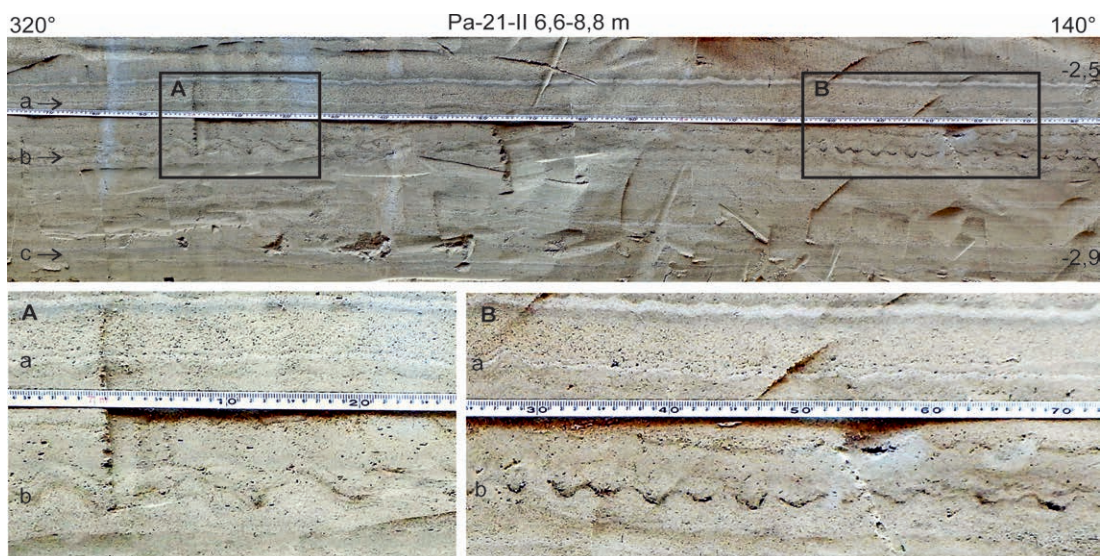
Számos kis kiterjedésű, lokális képlékeny deformációs szerkezet volt látható a Pa-21-II árokban. Mind magasságuk, mind szélességük 1–2 dm-es. Különböző mélység-

ben jelentek meg, legtöbbjük 2,7–2,8 m mélységben, egy finomabb szemű, sötétebb rétegben fordult elő (10. ábra). Az ebben a szintben sorakozó szerkezetek felső része erodálódott, a következő homokrétet fedik. A szerkezetek alakja változatos. 32,45 m-nél a rétegek többsége felfelé hajlik (10. ábra, E). 34,75 m-nél a rétegek lefelé mozdultak el, az egyik oldalon áthajlóak (10. ábra, F). A képződmény minden irányban kis kiterjedésű, valószínűleg kör alaprajzú lehet, megásva a falban befelé 10 cm után eltűnt. Gyakoriak az aszimmetrikus, tál alakú deformációk (10. ábra). Ezek között van olyan, amely nagyon hasonló formában mindkét falban előfordult (10. ábra A, B), mintha aszimmetrikus keresztmetszetű, vályúszerű vonalas elem lenne, 20°–200° csapással. A legtöbb formát olyan durvább homok tölti ki



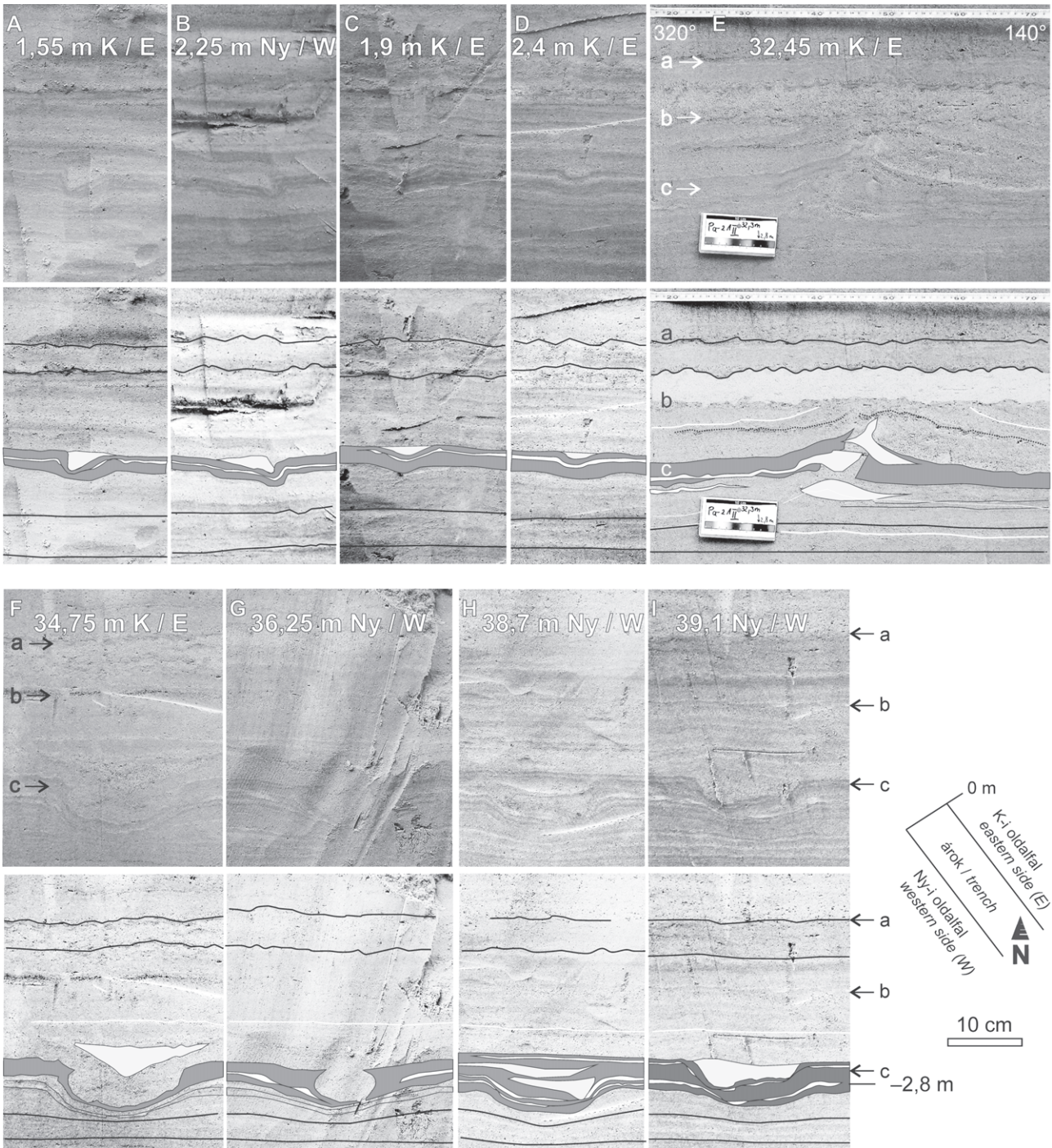
8. ábra. Redő 46,5 méternél a Pa-21-II árok keleti oldalában, 1,9 m mélységben. A karbonátkiválással kísért, fekete szaggatott vonallal jelölt képződmények gyökérnyomok és járatok

Figure 8. Fold at 46.5 m in the eastern wall of the trench Pa-21-II, at 1.9 m depth. Black dashed lines indicate root traces and burrows accompanied with carbonate precipitation



9. ábra. Redők változása egy réteg mentén. A „b” rétegben délen még szimmetrikus (B), néhány cm amplitúdójú redők magassága és hullámhossza É felé megnő, alakjuk aszimmetrikussá válik (A). Pa-21-II árok, K-i fal, 6,6–8,8 m közötti szakasz a 3 m mélyen lévő ároktalp fölött

Figure 9. Change of folds along a single layer. In layer „b”, symmetrical (B), uniform folds of a few cm amplitude increase in height and wavelength and become asymmetric towards the north (A). Trench Pa-21-II, eastern wall, between 6.6–8.8 m trench length, above trench floor at 3 m depth



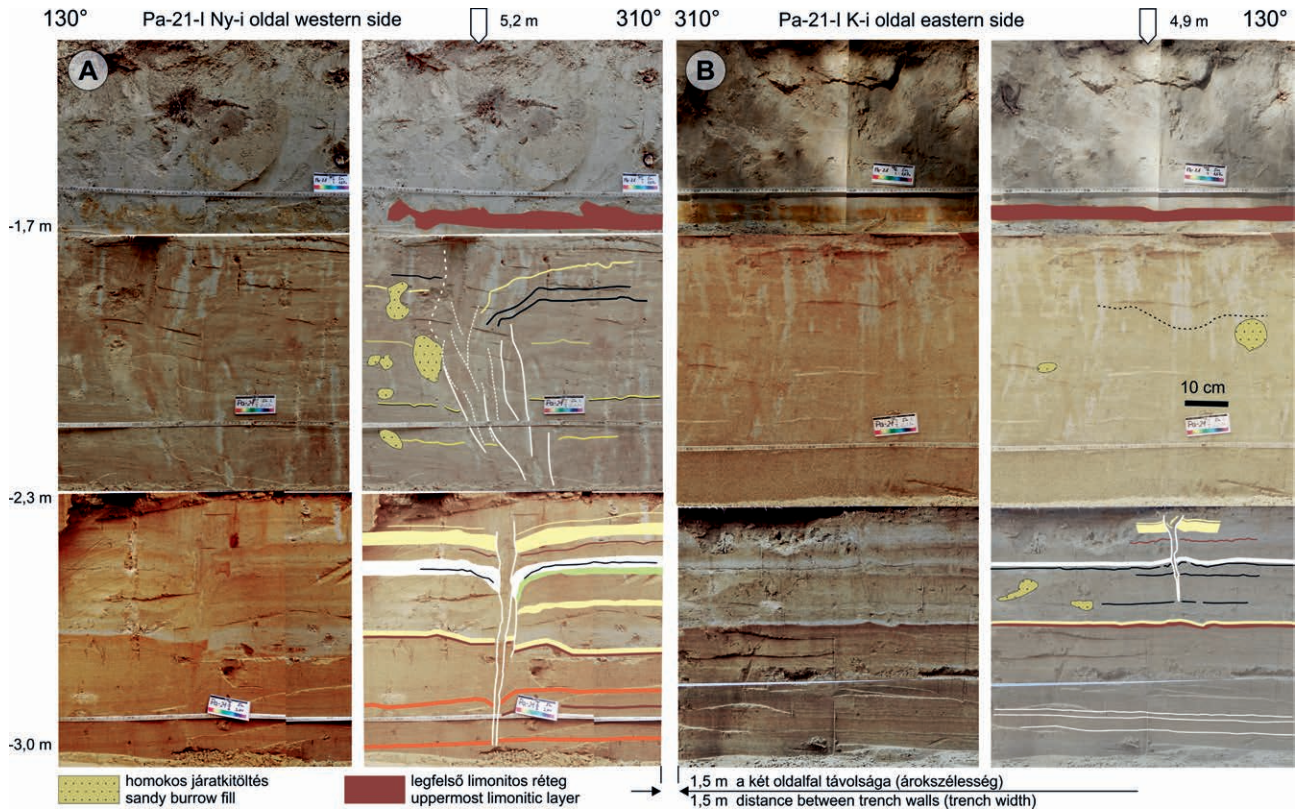
10. ábra. Kis kiterjedésű deformációk a Pa-21-II árokban, 2,7–2,8 m körüli mélységben
 Figure 10. Local deformations in the trench Pa-21-II, at a depth around 2.7–2.8 m

(az értelmező rajzokon világosszürkével jelölve), amely csak ezekben a mélyedésekben maradt meg, összefüggő réteget nem alkot.

Törések

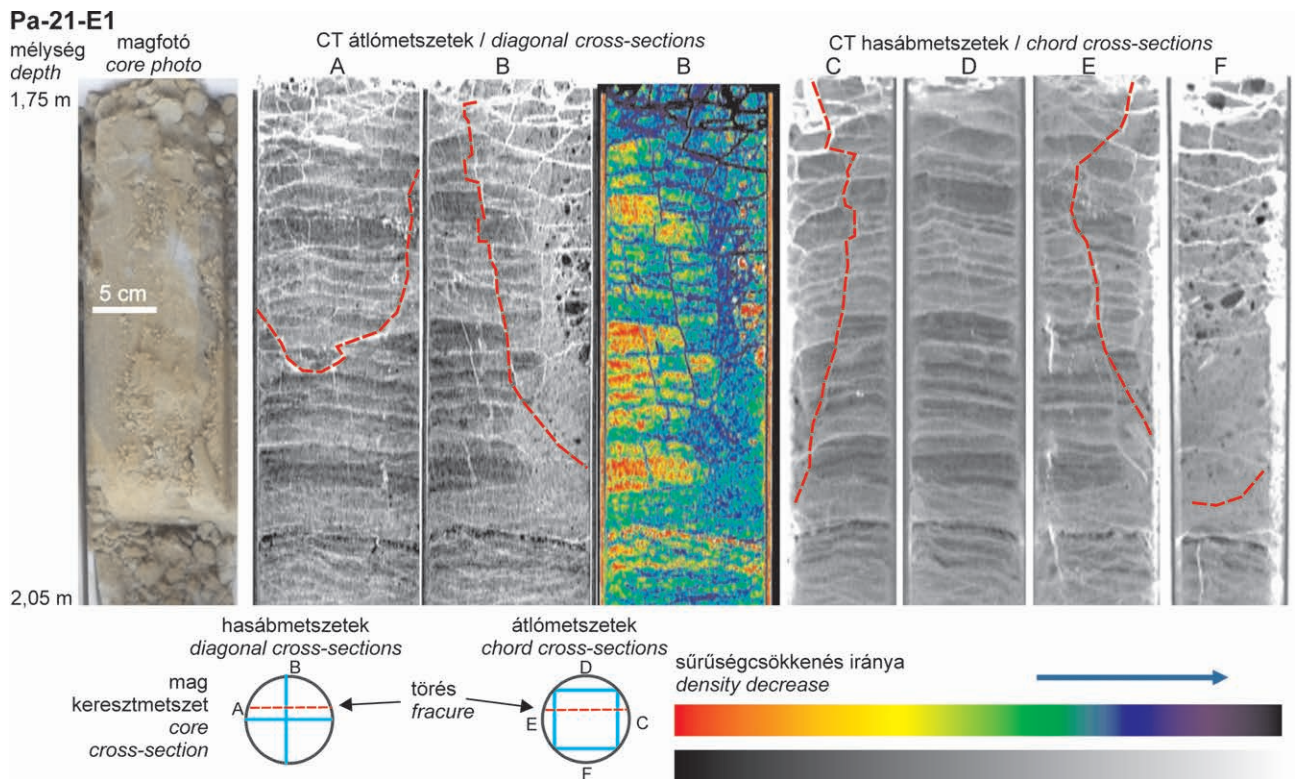
A Pa-21-I árok 5,2 méterében, a Pa-21-E sekélyfúrás közelében mindkét oldalfalban, metszetben „V” alakban felnyíló szerkezetet (4. ábra, 11. ábra) tártunk fel, amelyet kis redők kísérnek. Bár a szerkezet mindkét falban látszik,

fügőleges kiterjedése az egymástól 1,5 m távolságban lévő két falban erősen eltér, azt jelezve, hogy csapásirányban ÉK felé vélhetőleg kis távolságon belül kiékelődik. A nyugati oldalfalon egy ároktalpig követhető, felfelé szélesedő átmetsetű szerkezet látható, amely fölfelé kb. –1,7 méter szintig követhető, felette zavartalan rétegek települnek. A szerkezet a keleti oldalfalban is megtalálható, de ~2,5 m mélységben elvégződve. Felső része nem követhető, de 1,9 méter mélységben egy kisebb redő utal rá. A szerkezetet homogén



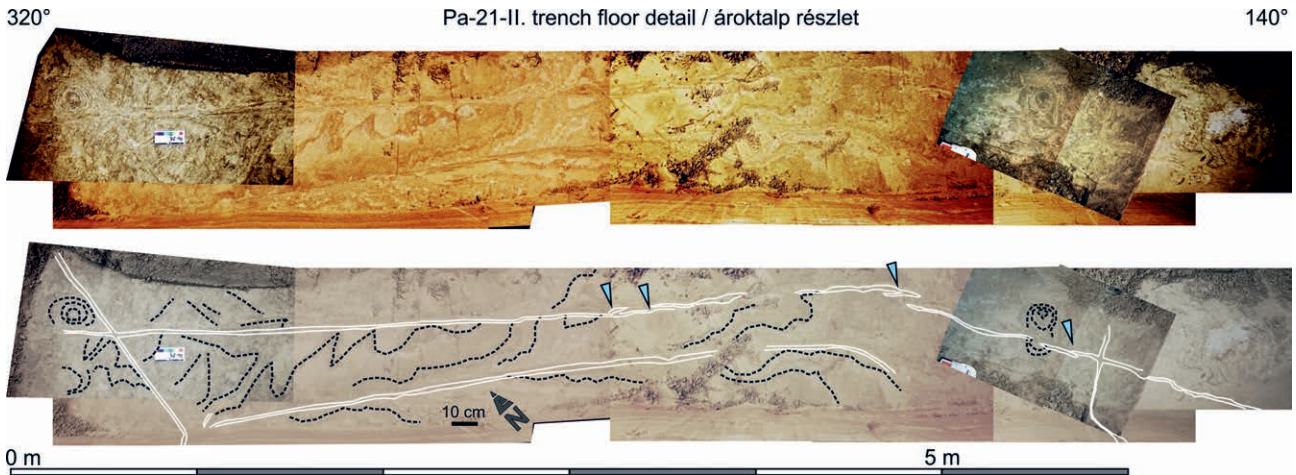
11. ábra. A Pa-21-I árok nyugati (A) és keleti (B) falában is megfigyelt, 5,2 méternél észlelt töréses szerkezet (fehér) a jól követhető, illetve azonosítható rétegek kiemelésével (sárga, barna, fekete)

Figure 11. The fracture observed in both walls of the trench Pa-21-I, at 5.2 m. The deformation is marked with white, the well identifiable layers with yellow, brown and black



12. ábra. A Pa-21-E1 fúrás (1. ábra) magányán CT segítségével kimutatott néhány cm-es elmozdulások 1,7 m mélységben (FÖLDES 2016, kiegészítve)

Figure 12. CT images of cores from the borehole Pa-21-E1 (Figure 1) showing displacements of a few cm-s at a depth of 1.7 m (FÖLDES 2016)



13. ábra. A Pa-21-II árok talpa 2–6 m között, a homokkal kitöltött törések (fehér vonal) és a rétegmetszetek (fekete szaggatott vonal) kiemelésével (alsó kép). Helyenként átlépő szerkezet figyelhető meg, amelyeket nyilakkal jelöltünk

Figure 13. Trench Pa-21-II floor between 2–6 m of the trench length. White lines indicate sand-filled fractures, black dashed lines show horizontal section of layers. At places stepover structures are visible, marked with arrows

középszemű homok tölti ki, rétegzettség nem látható, származási helye nem meghatározható. A rétegsort érintő limonosodás a hasadék kialakulása után játszódott le.

A Pa-21-I árok mélyítését a Pa-21-E1 jelű vetőkutató fúrásban 1,7 m mélységben FÖLDES (2016) CT vizsgálatával kimutatott néhány cm-es elmozdulások (12. ábra) indokolták. A fúrás helyét a Pa-21-I árok nyugati falának fényképén cövek jelöli (4. ábra). Figyelembe véve az árokban dokumentált V alakú szerkezet (4., 11. ábra) csapását és a fúrás helyzetét, valószínűsíthető, hogy a fúrásban észlelt elmozdulások is ehhez a szerkezethez tartoznak. A szerkezetet kis, normálvető jellegű elmozdulások és lehajló rétegek kísérik, de ezek lokális jelenségek, mert néhány deciméterrel távolabb a két oldal rétegei között már nem mutatható ki függőleges elmozdulás.

A Pa-21-II árokban dokumentált törések többsége dilatációs, homok kitöltéssel, ezek szélessége cm nagyságrendű, jellemzően 1–2 cm. Oldalfalaik gyakran zezugos lefutásúak és egyenletes szélességűek, peremükön a rétegek meghajlanak. A törések dőlése minden esetben meredek, 90° közeli. A csapásirány DNy–ÉK körül szóródik (5. ábra). A felületek csapásiránya ívesen változó lehet, amire a Pa-21-II árok talpának 2–6 m közötti szakasza mutat példát (13. ábra). A kitöltő homok eredete nem állapítható meg, egyneműbb, mint a befoglaló rétegsor, benne rétegzés nem látható.

A Pa-21-II árokban 0,5 méternél észlelt törés (14. ábra) a nyugati oldalon csak az árok legalsó szintjében jelentkezett, míg a keleti oldalon követhető volt a talptól az 1,9 m körüli mélységben megismert deformált rétegcsoportig (5. ábra). A hasadék két oldalán a rétegek eltérően deformálódtak. A keleti oldal alsó rétegei elvetést mutatnak, de ez a rétegsorban feljebb nem követhető. A nyugati oldalon 2,5 m mélységben elágazik a törés, a közrefogott egység a dilatáció következtében kibillent (15. ábra).

A homokkal kitöltött hasadékok fölfelé vagy lefelé is

elvégezhetőnek (16. ábra). A törések mentén a rétegek általában lefelé hajlanak. Ritkán fölfelé hajló rétegek is megfigyelhetők, mint a 41,2 méternél észlelt törés középső szakaszán (16. ábra) és a 71,9 m jelű törésnél (17. ábra).

A Pa-21-II árokban 37 méternél feltárt szerkezet (18. ábra) keskeny homoktelér, amely a talpon átlépő szerkezetet mutat, majd elvégeződik. Két oldalán rétegdeformáció és elmozdulás nem látható.

A legmarkánsabb szerkezet a Pa-21-II árok 43,7 m azonosítójú törése, amely feltárult mindkét oldalfalban, és követhető volt a –3 m talpszinten is (19. ábra). Felfelé szélesedő hasadékának kitöltésében felismerhetők a befoglaló rétegek foszlányai. 2,2 m mélységben már zavartalan rétegek fedik. Egy, az ároktalpról mélyített kisebb árokkal feltártuk további fél méterét, lefelé haladva a vetők okozta rétegdeformáció erősödni látszott (20. ábra), az ÉNy-i dőlésirányú fő vetőágak dőlésszöge 80–90 fokról 75°-ra csökkent.

Diszkussió

A deformációk eredete

A terület szeizmitásának megítéléséhez szükséges a homokban látható deformációk eredetének megállapítása. A deformációk egy része biogén eredetű (l. az üledékföldtanról szóló szakaszt), de többségük ezzel nem magyarázható. Keressük a választ arra, hogy utóbbiak szeizmikus folyamatok eredményeként jöttek-e létre; ha igen, akkor történt-e elmozdulás, milyen erősségű rengéseket jeleznek, milyen gyakorisága volt a földrengéses eseményeknek, és azok mikor zajlottak.

A laza üledékben kialakult képlékeny deformációk közül a néhány dm-es, lokális képződmények változatos alakúak, így keletkezésükre többféle értelmezési lehetőség is

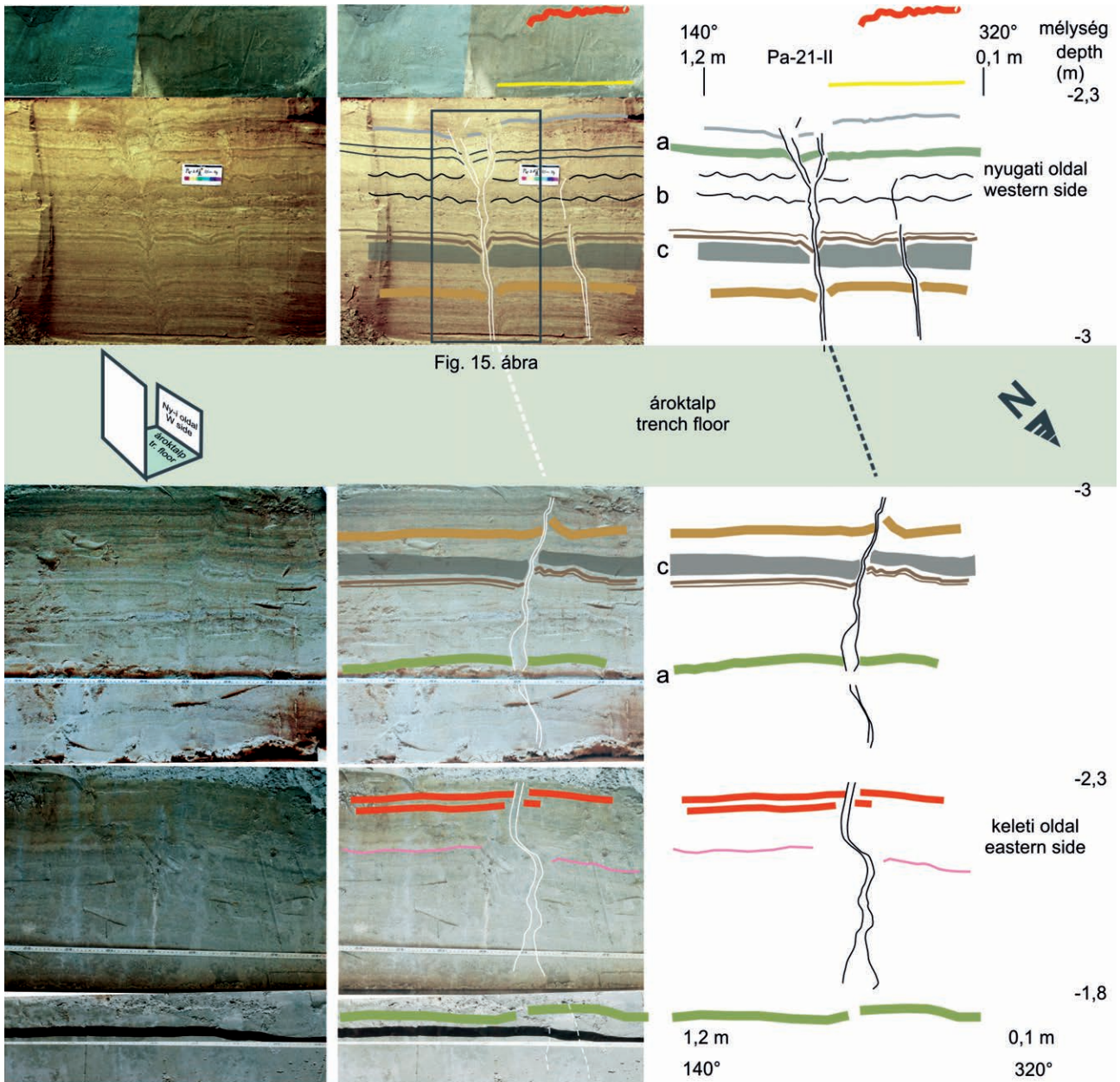


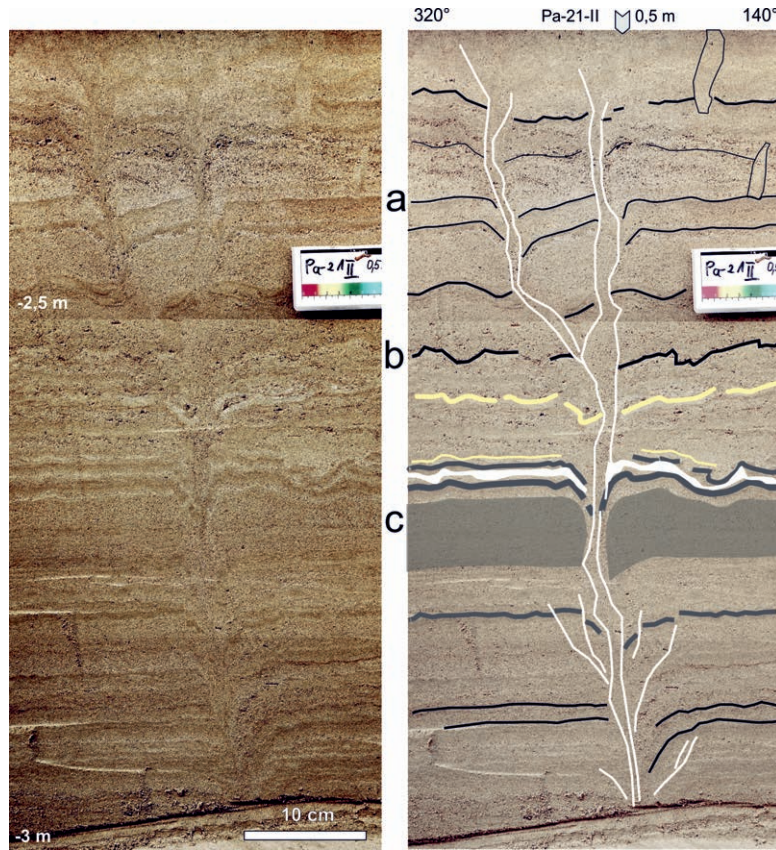
Fig. 15. ábra

14. ábra. A Pa-21-II árokban 0,5 méternél észlelt szerkezet kiterített ábrázolása. A szerkezeti elemek közelében aszimmetrikus rétegdeformáció látható mindkét oldalfalon

Figure 14. Unfolded representation of the structure documented at 0.5 m trench length. Next to the structure asymmetricly deformed layers are visible in both side walls (trench Pa-21-II)

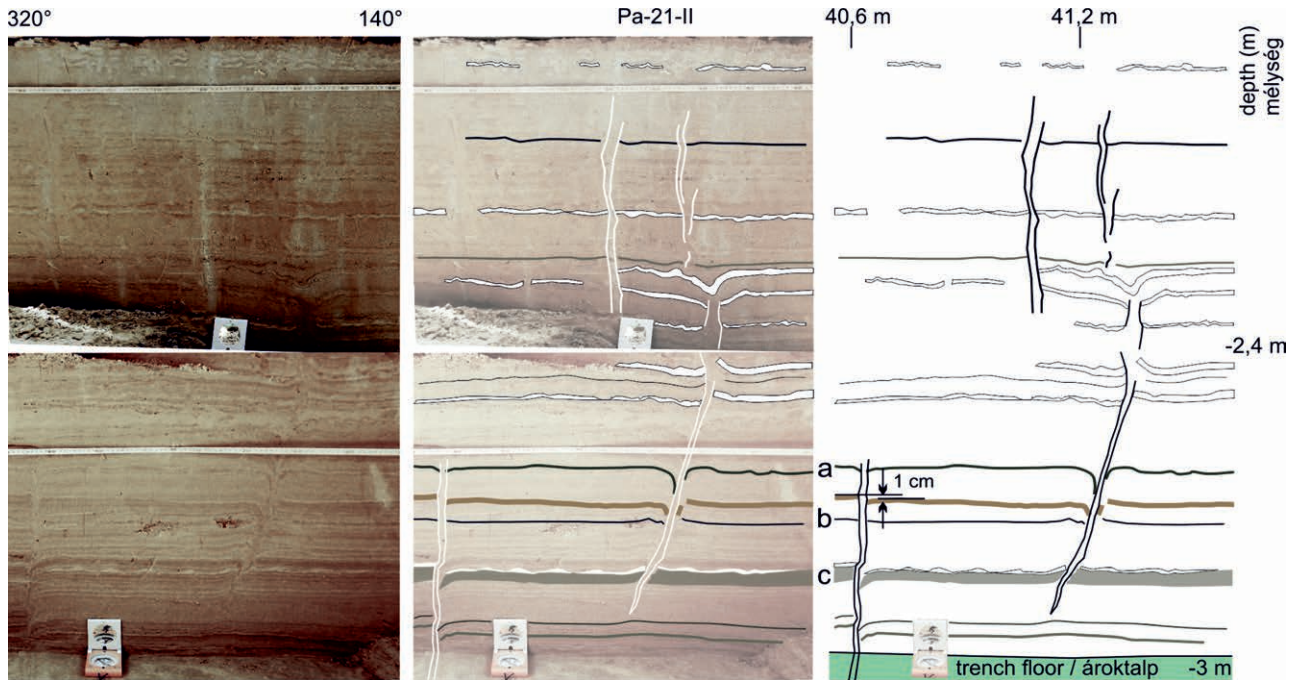
kínálkozik. A felfelé meghajló rétegformák alapján a 32,45 m-nél látható képződmény (10. ábra, E) vízkiszökési szerkezetként értelmezhető, ami szeizmikus eredetre utal, futóhomokban az eredete más mechanizmussal (pl. hirtelen terhelésnövekedés) nem magyarázható. A 34,75 m-ben észlelt deformáció (10. ábra, F) akár egy nagyobb állat lépésnyoma is lehetne, amit kialakulása után a benne csapdázódó durva homok töltött ki. Hasonló üledékszerkezeteket írtak le futóhomokból nagytestű állatok lépésnyomaként több helyen (MILÁN et al. 2007a, b, 2015; PILLOLA & ZOBOLI 2017; BENNETT et al. 2019). A felfelé nyomuló rétegszakaszok éles, hegyes formái ugyanakkor inkább vízkiszökésre

utalnak. Hasonló a helyzet a 36,25 m-nél lévő szerkezetnél (10. ábra G), ahol a perem mindkét oldalán „kihegyesedő” rétegek kizárják a lépésnyom értelmezésének lehetőségét. A leggyakoribb, aszimmetrikus, tál alakú szerkezetek (10. ábra, A–D, H, I) eredete is bizonytalan. Lefelé mélyednek, nincs nyoma az üledék fölfelé nyomulásának, sem keveredésének. A rétegek vastagsága alig változik meg, vízkiszökésre utaló jel nincs. Nem tűnik biogén eredetűnek az árok mindkét falában megjelenő, aszimmetrikus bemélyedés (10. ábra A, B) sem, amely akár egy vonalas szerkezet két metszete is lehet. Mindezek a formák fagydeformációként vagy talajkúszásként sem értelmezhetőek, mert túl ritkán



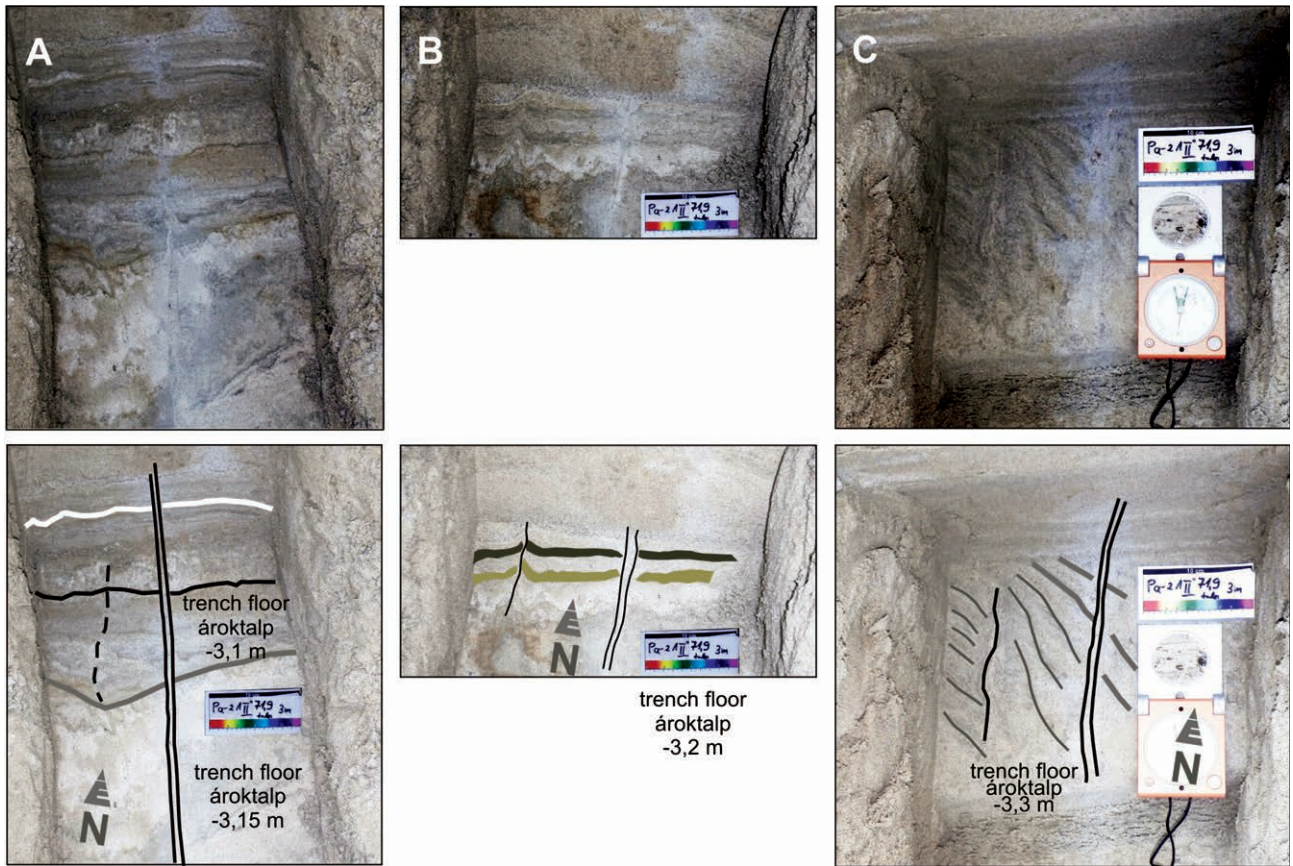
15. ábra. A Pa-21-II árokban 0,5 méternél észlelt szerkezet részlete a nyugati falban, a jobb oldalon a törések és néhány deformált réteg kiemelésével

Figure 15. Detail of the structure observed at 0.5 m trench length in the N wall of trench Pa-21-II. Fractures and some deformed layers are indicated in the right-hand image



16. ábra. A Pa-21-II árokban 40,6–41,5 m között feltárt törérendszer. A töréseket réteghajlások kísérik, a képen jobb oldalon látható törés középső részén a rétegek fölfelé hajlanak

Figure 16. Fracture array exposed between 40.6–41.5 m trench length. Fractures are accompanied by bent layers. Next to the centre of the right-hand fracture the layers bend upwards (trench Pa-21-II)

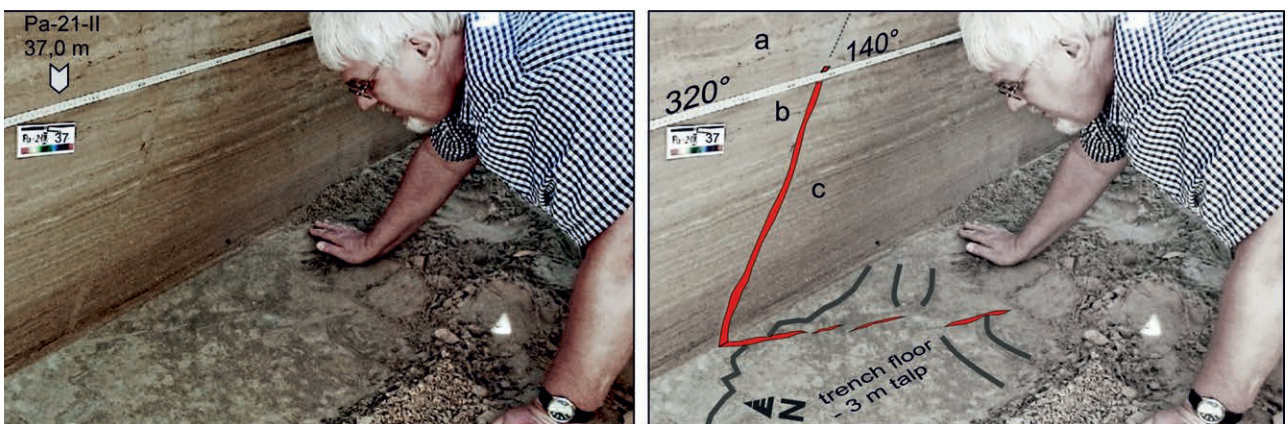


17. ábra. A Pa-21-II árok 71,9 m és 72,2 m azonosítójú szerkezeteinek változása a mélységgel

A képeken két párhuzamos hasadék közel vízszintes metszete látható a továbbmélyített ároktalpon. A kis gödör talpa néhány fok dőlésű, ezért a vízszintes, vékony rétegek jelentős álvastagságot mutatnak. Az A jelű képen még csak egy kiemelkedő (71,9 m jelű) törési sík metszete látható a kép közepén. Néhány centiméterrel mélyebben (B) a bal oldalon már megjelenik egy kiemelkedő újabb hasadék (73,2 m), amelyet erősebb rétegdeformáció kísér, fölfelé hajló rétegekkel. További 10 cm-rel mélyebben egy hullámos réteg vízszintes metszete látható (C). A lépték hossza 10 cm

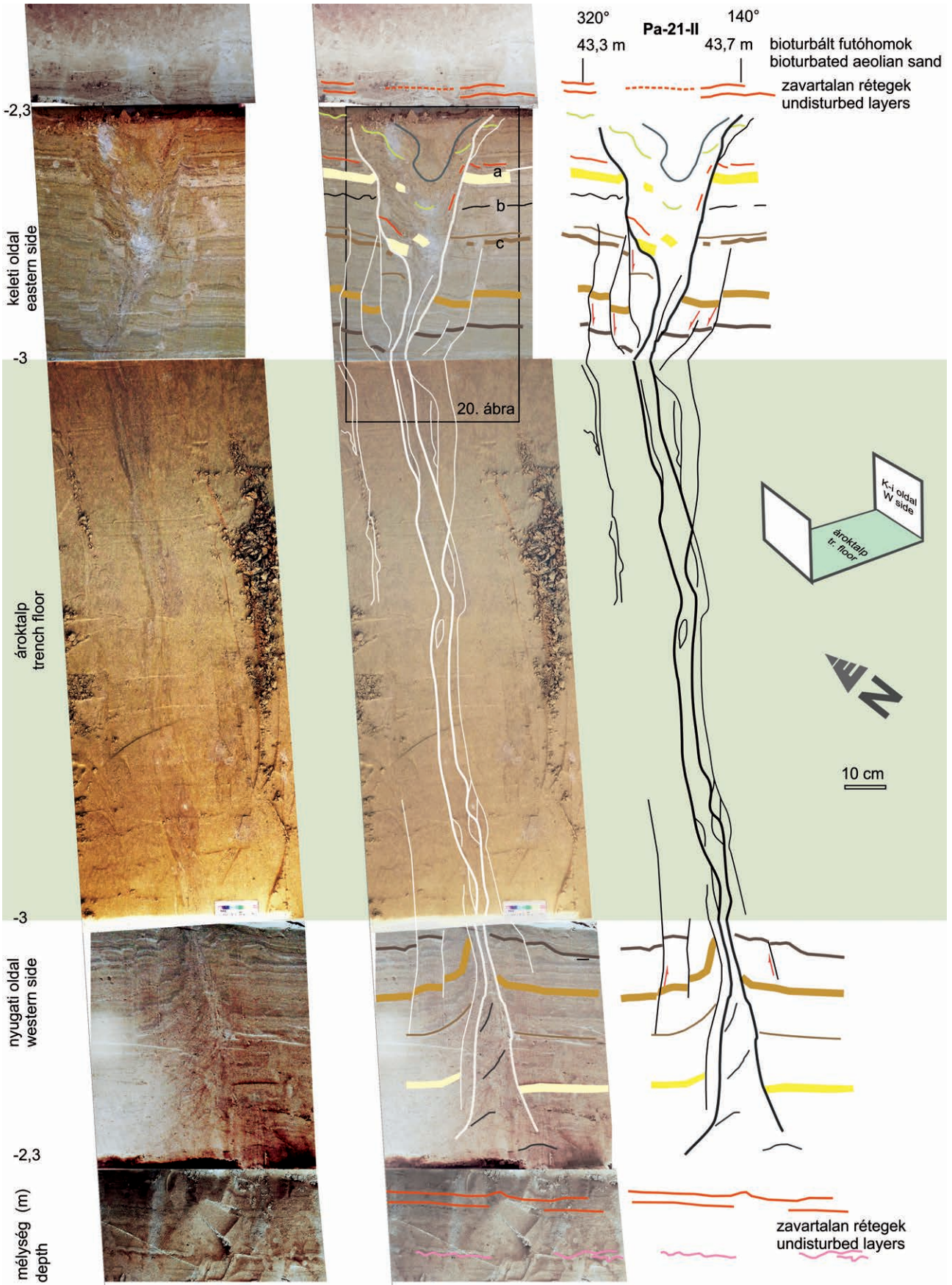
Figure 17. Structures observed in the trench (Pa-21-II) floor at 71.9 and 72.2 m trench length

Horizontal sections of two, nearly parallel fractures, excavated below the trench floor in a few cm steps. Bedding is horizontal, while the trench floor has a few degrees dip, thus the thin layers display considerable apparent thickness. Figure A shows only one fracture (marked as 71.9) in the centre of the image, which wedges out. Some cm deeper (Figure B) a new fracture (72.2) appears on the left side, accompanied by more strongly deformed layers with upward bent beds. Further 10 cm deeper (Figure C) a wavy layer was exposed. No horizontal displacement was visible. Paper scale is 10 cm long

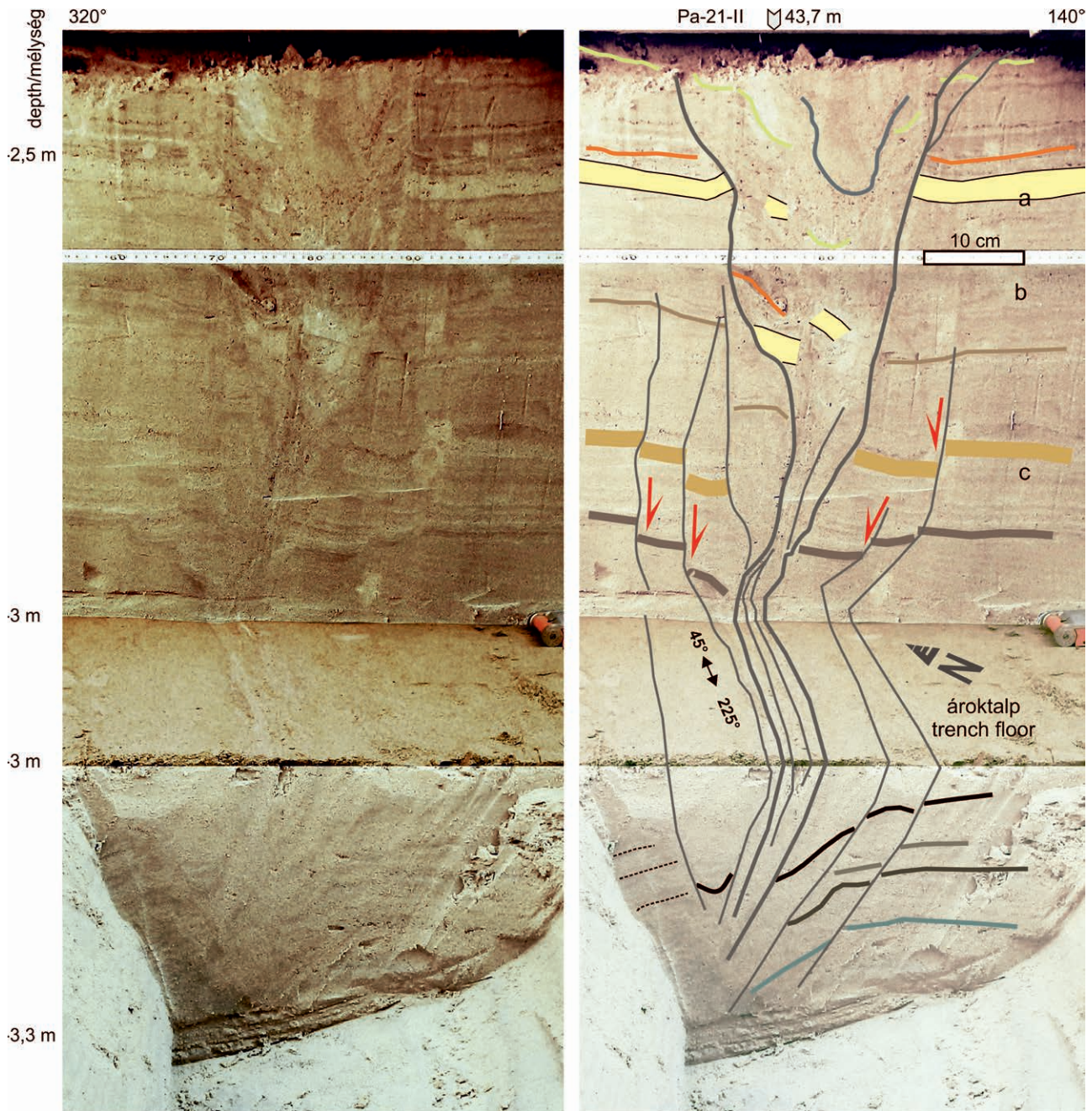


18. ábra. Átlépő törés a Pa-21-II árok 37. méterében. A törés két oldalán a rétegek nem deformáltak. A képen a törést HORVÁTH Ferenc professzor tanulmányozza

Figure 18. Overstepping fractures at 37 m trench length (trench Pa-21-II). The layers are undeformed on both sides of the fracture. The fracture is being studied by professor Frank HORVÁTH



19. ábra. A Pa-21-II árok 43,7 méternél, 3 méter mély talp felett észlelt szerkezet kiterített ábrázolásban. Nem metszi a -2,3 méter szint feletti rétegeket
 Figure 19. Unfolded image of the structure at 43.7 m trench length (Pa-21-II), with trench floor at 3 m depth. The structure is sealed by the layers above 2.3 m depth



20. ábra. A Pa-21-II árokban a 43,7 m jelű szerkezet részlete (keleti oldalfal, 3 m talpmélység) és folytatása az ároktalp alatt

Figure 20. Detail of the structure exposed at 43.7 m trench length (Pa-21-II). Eastern side wall, trench floor at 3 m depth, the structure excavated below trench floor

helyezkednek el, és formáik túl szabályosak, a deformált réteg vastagsága alig változik. Így ezeknek a szerkezeteknek a szeizmikus eredetét sem alátámasztani, sem cáfolni nem tudjuk, de keletkezésük egyidejű a vízkiszökést mutató, csak szeizmikus eredettel magyarázható szerkezetek létrejöttével.

A redőzött rétegek esetében, mint amilyen a Pa-21-II árokban 1,9 m körüli mélységben húzódó, néhány dm vastag rétegcsoport (5., 7., 8. ábra), a deformáció kiváltó oka szeizmikus hatás lehetett. Az átbuktatott homokrétegek nyilvánvalóan nem rakódhattak le ebben a formában, és

atektonikus folyamattal (pl. gravitációs megcsúszással) sem tudjuk magyarázni őket, hiszen a gyakorlatilag vízszintes futóhomokösszletben üledékfolyás, -csúszás vagy -kúszás nem alakulhatott ki.

Kérdéses a hullámos rétegek formáinak eredete is. A legtöbb hullám a mérete alapján homokfodor (áramlási fodor) is lehetne. Az üledékes eredetet ugyanakkor több megfigyelés cáfolja:

- sehol sem láttunk keresztlemezőséget a hullámok alatt;
- a hullámok keresztmetszete nem felel meg áramlási

fodorának, amelyeknek a felső határa normális esetben aszimmetrikus, és az alsó és felső határfelülete nem szokott párhuzamos lenni;

- bár aktív futóhomok-területeken közönségesek az áramlási fodrok a felszínen, szelvényben, a már lerakódott üledékben a réteghatárok nem hullámosak, hanem többé-kevésbé sík felületek: az aktív homokfodrok tetejét az erózió gyorsan legyalulja, a következő réteg pedig lefedi;

- egymás fölött több, különböző szemcseméretű rétegben pontosan ugyanott vannak a hullámok gerincei és völgyei. Ez még akkor is nagyon valószínűtlen lenne, ha egyforma szemcseméretű rétegekben fordulna elő, ám eltérő szemcseméretű homokban az áramlási fodrok mérete (hullámhossza) is eltérő kellene, hogy legyen;

- a szimmetrikus hullámos formák egyazon réteg mentén aszimmetrikus redőkbe mennek át (9. ábra).

Ilyen kis méretű, szabályos formák kitaró sorozatát nem tudja krioturbáció vagy talajkúszás sem létrehozni. A földrengéshullám hatásán kívül nem tartunk valószínűnek más magyarázatot. Amennyiben a hullámos rétegek szeizmikus hatásra nyerték el formájukat, annak további következményei vannak az értelmezésüket illetően. Az egyik, hogy a hullámos formák irányultságát ekkor nem a szélirány, hanem a lökeshullám iránya kell, hogy meghatározza. A hullámok csapása az árokban 65–245° és 110–190° között változott, ez valóban nem felel meg az egykori ÉNy-i széliránynak, nem merőleges rá. A másik, hogy ha a rétegek ugyanazon esemény hatására deformálódtak hullámosossá, mint amely esemény az őket metsző töréseket létrehozta, akkor vélhetőleg nem várható, hogy a hasadékok két oldala között a hullámok segítségével vízszintes elmozdulást lehessen kimutatni.

A törések/hasadékok esetében a periglaciális és a tektonikus eredet lehetősége merül fel. Ennek eldöntésében nagy segítség volt LUNINA & GLADKOV (2016) tanulmánya a szeizmikus és a kriogén eredetű homoktelérek összehasonlításáról. Az árokban feltárt némely szerkezethez formailag hasonló képződményeket jégékként írt le EISSMANN (2002), FRENCH (2007), ANDRIEUX et al. (2016), LUNINA & GLADKOV (2016). Több szerző (THORSEN et al. 1986, OBERMEIER 1996, WORSLEY 2014, LUNINA & GLADKOV 2016) hangsúlyozza, hogy gyakran nehéz elkülöníteni a periglaciális területek kriogén formáit a szeizmikus hatásra létrejött szerkezetektől. Esetünkben a kriogén eredetnek ellentmond, hogy

- némelyik hasadék nem paleofelszíntől indul, illetve felfelé kiékelődve végződik (16., 17. ábra), hasonlóan a szeizmikus homokinjekciók megjelenéséhez (OBERMEIER 1996, RODRÍGUEZ-PASCUA et al. 2000);

- a rétegdeformáció iránya helyenként ellentétes, azaz ugyanazon törés mentén lefelé és fölfelé hajló rétegek egyaránt előfordulnak (16. ábra);

- az árok két oldalában eltérés volt ugyanazon szerkezet felhatolási magasságában;

- előfordulnak átlépő szerkezetek;

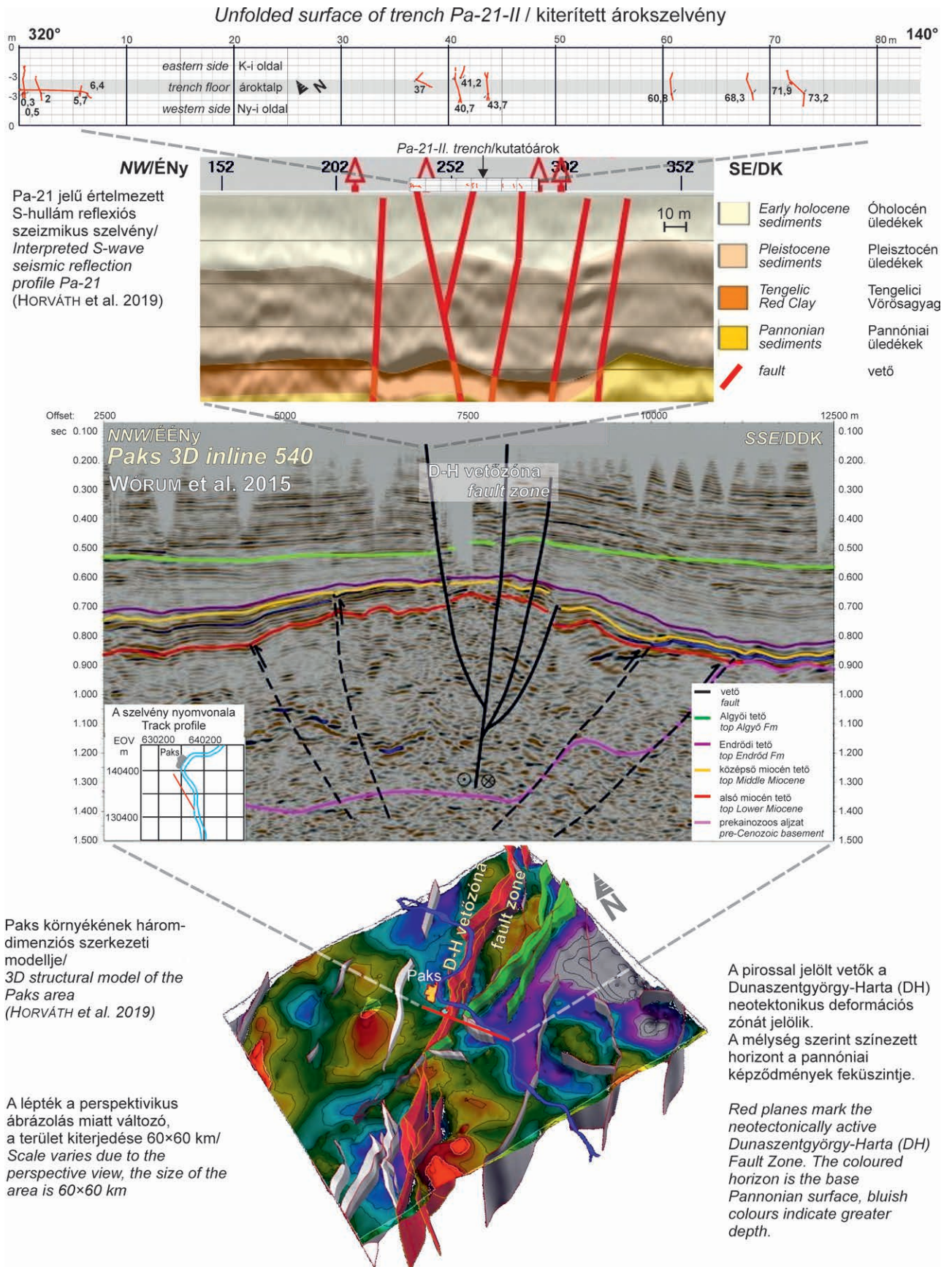
- a fölfelé kiszélesedő hasadékban néhány esetben nem későbbi, zavart szerkezetű vagy a környezettől eltérő réteg-

zetségű üledék, hanem a rétegsor lezökkenő darabjai találhatók meg (15., 20. ábra).

A periglaciális eredet ellen szól RUSZKICZAY-RÜDIGER & KERN (2016) térképe is, amelyen mind az állandó, mind az időszakos permafroszt zóna határát e területen kívül húzzák meg. FÁBIÁN et al. (2014) ugyan említenek Paks környékéről jégék-előfordulást, de leírást, dokumentációt nem közöltek, így feltételezzük, hogy az itt leírtakhoz hasonló, azaz szeizmogén eredetű képződményt észleltek.

A homokkal kitöltött hasadékok/törések csapása (5. ábra) illeszkedik a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna DNy–ÉK-i csapásához, illetve a vetőzónát kísérő kisebb vetőszegmensekhez (1. ábra, HORVÁTH et al. 2019). A szimmetrikus rétegelhajlás a szeizmikus homokinjekciók sajátos morfológiai jellemzője, az elhajlás iránya a benyomulás irányát mutatja. Ellentétes irányúak is előfordulhatnak egy homoktelér mentén (RODRÍGUEZ-PASCUA et al. 2000). Ezt a jelenséget tapasztaltuk a Pa-21-II árokban a 41,2 m azonosítójú törés oldalfalai mentén (16. ábra). Vizsgált területünkön a rétegek szimmetrikus lefelé hajlása jellemző, ezekben az esetekben a felszínközeli helyzet miatt a homokinjekciós eredet kizárható. Minthogy fentebb a kriogén eredetet is kizártuk, a rétegdeformációkat a szeizmikus eredetű dilatációs hasadékok kísérőjelenségének kell tartanunk. Itt jegyezzük meg, hogy CSILLAG et al. (2016) hasonló jelenségeket észleltek a vetőzóna délnyugatabbi szakasza mentén, és szintén szeizmikus eredetűnek határozták azokat. A fölfelé szétnyíló, paleofelszínig hatoló hasadékokhoz (11., 19., 20. ábra) hasonló szerkezetet számos földrengés kapcsán leírtak, ilyen mutat be ALESSIO et al. (2012), CAPUTO et al. (2012) vagy MORETTI & LOON (2014) a 2012-es olaszországi, emiliai földrengés következményei között.

Törés menti függőleges elvetést vagy vízszintes eltolódást bizonyító megfigyeléseink nincsenek. Egyes törések közvetlen közelében (1–2 dm-es távolságon belül) egy-egy rétegcsoport ugyan elhajlott többnyire lefelé, ritkábban felfelé, ezek azonban helyi deformációk, nem elvetések, a törés mentén sem jelentkeznek következetesen. A vízszintesen rétegzett üledékben az oldalelmozdulás kimutatható lenne, ha az ároktalpon elmetszett homokfodrok párhuzamos vonalakként megjelenő réteglemezeinek elmozdulását sikerülne feltárni. Azt találtuk, hogy a Pa-21-II árok ÉNy-i, kezdeti szakaszának talpán a törések két oldalán helyenként eltérő a hullámos rétegek metszetének mintázata (13. ábra). Ennek legvalószínűbb oka azonban a függőleges falban jól megfigyelhető, a töréseket kísérő aszimmetrikus rétegdeformáció (ami jól látható a 14. ábrán), nem pedig elvetés. A 71,9 m azonosítójú törés mentén feltárt réteghullám-átmetszetek (17. ábra) sem jeleznek elmozdulást, ami az ábra B részletéből következik. A C részleten, kissé mélyebben látható „zavar” így csak a szokásos törés menti rétegdeformáció következménye lehet. Figyelembe kell venni azonban, hogy mint fentebb kifejtettük, a homokrétegek hullámos szerkezeteinek legalább egy része szeizmikus és nem üledékes eredetűnek valószínűsíthető, így azok elmozdulás kimutatására nem feltétlenül alkalmasak.



21. ábra. A Pa-21-II kutatóárokban feltárt szeizmotektonikus elemek (legfelül) kapcsolata a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzónával
Figure 21. Linkage between the seismotectonic features exposed in the trench Pa-21-II (top) and the Dunaszentgyörgy-Harta Fault Zone

A Pa-21-II árokban feltárt törések főként az árkolást megelőzően mért Pa-21 jelű, S-hullám reflexiós szeizmikus szelvényben értelmezett vetők felett jelennek meg (21. ábra). Néhány esetben lefelé elvégződnek, valószínűsíthetően átlépő szegmensekben folytatódnak. AKYÜZ et al. (2014) szerint a vetők felszínközeli szakaszain is meg kell jelenni az elvetésnek, míg a másodlagos kísérőjelenségek között lehetnek elvetés nélküli törések. A 43,7 méternél észlelt törésnyaláb (20. ábra) utal leginkább vetőszerkezetre, bár a a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna eltolódásos jellegének megfelelő vízszintes elmozdulást a vízszintes rétegekben nem tudtuk kimutatni. Az elmozdulások hiányának egyik oka lehet a törések felszínközeli diszperzója. A másik, valószínűbb oka pedig az, hogy az alaphegyeségi kőzeteket igazoltan elvető vetőzóna fölött több száz méter vastag kainozoos üledéksor található, amelynek felső szakasza alig vagy egyáltalán nem konszolidált. A felszínhez közeli Duna-üledékek és az őket fedő futóhomok még alig tömörödött, porozitásuk nagy, de még a fekjükben található felső miocén rétegsor sem konszolidált. Ezek a kőzettestek a deformációt már mélyebb szintekben, hosszabb szakaszon elosztva fel tudják venni, így a vetőzóna fölött a felszín, illetve a felszínközeli rétegek már nem deformálódnak észlelhető módon.

A törések mentén kialakult hasadékok jellemző kitöltő anyaga a befoglaló rétegek törmeléke. Ez nem volt egyértelmű a Pa-21-II árokban a 41,2 m azonosítójú (16. ábra) és a 71,9, 72,2 m azonosítójú (17. ábra), fölfelé kiékelődő hasadékok esetében, ezeknél valószínűsíthetjük a benyomulások (injekciós homoktelér) eredetét. Így értelmezésünk szerint a dokumentált hasadékok nem feltétlenül a vetőágak közvetlen, felszínig hatoló folytatásai, hanem közvetetten, a földrengéshullámok hatására alakulhattak ki a vetők fölött. Ez a jelenség máshol is megfigyelhető, ahol felszínközeli hatoló vetőt konszolidálatlan üledékek fednek (pl. LAVECCHIA et al. 2012).

Törések és képlékeny deformációk 5-nél kisebb magnitúdójú rengések során is keletkezhetnek. Az injekciós telérek kialakulásához üledékfolyosodás szükséges, ami 5-ös magnitúdó felett következik be (ATKINSON 1984, MCCALPIN 2009, OBERMEIER et al. 2005, PIRROTTA et al. 2007). PIRROTTA et al. (2007) 75 talajfolyosodással járó földrengés feldolgozása alapján úgy találták, hogy a jelenség 69%-a 6,6-os magnitúdónál vagy afölött alakult ki, 24% 5,6–6,5 között, és 7% 5,5 alatt. A vetőzónák felett megjelenő dilatációs hasadékok is csak 5 magnitúdó feletti földrengésekhez kötődnek, tehát a megfigyelt szeizmikus jelenségeket 5 magnitúdónál nagyobb energiájú földrengések eredményezték.

A deformációk kora

A deformációkat tartalmazó futóhomokösszlet korának behatárolásához OSL- és radiokarbon-mérések eredményei állnak rendelkezésünkre. A Pa-21-II kutatóárok keleti falának 11,7 méteréből, 2,06 m mélységből származó minta (5.

ábra) OSL kora $19,3 \pm 1,5$ ka, a 2,55 m mélységből származóé $20,7 \pm 1,9$ ka (THAMÓNÉ BOZSÓ & FÜRI 2016b). Ez összhangban van a futóhomok alatt települő dunai üledékek III-6-D telephelyi fúrás [EOV 635240,05; 137514,18] 18,7–19,2 m mélységközéből származó mintájának a $30,4 \pm 2,5$ ka lumineszcens korával (THAMÓNÉ BOZSÓ & FÜRI 2016a). Radiometrikus mérésre alkalmas mintaanyag a futóhomokból az árokban nem került elő, azonban az árok nyomvonala mellett mélyült Pa-21-C fúrásból lehetséges volt gastropoda héjtörmelék szeparálni. A 4,5 méterből származó minta kalibrált ^{14}C kora 28 890 – 28 040 év (cal BP, ± 2), a 2,3 m mélységből származó mintáé 36 630 – 35 030 év (MOLNÁR & VERES 2016), azaz a felső réteg kora több ezer évvel idősebbnek adódott az alsóénál. Ennek lehet oka a minta csekély mennyisége (l. Módszerek fejezet), de okozhatta az is, hogy a felső réteg áthalmazott csigahéjakat tartalmazott. Emiatt a radiokarbonkorok óvatosan kezelendők, és legfeljebb az alsó mintára kapott értéket fogadhatjuk el. Bár két mérésből nem lehet messzemenő következtetéseket levonni, a két OSL-minta távolságával, a korok középértékével és nagyjából egyenletes üledékfelhalmozódási ütemmel számolva (0,5 m felhalmozódás 1,4 ka alatt) az alsó ^{14}C minta kora elfogadhatónak tűnik.

Az árokban megfigyelt deformációk több generációba sorolhatók. Egyes esetekben (pl. a 0,5 m és 2 m azonosítójú töréseknél) a felhatolási magasság az árok két oldalában különböző, azaz kis távolságon belül is erősen változó. Ilyenkor a nagyobb felhatolási magasság megmutatja, hogy legalább mekkora rétegsor létezett a törés kialakulásának időpontjában. A törések maximális függőleges kiterjedését, a képlékeny deformációkat, valamint az ezeket felülről lezáró zavartalan rétegek szintjét együttesen tekintve a deformációk három generációba sorolhatók (5. ábra). A legalsó törések (a II. árokban a 2 m-nél, 5,7 m-nél vagy 71,9 m-nél lévő) az árok talpszintjén vagy alatta már észlelhetők, és legfeljebb a felszín alatt kb. 2,7 m mélységig hatolnak fel. Velük vélhetőleg egykorúak azok a képlékeny deformációk, amelyek jórészt egy szintben fordulnak elő 2,8 m környékén, legalább néhányuk biztosan vízkiszökéshez köthető (10. ábra, E), tetejük erőziósan lenyesett, és egy ~2,7 mélységben húzódó, zavartalan homokrét fed le őket. A törések második csoportja (a II. árokban a 37 m, 40,7 m, 43,7 m, 68,3 m, 72,2 m jelzésűek) legfeljebb kb. 2,4 m felszín alatti mélységig hatol fel, itt nem deformált rétegek zárják le őket. A harmadik generációhoz tartozik a 1,8–2,3 m mélység közötti redőzött rétegek, valamint az I. árok 5,2 m, illetve a II. árok 0,5, 41,2 és 60,8 m azonosítójú törése. Ezeket a deformációkat 1,7 m mélységben követhető, zavartalan homokrét fed le.

A deformációk második generációja által érintett rétegsorozat (2,7–2,3 m között) közepéből származó minta OSL-mérése $20,7 \pm 1,9$ ka kort eredményezett, míg a harmadik generációt magában foglaló rétegsorozaté $19,3 \pm 1,5$ ka kort (THAMÓNÉ BOZSÓ & FÜRI 2016b). Ezek alapján a földrengés-visszatérési idő ezeréves nagyságrendűnek becsülhető. Tekintettel a kis mintaszámra és az OSL-kor hibahatárának mértékére, ez az adat hozzávetőleges, a

pontosításához több mérésre lenne szükség. Ugyanakkor az így becsült visszatérési idő összhangban áll a vetőzóna délnyugatabbi részén, Szedres mellett vizsgált, késő pleisztocén szeizmikus lumineszcens korából számított 1500 év körüli visszatérési idővel (CSILLAG & SEBE 2016), továbbá a feljegyzett földrengések gyakorisági görbéjének trendjéből adódó visszatérési idővel, ami szintén ezeréves nagyságrendűnek adódott (GYÓRI et al. 2016). Az adatok mindenképpen késő negyedidőszaki tektonikus aktivitást jeleznek a térségben, összhangban MAGYARI (2016) és SÍKHEGYI (2002) következtetéseivel.

Következtetések

A paksi Pa-21-I és -II jelű kutatóárok szeizmikus eredetű képlékeny deformációkat és töréseket tárt fel. A képlékeny deformációs szerkezetek aszimmetrikus ferde vagy átbuktatott redőkként, valamint vízkiszökéses szerkezetként jelennek meg egy-egy rétegekben. A törések a szeizmikus szelvényekben értelmezett vetők felett találhatóak – jól szemléltetve a szeizmikus kutatási módszerek eredményességét. A töréses és képlékeny deformációk három generációba sorolhatók, az érintett szinteket nem deformált rétegek zárják le. A laza üledékben megfigyelhető deformációk legalább 5-ös magnitúdójú földrengések eredményeként jöhettek létre, amelyek az OSL-mérések alapján nagyságrendileg ezeréves időközönként, a késő pleisztocénben történtek, és a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna aktivitásához köthetők. A törések közvetlen környezetében a homokrétegek néhány cm-es helyi deformációja figyelhető meg, illetve a törések mentén legfeljebb néhány cm-es dilatáció történhetett, de a törés két oldalán

lévő homoktesteknek egymáshoz képest sem vízszintes elcsúszása (eltolódása), sem függőleges elmozdulása nem volt kimutatható. Ez azzal magyarázható, hogy az alaphegységben és idősebb kainozoos kőzetekben még egyértelmű elmozdulást okozó vetőzóna deformációját a felszínközeli laza, konszolidálatlan üledékek felveszik, így a felszín már nem deformálódik észlelhetően. A dokumentált hasadékok legtöbbször valószínűleg nem a vetőágak közvetlen, felszínig hatoló folytatása, hanem közvetetten, a földrengéshullámok hatására kialakult tágulásos hasadék, illetve benyomulások telér.

Az árkokban észlelt késő negyedidőszaki deformációk a Dunaszentgyörgy–Hartai-vetőzóna szeizmikus módszerekkel kimutatott egyik szegmenséről adnak információt. A teljes zóna reprezentatív képe (ideértve a deformációs események számát, visszatérési idejét, geometriai jellemzőit, a vertikális/horizontális elmozdulások előfordulását és nagyságát) a vetőzóna menti további részletes paleoszeizmológiai vizsgálatokkal ismerhető meg.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki a Földtani Kutatási Program beruházójának, a Paks II Zrt.-nek, valamint kivitelezőjének, a Mecsekérc Zrt.-nek a munkához nyújtott támogatásért, beleértve a projekt során keletkezett kéziratos jelentések rendelkezésünkre bocsátását. FÖLDES Tamásnak köszönjük a CT-felvételeket. Köszönjük a lektoroknak, NÉMETH Norbertnek, RUSZKICZAY-RÜDIGER Zsófiának és egy névtelen lektornak, FODOR László szakszerkesztőnek, valamint a főszerkesztőnek, SZTANÓ Orsolyának a kézirat alapos átnézését és építő szándékú hozzászólásaikat.

Irodalom–References

- AKYÜZ, H. S., KARABACAK, V. & ZABCI, C. 2014: Paleoseismic Trenching. – In: BEER, M., KOUGIOUMTZOGLU, I. A., PATELLI, E. & AU, I. K. (eds): *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 15 p.
- ALESSIO, G., ALFONSI, L., BRUNORI, C. A., BURRATO, P., CASULA, G., CINTI, F. R., CIVICO, R., COLINI, L., CUCCI, L., DE MARTINI, P. M., FALCUCCI, E., GALADINI, F., GAUDIOSI, G., GORI, S., MARIUCCI, M. T., MONTONE, P., MORO, M., NAPPI, R., NARDI, A., NAVE, R., PANTOSTI, D., PATERA, A., PESCI, A., PIGNONE, M., PINZI, S., PUCCI, S., VANNOLI, P., VENUTI, A. & VILLANI, F. 2012: A photographic dataset of the coseismic geological effects induced on the environment by the 2012 Emilia (northern Italy) earthquake sequence. – *Miscellanea Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* **16**, 74 p.
- ANDRIEUX, E., BERTRAN, P., ANTOINE, P., DESCHODT, L., ARNAUD, L. & COUTARD, S. 2016: Database of pleistocene periglacial features in France: Description of the online version. – *Quaternaire* **27**, 329–339. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7717>.
- ATKINSON, G. 1984: Simple computation of liquefaction probability for seismic hazard applications. – *Earthquake Spectra* **1**, 107–123. <https://doi.org/10.1193/1.1585259>
- BENNETT, M. R., BUSTOS, D., BELVEDERE, M., MARTINEZ, P., REYNOLDS, S. C. & URBAN, T. 2019: Soft-sediment deformation below mammoth tracks at White Sands National Monument (New Mexico) with implications for biomechanical inferences from tracks. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **527**, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.04.023>
- CAPUTO, R., IORDANIDOU, K., MINARELLI, L., PAPANATHANASSIOU, G., POLI, M. E., RAPTI-CAPUTO, D., SBORAS, S., STEFANI, M. & ZANFERRARI, A. 2012: Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy. – *Annals of Geophysics* **55/4**, 743–749. <https://doi.org/10.4401/ag-6148>
- CSILLAG G., SEBE K., SÍKHEGYI F. & TELBISZ T. 2016: II. kötet. Geomorfológiai magyarázó. – In: MAROS Gy. (szerk.): 1.3.18. Észlelési és földtani-geomorfológiai térképszervezés és térképmagyarázó. Földtani-geomorfológiai térkép magyarázója. – *Kézirat*, MÁ/PA2-16-FT-32, Mecsekérc Zrt., Pécs, 96–161.

- FÁBIÁN, SZ. Á., KOVÁCS, J., VARGA, G., SIPOS, GY., HORVÁTH, Z., THAMÓ-BOZSÓ, E. & TÓTH, G. 2014: Distribution of relict permafrost features in the Pannonian Basin, Hungary. – *Boreas* **43**, 722–732. <https://doi.org/10.1111/bor.12046>
- EISSMANN, L. 2002: Quaternary geology of eastern Germany (Saxony, Saxon–Anhalt, South Brandenburg, Thuringia), type area of the Elsterian and Saalian Stages in Europe. – *Quaternary Science Reviews* **21**, 1275–1346. [https://doi.org/10.1016/s0277-3791\(01\)00075-0](https://doi.org/10.1016/s0277-3791(01)00075-0)
- FÖLDES T. 2016: Prezentáció Pa 21 C, E1 fúrások anyagain elvégzett CT mérések alapján. – *Kézirat*, 2016.07.13. előadás, Paks, Mércé Bt. digitális adattár, 2 p.
- FRENCH, H. M. 2007: *The Periglacial Environment*. – Wiley, Chichester, 458 p. <https://doi.org/10.1002/9781118684931>
- GYÓRI E., GRIBOVSKIZKI, K., MARÓTINÉ KISZELY M., SZEIDOVITZ GY. & TÓTH L. (GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda Kft.) 2016: Szeizmotektonikai modell. – Földrengés forrásmodellek. – *Kézirat*, GR-P2-010/1 (Vol 2) ÁKMI Kft., Budapest, 2016. március 30.
- HALÁSZ A., KONRÁD GY. & SEBE K. 2016: Kutatóárkok dokumentáló és értelmező jelentése. – *Kézirat*, MÁ/PA2-16-FT-15, Mecsekérc Zrt., Pécs, 56 p.
- HORVÁTH F., KOROKNAI B., TÓTH T., WÓRUM G., KONRÁD GY., KÁDI Z., KUDÓ I., HÁMORI Z., FILIPSKIZKI P., NÉMETH V., SZÁNTÓ É., BÍRÓ A., KOROKNAI ZS., FÖLDVÁRI K. & KOVÁCS G. 2019: A „Kapos-vonal” középső szakaszának szerkezeti-mélyföldtani viszonyai és neotektonikai jellegei a legújabb geofizikai vizsgálatok tükrében. – *Földtani Közlöny* **149/4**, 327–350. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2019.149.4.327>
- LAVECCHIA, G., DE NARDIS, R., CIRILLO, D., BROZZETTI, F. & BONCIO, P. 2012: The May–June 2012 Ferrara Arc earthquakes (northern Italy): structural control of the spatial evolution of the seismic sequence and of the surface pattern of coseismic fractures. — *Annals of Geophysics* **55/4**, 533–540. <https://doi.org/10.4401/ag-6173>
- LUNINA, O. V. & GLADKOV, A. S. 2016: Soft-sediment deformation structures induced by strong earthquakes in southern Siberia and their paleoseismic significance. – *Sedimentary Geology* **344**, 5–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.02.014>
- MAGYARI Á. 2016: Késő-pleisztocén üledékföldtani, neotektonikai és paleoszeizmológiai megfigyelések Paks tágabb környezetében. – *Kézirat*, MÁ/PA2-16-FT-07, Mecsekérc Zrt., Pécs, 41 p.
- MCCALPIN, J. P. 2009: *Paleoseismology*. – 2nd Edition, Academic Press, Amsterdam–London, International Series 95, 615 p.
- MILÀN, J., CLEMMENSEN, L. B., BUCHARDT, B. & NOE-NYGAARD, N. 2007a: A Late Holocene tracksite in the Lodbjerg dune system, northwest Jylland, Denmark. – In: LUCAS, S., SPIELMANN, J. & LOCKLEY, M. (eds.): *Cenozoic Vertebrate Tracks and Traces*. – *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* **42**, 241–250.
- MILÀN, J., BROMLEY, R. G., TITSCHACK, J. & THEODOROU, G. 2007b: A diverse vertebrate ichnofauna from a Quaternary eolian oolite, Rhodes, Greece. – In: *Sediment–Organism Interactions: A Multifaceted Ichnology*. – *SEPM Special Publication* **88**, 333–343.
- MILÀN, J., THEODOROU, G., LOOPE, D. B., PANAYIDES, I., CLEMMENSEN, L. B. & GKIONI, M. 2015: Vertebrate tracks in Late Pleistocene–Early Holocene (?) carbonate aeolianites, Paphos, Cyprus. – *Annales Societatis Geologorum Poloniae* **85**, 507–514. <http://dx.doi.org/10.14241/asgp.2015.012>
- MOLNÁR M. & VERES M. 2016: Fny07-46. AMS 14C vizsgálati jegyzőkönyv. – *Kézirat*, (mintaazonosító: I/1373 és 1374 sorozat) 4 p.
- MORETTI, M. & VAN LOON, A. J. 2014: Restrictions to the application of ‘diagnostic’ criteria for recognizing ancient seismites. – *Journal of Palaeogeography* **3/2**, 162–173. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1261.2014.00050>
- ÖBERMEIER, S. F. 1996: Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis—an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. – *Engineering Geology* **44**, 1–76.
- ÖBERMEIER, S. F., OLSON, S. O. & GREEN, R. A. 2005: Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking. – *Engineering Geology* **76**, 209–234. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.07.009>
- PILLOLA, G. L. & ZOBOLI, D. 2017: Dwarf mammoth footprints from the Pleistocene of Gonnese (southwestern Sardinia, Italy). – *Bollettino della Società Paleontologica Italiana* **56/1**, 57–64. <http://dx.doi.org/10.4435/BSPI.2017.05>
- PIRROTTA, C., BARBANO, M. S., GUARNIERI, P. & GERARDI, F. 2007: A new dataset and empirical relationships between magnitude/intensity and epicentral distance for liquefaction in central-eastern Sicily. – *Annals of Geophysics* **50/6**, 763–774. <https://doi.org/10.4401/ag-3055>
- RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A., CALVO, J. P., DE VICENTE, G. & GÓMEZ-GRAS, D. 2000: Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene. – *Sedimentary Geology* **135**, 117–135. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(00\)00067-1](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(00)00067-1)
- RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS. & KERN, Z. 2016: Permafrost or seasonal frost? A review of paleoclimate proxies of the last glacial cycle in the East Central European lowlands. – *Quaternary International* **415**, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.027>
- SEBE, K., CSILLAG, G., RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., FODOR, L., THAMÓ-BOZSÓ, E., MÜLLER, P. & BRAUCHER, R. 2011: Wind erosion under cold climate: A Pleistocene periglacial mega-yardang system in Central Europe (Western Pannonian Basin, Hungary). – *Geomorphology* **134/3–4**, 470–482. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.003>
- SÍKHEGYI, F. 2002: Active structural evolution of the western and central parts of the Pannonian basin: a geomorphological approach. Special Publication Series – EGU Stephan Mueller **3**, 203–216. <https://doi.org/10.5194/smsps-3-203-2002>
- THAMÓNÉ BOZSÓ E. & FÜRI J. 2016a: *OSL kormeghatározási eredmények. Paks környéki minták II*. – *Kézirat*, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 44 p.
- THAMÓNÉ BOZSÓ E. & FÜRI J. 2016b: *OSL kormeghatározási eredmények. Paks környéki minták V*. – *Kézirat*, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 13 p.
- THORSEN, R. M., CLAYTON, W. S. & SEEBER, L. 1986: Geologic evidence for a large prehistoric earthquake in eastern Connecticut. – *Geology* **14**, 463–467.

- TÓTH T. & HORVÁTH F. 1997: Neotektonikus vizsgálatok nagyfelbontású szeizmikus szelvényezéssel. – In: MAROSI S. & MESKÓ A. (szerk.): *A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága*. Akadémiai Kiadó, Budapest 123–152.
- TÓTH T. & HORVÁTH F. 1999: Van bizonyíték negyedidőszaki tektonizmusra Paks környékén! – *Földtani Közlöny* **129/1**, 109–124.
- WORSLEY, P. 2014: Ice-wedge growth and casting in a Late Pleistocene, periglacial, fluvial succession at Baston, Lincolnshire. – *Mercian Geologist* **8/3**, 159–170.
- WÓRUM G., BIRÓ A., KÁDI Z., KOROKNAI B., KOVÁCS G. & VISNOVITZ F. 2015: Értékelő jelentés a 3D szeizmikus kutatás eredményeiről (1.3.9.). – *Kézirat*, MÁ/PA2-15-SZ/08 V1., Mecsekérc Zrt., Pécs, 48 p.
- Kézirat beérkezett: 2020. 05. 16.