Földtani Közlöny

153/4

A Magyarhoni Földtani Társulat folyóirata
Bulletin of the Hungarian Geological Society



Budapest, 2023

Felelős kiadó
M. Tóth Tivadar, az MFT elnöke
Főszerkesztő
Sztanó Orsolya
Műszaki szerkesztők
Babinszki Edit
Kovács Zoltán
Bartha István Róbert
Nyelvi lektor
Lukoczki Georgina
Szerkesztőbizottság
Fodor László, Főzy István, Pósfai Mihály, Szakmány György, Szanyi János, Török Ákos

Támogatók
Magyar Tudományos Akadémia, ANZO Perlit Kft., Biocentrum Kft., Colas Északkő Kft., Geo-Log Kft., Geoproduct Kft., Geoteam Kft., Mecsekérc Zrt., Mineralholding Kft., OMYA Hungária Kft., O&G Development Kft., Perlit-92 Kft., Terrapeuta Kft.

A kéziratokat az alábbi felületen kérjük benyújtani
www.foldtanikozlony.hu

* * *

Responsible publisher
Tivadar M. Tóth,
President of the Hungarian Geological Society
Editor-in-chief
Orsolya Sztanó
Technical editors
Edit Babinszki
Zoltán Kovács
István Róbert Bartha
Language editor
Georgina Lukoczki
Editorial board
László Fodor, István Főzy, Mihály Pósfai, György Szakmány, János Szanyi, Ákos Török
Sponsors
Hungarian Academy of Sciences, ANZO Perlit Kft., Biocentrum Kft., Colas Északkő Kft., Geo-Log Kft., Geoproduct Kft., Geoteam Kft., Mecsekérc Zrt., Mineralholding Kft., OMYA Hungária Kft., O&G Development Kft., Perlit-92 Kft., Terrapeuta Kft.

Submission of manuscripts through
www.foldtanikozlony.hu

Földtani Közlöny is abstracted and indexed in
Crossref.org
Scopus
GeoRef (Washington),
Pascal Folio (Orleans),
Zentralblatt für Paläontologie (Stuttgart),
Referativny Zhurnal (Moscow) and
EPA, MTA REAL (Budapest)

Földtani Közlöny
153/4
A Magyarhoni Földtani Társulat folyóirata
Bulletin of the Hungarian Geological Society

Tartalom — Contents

Wéber Zoltán: Bevezető. – *Preface.* 277

Czecze Barbara et al.: A Kárpát-Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földrengés-adatbázis. – *Seismicity of the Carpathian-Pannonian region: updated and revised earthquake database.* 279

Győri, Erzsébet et al.: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020) (M>2). – *A Cirkum-Pannon régió szeizmicitása (456–2020) (M>2).* 297

Porkoláb Kristóf et al.: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében: új adatrendszerek és térképek bemutatása. – *Regional stress field and strain rate field in the Pannonian region: recent datasets and maps.* 299

Békési Eszter et al.: Stress field of the Pannonian region. – *Feszültségmező a Pannon-térségben.* 309

Porkoláb Kristóf et al.: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. – *GNSS-alapú deformációs sebesség a Pannon-térségben.* 311

Koroknai Balázs et al.: A neotektonikus fázis deformációi Magyarországon. – *Deformations of the neotectonic phase in Hungary.* 313

Koroknai Balázs et al.: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. – *Seismotectonics and seismotectonic hazard in Hungary.* 335

Koroknai, Balázs et al.: Seismotectonic map of Hungary. – *Magyarország szeizmotektonikai térképe.* 353

Kovács, Gábor et al.: Seismotectonic hazard map of Hungary. – *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe.* 355

Kázmér Miklós et al.: Visegrád pusztulása a török hódoltság előtt – az 1541-es földrengés történeti és archeoszeizmológiai nézőpontból. – *Destruction of Visegrád before the Ottoman occupation – historical and archaeoseismological data on the 1541 earthquake.* 357

Kecskeméti Tibor: In memoriam Dr. Parák Tibor 375

Hírek, ismertetések (összeállította: Piros Olga) 377

Első borító: A Salamon-torony észak felől. Jakob Alt grafikája 1821–1826-ból (Bozóki 2014)

Budapest, 2023 ISSN 0015-542X

Rövidített útmutató a Földtani Közlöny szerzői számára

Kérjük olvassa el részletes útmutatónkat a www.foldtanikozlony.hu weboldalon.

A Földtani Közlönybe a földtudományok széles köréből várunk a Kárpát–Pannon térség földtani felépítésével foglalkozó magyar vagy angol nyelvű kéziratokat. Magyar nyelvű cikkek esetében annak címét, kulcsszavait, összefoglalóját, az ábrák és táblázatok címét, feliratait angol nyelven is meg kell adni, angol nyelvű cikkek esetén fordítva. Az angol nyelvű szövegek elkészítése a szerző feladata.

A kéziratot bírálatra pdf formátumban, egyetlen fájlként kell benyújtani, a szöveg mögé sorrendben elhelyezett számozott ábraanyaggal. A fájl neve a szerző nevéből és a cikk témáját lefedő néhány szóból álljon (pl. szujo_etal_villanyi kavicsok). Kéziratok a fenti honlapon keresztül küldhetők be. Bármilyen technikai probléma esetén forduljon a technikai szerkesztőhöz (piros.olga@mbfsz.gov.hu) vagy a főszerkesztőhöz (sztano.orsolya@gmail.com).

Az **értekezések** eddig publikálatlan adatokat, új eredményeket következtetéseket közölnek, széles tudományterületi képbe helyezve. A rövid közlemények célja az adatközlés, adatmentés, vagy az új eredmény gyors közzététele. A szemle széleskörű, szakmailag közérthető áttekintést nyújt egy tudományterület új eredményeiről, vagy kevéssé ismert, új módszereiről, annak alkalmazásáról. Vitairat a vitatott cikk megjelenésétől számított hat hónapon belül küldhető be. A vitatott cikk szerzője lehetőséget kap arra, hogy válasza a vitázó cikkel együtt jelenjen meg. A gyakorlati rovatba a földtani kutatással – bányászattal kapcsolatos kéziratok kerülnek, melyek eredménye nem elsősorban tudományos értékű, hanem a szakközösség tájékoztatását, szolgálja. **A tömör fogalmazás, az állításokat alátámasztó adatszolgáltatás, a szabatos szaknyelv használata és a nem specialista olvasók érdekében a közérthetőség mindegyik műfajban alapkövetelmény.**

A KÉZIRAT TAGOLÁSA ÉS AZ EGYES FEJEZETEK JELLEMZŐI (kötelező, javasolt)

a) Cím (magyarul, angolul) Rövid, informatív és tárgyra törő, utal a fő mondandóra.

b) Szerző(k), munkahelye, postacímmel (e-mail cím)

c) Összefoglalás (magyarul, angolul) Kizárólag a tanulmány célját, az alkalmazott módszereket, az elért legfontosabb új eredményeket és következtetéseket tartalmazza, így önállóan is megállja a helyét. Hossza legfeljebb 300 szó. Az angol nyelvű összefoglaló lehet bővebb a magyarnál (max. 1000 szó).

d) Tárgyszavak (magyarul, angolul) Legfeljebb 8 szó / egyszerű kifejezés e) Bevezetés A munkához kapcsolódó legfontosabb korábbi szakirodalmi eredmények összefoglalása, és ebből következően a tanulmány egyértel- műen megfogalmazott célja.

f) *Anyag és módszerek* A vizsgált anyag, esetleg korábbról származó adatok, a mérési, kiértékelési eszközök és módszerek ismertetése. Standard eljárások esetén csak a hivatkozott módszertől való eltérést kell megfogalmazni.

g) Eredmények Az új adatok és kutatási eredmények ismertetése, dokumentációja ábrákkal és táblázatokkal.

h) Diszkusszió A kapott eredményeknek a saját korábbi eredményekkel és a szakirodalmi ismeretekkel való összevetése, beágyazása a tágabb tudományos környezetbe.

i) Következtetések Az új következtetések tézisszerű, rövid ismertetése az eredmények és a diszkusszió ismétlése nélkül.

j) Köszönetnyilvánítás

k) Hivatkozott irodalom Csak a szövegközi, az ábrákhoz és táblázatokhoz kapcsolódóan megjelenő hivatkozásokat foglalja magába (se többet, se kevesebbet).

l) *Ábrák, táblázatok és fényképtáblák (magyar és angol felirattal)* A szemléltetni kívánt jelenség, vagy összefüggés megértéséhez szükséges mennyiségű.

m) Ábra-, táblázat- és fényképmagyarázatok (magyarul és angolul) Az illusztrációk rövid, összefogott, tartalmában érdemi magyarázata.

FORMAI KÖVETELMÉNYEK

Értekezés, szemle maximális összesített **terjedelme** 20 nyomdai oldal (szöveg, ábra, táblázat, fénykép, tábla együttesen). Ezt meghaladó tanulmány csak abban az esetben közölhető, ha a szerző a többletoldal költségének térítésére kötelezettséget vállal. A rövid közlemények összesített terjedelme maximálisan 4 nyomdai oldal.

A **szöveg** doc, docx vagy rtf formátumban készüljön. Az alcímeknél ne alkalmazzanak automatikus számozást vagy ábécés jelölést, csak a tipográfiával jelezzék a címrendet. A hivatkozásokban, irodalomjegyzékben a SZERZŐK nevét kis kapitálissal, ősmaradványok faj- és nemzetségneveit dőlt betűvel, fajok leíróit szintén kis kapitálissal kell írni. A kézirat szövegében az ábrákra és a táblázatokra számozásuk növekvő sorrendjében a megfelelő helyen hivatkozni kell.

A szövegközi **hivatkozások** formája RADÓCZ 1974, vagy GALÁCZ & VÖRÖS 1972, míg három vagy több szerző esetén KUBOVICS et al. 1987. Több hivatkozás felsorolásakor ezek időrendben kövessék egymást. Az irodalomjegyzék tételei az alábbi minta szerint készüljenek, szoros ábécében, ezen belül időrendben álljanak. Kérjük a folyóiratok teljes nevének dőlt betűvel történő kiírását. Ezen kívül, ha a hivatkozott műnek van DOI száma, azt meg kell adni teljes URL formátumban. Hivatkozott egyedi kiadványok esetén a mű címét kérjük dőlt betűvel szedni. Magyar szerzők idegen nyelvű publi- kációi esetén a vezetéknév után vesszőt kell tenni.

CSONTOS, L., NAGYMAROSY, A., HORVÁTH, F. & KOVÁC, M. 1992: Tertiary evolution of the intra-Carpathian area: A model. — *Tectonophysics* **208,** 221–241. http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90346-8

JÁMBOR Á. 1998: A Tiszai nagyszerkezeti egység karbon üledékes képződményei rétegtanának ismertetése. — In: BÉRCZI I. & JÁMBOR Á. (szerk.): *Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana.* MOL Rt. — MÁFI kiadvány, Budapest, 173–185.

VARGA A. 2009: A dél-dunántúli paleozoos–alsó-triász sziliciklasztos kőzetek kőzettani és geokémiai vizsgálatának eredményei. — PhD értekezés, ELTE Kőzettan–Geokémiai Tanszék, Budapest, 150 p.

WEAVER, C. E. 1989: *Clays, Muds, and Shales.* — Developments in Sedimentology 44, Elsevier, Amsterdam, 819 p. http://dx.doi.org/10.1016/s0070-4571(08)×7036-0

Az **ábrákat** a szerzőknek kell elkészíteni, nyomdakész állapotban és minőségben a tükörméretbe (170×240 mm) álló, vagy fekvő helyzetben beilleszthetően. A fotótábla maximális magassága 230 mm lehet. Az ábrákon a vonalvastagság 0,3 pontnál, a betűméret 6 pontnál ne legyen kisebb. Az illusztrációkat X4-nél nem frissebb CorelDraw ábraként, az Excel táblázatokat és diagramokat word vagy cdr formátumban tudjuk elfogadni. Egyéb esetben a fekete és színes vonalas ábrákat 1200 dpi felbontással, tif kiterjesztéssel, a szürkeárnyalatos fényképeket 600, a színes fényképeket 300 dpi felbontással, tif vagy jpg kiterjesztéssel kérjük beküldeni. A színes illusztrációkat a megfelelő nyomdai minőség érdekében CMYK színprofillal kérjük előállítani, ezért az online megjelenő pdf esetében előfordulhat némi színváltozás. A színes ábrák, fotótáblák nyomtatási költségeit a szerzőknek kell fedezniük. Ha a költséget a szerzők nem tudják vállalni, már benyújtáskor szürkeárnyalatos illusztrációkat használjanak.

A cikk benyújtásakor, kérjük a szerzőket, hogy **nevezzenek meg legalább négy olyan szakértőt**, akik annak tartalmáról érdemi véleményt adhatnak, és adják meg e-mail címüket. A bírálatot követően a szerzőtől egy vagy két hónapon belül várjuk vissza a javított változatot, ekkor **még mindig egyetlen összesített pdf-ben** (eredeti fájl név_átdolgozott megjelöléssel). E mellé kérünk csatolni egy **tételes jegyzéket,** melyben bemutatják, hogy lektoraik megjegyzéseit, tanácsait hogyan vették figyelembe, valamint esetleges egyet nem értésüknek milyen szakmailag alátámasztható indokai vannak.

A közlésre elfogadott kéziratok szövegét, ábráit, táblázatait egyesével kérjük a szerkesztőségi felület megfelelő menüpontját használva feltölteni. Tördelést követően a szerzők feladata a korrektúrázás. Különlenyomatokat még külön költségért sem tudunk biztosítani.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society
153/4, 277., Budapest, 2023

Bevezető

A földrengések a Föld szeizmikusan aktív és sűrűn lakott területein óriási katasztrófák előidézői lehetnek. A Pannon-medence és benne Magyarország szeizmikus aktivitása közepes szintű, de nem elhanyagolható mértékű. A közepes aktivitás azonban nem jelenti azt, hogy minden földrengés mérsékelt erősségű lenne, csak azt, hogy a nagy rengések ritkán következnek be. Az ismert földrengések statisztikai vizsgálata alapján 5-ösnél nagyobb magnitúdójú földrengések hazánkban átlagosan 40-50 évente fordulnak elő. A múltban több komoly pusztítást okozó földrengés sújtotta az országot. Napjainkban pedig a modern társadalom és gazdaság kritikus infrastruktúráinak sérülékenysége miatt egy-egy nagyobb földrengés beláthatatlan következményekkel járhat hazánkban is.

A klasszikus szeizmológiai eljárások a múlt ismert eseményei alapján determinisztikus vagy probabilisztikus metodikával készítenek földrengés-veszélyeztetettségi becsléseket. A meglévő földrengés-katalógusok azonban – a nagyobb rengések ritka előfordulása miatt – meglehetősen hiányosak, hiszen a műszeres földrengés-megfigyelés csupán a múlt század elején kezdődött, a régebbi rengéseket pedig csak történelmi feljegyzésekből ismerjük a veszélyeztetettségi számításokhoz szükséges paraméterek pontos ismerete nélkül. A földrengés-katalógusok alapján végzett becslések tehát nagymértékű bizonytalansággal terheltek.

Az utóbbi évtizedekben azonban jelentős haladás történt a Föld dinamikájának megértésében, beleértve a földrengések kialakulásának folyamatát és mechanizmusát is. Ezzel párhuzamosan látványosan fejlődtek az aktív vetők térképezésére alkalmas geofizikai mérések, a szeizmogén szerkezetek pontosabb azonosítására képes hipocentrummeghatározó eljárások, és új űrgeodéziai módszerek születtek a felszínmozgások nagy pontosságú mérésére. E korszerű ismeretek és technikák szélesebb alapokra helyezik a szeizmikusan veszélyes területek kijelölését.

Ennek szellemében a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, valamint a Geomega Kft. – a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal anyagi támogatásával – egy olyan kutatási projektet indított 2019-ben, amelynek végcélja egy új, hazai szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térkép megszerkesztése volt, amely országos skálán mutatja a fiatal és aktív törésvonalakat, a földrengések eloszlását és fészekmechanizmusát, valamint hazánk földrengés-veszélyeztetettség szempontjából legérzékenyebb területeit. Egy ilyen térkép mind a helyi szeizmikus kockázatelemzések, mind az országos léptékű infrastrukturális stratégiai tervezések alapjául szolgálhat.

A projekt végcélját, azaz a szeizmotektonikai és szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképek megszerkesztését és értelmezését szerteágazó kutatások előzték meg, amelyek önmagukban is jelentős új eredményekkel járultak hozzá a Pannon-régió szerkezetének és geodinamikájának jobb megértéséhez.

A jelen kötet négy tanulmányában bemutatott kutatási eredmények a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet és a Geomega Kft. gyümölcsöző együttműködésére építve, több esetben nemzetközi kooperációk keretében és a legkorszerűbb módszerek felhasználásával jöttek létre. Az elkészült térképek és elemzések jelentős előrelépést jelentenek mind tudományos, mind gyakorlati szempontból. Tudományosan megalapozott bemeneti adatokat szolgáltatnak az aktuális és későbbi földrengés-veszélyeztetettségi vizsgálatokhoz és kockázatelemzésekhez, mérsékelve ezzel a környezetünkben keletkező földrengések várható következményeit.

Wéber Zoltán
Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 279–296., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.279

A Kárpát–Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földrengés-adatbázis

Czecze Barbara[1,2], Győri Erzsébet[1], Timkó Máté[1,2], Kiszely Márta[1], Süle Bálint[1], Wéber Zoltán[1]

[1]Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, Budapest
[2]Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Seismicity of the Carpathian–Pannonian region: updated and revised earthquake database

Abstract

The ultimate goal of the research project 2018-2.2.1-NKP-2018-00007, funded by the National Research, Development and Innovation Office, was to create the seismotectonic model of Hungary. For this purpose, it was essential to have a reliable database of seismic events in the region. Additionally, to perform earthquake hazard assessments, a dependable, homogeneous earthquake catalog was necessary. As part of the project, the previously available catalogs were reviewed and relocated. In the first step, all digitally recorded seismic events within the area defined by the Hungarian National Seismological Bulletin (45.5°–49°E; 16°–23°W) underwent a review and relocation. To reduce catalog contamination, hundreds of artificial, anthropogenic events were removed using waveform correlation and geospatial tools. Since the country is not only at risk from earthquakes within its borders but also from larger earthquakes originating beyond the national boundaries, a catalog containing seismic events from the broader surrounding region was needed. The Kövesligethy Radó Seismological Observatory already had catalogs with historical earthquakes and instrumental data covering the entire Carpathian Basin from 456 to 2010. As part of the project, this catalog was updated until 2020, including new events and newly recalculated location coordinates. In order to maintain consistency, correlations between different magnitude types were determined, and using these correlations, the moment magnitudes were estimated. This approach ensures a standardized and coherent representation of earthquake magnitudes within the seismic catalog. The resulting catalog contains a total of 82,642 events until the end of December 2020, with depth data available for approximately 60% of them. The region is mainly characterized by shallow crustal earthquakes, but the highly active Vrancea zone shows a significant number of intermediate-depth earthquakes. Although the new catalog and the corresponding seismicity map do not significantly alter our understanding of seismicity, they serve as a valuable database for future analyses and provide a more reliable basis for earthquake hazard assessments.

Keywords: seismicity, hypocenter relocation, removing anthropogenic events, seismicity map, energy release

Összefoglalás

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt végső célját Magyarország szeizmotektonikai modelljének megalkotása jelentette. Ehhez elengedhetetlenül fontos egy megbízható adatbázis a régió földrengéseiről. Emellett a földrengés-veszélyeztetettségi számítások elvégzéséhez is szükséges, hogy rendelkezésre álljon egy pontos, homogén földrengés-katalógus. A projekt keretében ezért sor került a korábbi katalógusok felülvizsgálatára.

Első lépésben a Magyarországon és szűkebb környezetében, azaz a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin (HNSB) által lehatárolt területen (45,5°–49°É; 16°–23°K) kipattant, 1996 és 2021 között digitálisan regisztrált összes szeizmikus esemény ismételt és egységes helymeghatározására került sor. Az arra alkalmas eseményklaszterek többeseményes helymeghatározását is elvégeztük. A katalógus szennyezettségének csökkentése érdekében több száz mesterséges, antropogén eseményt távolítottunk el, így a pontosított hipocentrumú, földrengésként nyilvántartott események alkalmassá váltak a szeizmotektonikai értelmezésre. A Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatóriumban (KRSZO) bevezettük a jelen projektben alkalmazott eljárást, így a hazai digitális katalógusunk évente egységesen bővíthető az újabb eseményekkel.

Mivel az ország területét nemcsak a határokon belül kipattanó, hanem az országhatáron kívül keletkező nagyobb földrengések is veszélyeztetik, szükség van a tágabb környezet, a Kárpát–Pannon térség földrengéseinek ismeretére is. A KRSZO a korábbi években is rendelkezett – történelmi földrengéseket és műszeres adatokat egyaránt tartalmazó – katalógusokkal. A legutolsó 456-tól 2010-ig tartalmazott földrengéseket a teljes Kárpát-medence területére. A projekt kere-

tében ezt a kombinált katalógust 2020-ig bezárólag kiegészítettük újabb eseményekkel és különböző magnitúdótípusokkal. A korábbi hipocentrumokat módosítottuk az újraszámított helykoordinátákkal és mélységadatokkal, a különböző típusú magnitúdók között korrelációs összefüggéseket határoztunk meg, és áttértünk a momentummagnitúdók használatára. Elkészítettük a Kárpát–Pannon régió új szeizmicitástérképét, ami a felülvizsgált katalógusokkal együtt alapul szolgál a későbbi elemzéseknek, és megbízhatóbb földrengés-veszélyeztetettség számítást tesz lehetővé.

Tárgyszavak: szeizmicitás, hipocentrumok relokalizációja, antropogén események eltávolítása, szeizmicitástérkép, energiafelszabadulás

Bevezetés és előzmények

A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet és a Geomega Kft. mint konzorciumi tagok részvételével 2019. január 1-jén kezdődött meg a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal Nemzeti Kiválóság Programjának keretében az a kutatási projekt (2018-2.2.1-NKP-2018-00007), amelynek végcélját „Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése" jelentette. A projekt kitűzött végső céljának megvalósításához számos fontos kutatási mérföldkő teljesítése járult hozzá (áttekintésükért lásd WÉBER et al. 2023; KOROKNAI et al. 2023a, b).

Egy szeizmotektonikai térkép megalkotásához, annak értelmezéséhez és a későbbi veszélyeztetettségi számításokhoz elengedhetetlen, hogy rendelkezzünk minél megbízhatóbb, pontosabb műszeres és történeti földrengés-katalógusokkal. E cikk keretében ezek előállítási módját, az új katalógusok jellemzőit és a projekt keretében elkészített szeizmicitástérképet mutatjuk be.

A Pannon-medence szeizmicitását tekintve átmenetet képez az aktív mediterrán térség és az aszeizmikus Kelet-európai tábla között. A medence belseje és a medencét körülvevő orogén területek szeizmikus aktivitása nem homogén. Az első ismert földrengés, amely Magyarország területén pattant ki, 456-ban keletkezett Savaria, a mai Szombathely közelében. Azóta számos érezhető földrengés sújtott le hazánkra, amelyek jelentős károkat is okoztak. A legerősebb földrengés 1763-ban volt Komáromban, amely megközelítően olyan erős volt, mint a 2020 végén, a horvátországi Petrinjában keletkezett (Mw=6,4) földrengés, melyet a hazai lakosság az ország nagy területén érzett, a délnyugati megyékben pedig károkat is okozott. Emellett fontos megemlíteni az 1810-es móri, az 1911-es kecskeméti, az 1925-ös egri, az 1956-os dunaharaszti és az 1985-ös berhidai földrengéseket is, amelyek jelentős károkat okoztak.

A XX. század elejéig csak korabeli beszámolók alapján tudtunk információkat szerezni a földrengések helyéről, idejéről és erősségéről. Az első szeizmológiai műszerek, amelyek képesek voltak regisztrálni a talajmozgást, a XIX. század végén jelentek meg. Magyarországon az első szeizmográfot 1902-ben üzemelték be Budapesten, a Földtani Intézet pincéjében, majd 1905-ben Kövesligethy Radó megalapította a Budapesti Földrengési Obszervatóriumot. Ekkor az országban összesen öt helyen voltak analóg szeizmométerek (Budapest, Fiume, Ógyalla, Temesvár, Zágráb). Az I. világháború kitörésekor 10 állomás volt az országban, de a békeszerződések után csak négy maradt a jelenlegi határokon belül. Ezek száma a 90-es évek elejéig sem változott számottevően, és volt olyan időszak, amikor mindössze egy állomás működött. A digitális korban az állomások száma fokozatosan növekedett, és minőségük is jelentősen javult.

Az 1995-ös év kiemelkedő jelentőséggel bírt a magyarországi szeizmológiában, mert akkor indult el a Paks körüli Mikroszeizmikus Mérőhálózat 10 digitális állomással (TÓTH et al. 1996). Ezenkívül a Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet 3 digitális és egy analóg szeizmográfot üzemeltetett az ország területén. Ezzel a 14 állomásból álló hálózat sűrűsége elérte azt a szintet, hogy lehetővé vált az országban keletkező földrengések helyének pontosabb meghatározása, és elkezdődhetett a hipocentrumok korszerű módszerekkel történő, rutinszerű meghatározása.

A földrengések paraméterei az éves „Magyarországi Földrengések Évkönyve" (*Hungarian Earthquake Bulletin*, HEB) című kiadványban jelentek meg, amelyet 1996 és 2001 között a GeoRisk Kft., majd 2002 és 2010 között a GeoRisk Kft., valamint a Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet közösen adott ki. 2011 óta mindkét intézmény önállóan jelenteti meg éves jelentését, a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium (KRSZO) „Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin" (Hungarian National Seismological Bulletin, HNSB) néven, magyar és angol nyelven. A 2011 előtt kiadott HEB és a HNSB együttesen fedi le Magyarország digitálisan regisztrált eseményeinek általunk feldolgozott katalógusát (továbbiakban: hazai digitális katalógus).

A földrengések helyének, magnitúdójának meghatározása kiemelt feladata a gyakorlati szeizmológiának. Az aktív tektonikai folyamatok differenciális kéregmozgásokban, vető menti elmozdulásokban nyilvánulnak meg. Az ekkor összegyűlő energia földrengések formájában szabadul fel, így a földrengések fészekparamétereinek segítségével kijelölhetők a szeizmoaktív vetők és vetőzónák, ami elengedhetetlen a megbízható veszélyeztetettségi számításokhoz és a geológiai interpretációhoz. Az elmúlt évtizedek során a helymeghatározásra szolgáló módszerekben, a számításokban alkalmazott sebességmodellekben, és az eredményekben is inkonzisztencia volt megfigyelhető, így a projekt célja a lehető legmodernebb módszerek felhasználása mellett egy egységes, homogén hazai digitális katalógus létrehozása volt. A jelen projekt előzménye a HNSB által lehatárolt területen (45,5°–49°É; 16°–23°K) 1996 óta kipattant események ismételt helymeghatározása volt (BONDÁR et al. 2018). Az így létrejött digitális katalógus megbízhatóbb becsléseket biztosít a hipocentrum-paraméterek hibaellipsziséről, és az így meghatározott hipocentrumok a többeseményes helymeghatározó algoritmusok számára is megfelelő kezdeti becslésként szolgálnak, ezért az azóta eltelt évek során kipattant földrengéseket is ezzel a módszerrel határoztuk meg.

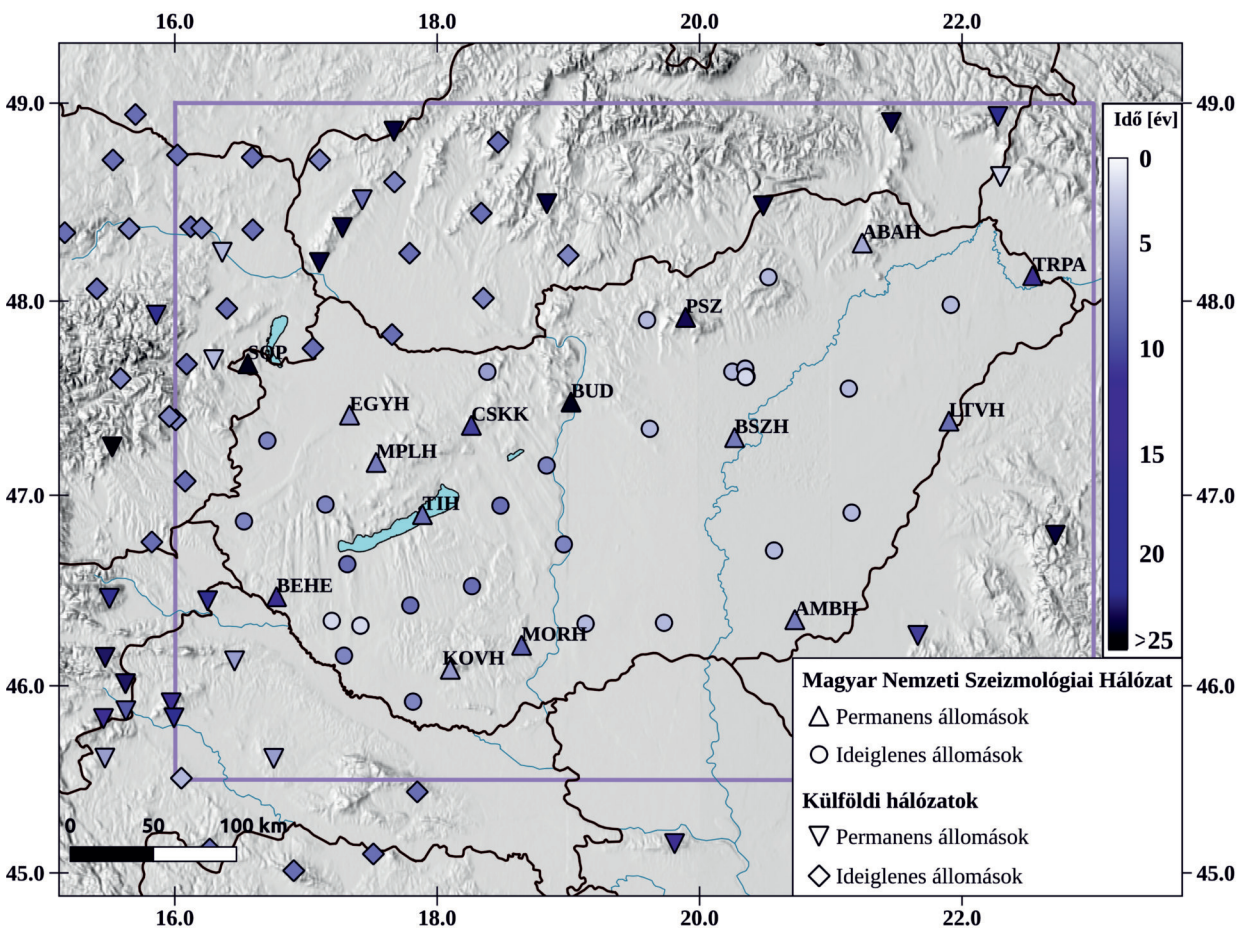
Az ország szeizmotektonikai térképének megalkotásához elegendő a HNSB által lehatárolt terület földrengéseinek a vizsgálata, mely Magyarországot teljes egészében lefedi. Azonban az országhatáron túli nagyobb földrengések is veszélyt jelenthetnek hazánkra, ezért a későbbi veszélyeztetettségi számításokhoz olyan katalógusra van szükség, melyek a szomszédos országok, a Kárpát-Pannon térség földrengéseit is tartalmazza. A KRSZO korábban is rendelkezett a Kárpát-medence történeti és műszeres földrengéseit tartalmazó katalógusokkal (Zsíros et al. 1988, Zsíros 2000), de ezek nem voltak egységesek, így frissítésre szorultak.

Ezért a projekt során célunk volt – az ország közvetlen környezetében kipattant földrengések paramétereinek pontosítása mellett – a Kárpát-medence egészére kiterjedő kombinált, homogén földrengés-katalógus létrehozása is, amely magában foglalja a historikus és a műszeresen regisztrált földrengéseket egyaránt. A teljes katalógushoz való hozzáféréshez – a HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet szellemi tulajdon és adatkezelési szabályzata értelmében – az intézet igazgatója felé szükséges kérelmet benyújtani.

A hazai digitális katalógus eseményeinek felülvizsgálata

Állomások

A Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat (MNSZH) az évek során jelentős fejlődésen ment keresztül. A permanens állomások száma folyamatosan nőtt, melyhez 2015 decemberétől az AlpArray nemzetközi projekt keretében a Dunántúlra telepített 14 ideiglenes állomás csatlakozott (Gráczer et al. 2018). 2019-ben újabb jelentős lépés történt, az ország keleti felén 12 új, ideiglenes állomás létesült a PACASE (Pannonian–Carpathian–Alpine Seismic Experiment) nemzetközi projekt keretében (Süle et al. 2020). Így a 15 állandó állomás mellett jelenleg 26 ideiglenes, széles sávú állomás üzemel (*1. ábra*), melyek közül 15 esetében a németországi DSEBRA konzorcium biztosítja a műszereket (Schlömer et al. 2022.). A 41 állomás soha nem látott lefedettséget és kedvező állomásgeometriát biztosít az egész ország területére. A hálózat fejlődése maga után vonta a fázisadatok robbanásszerű növekedését, ami



1. ábra. A helymeghatározások pontosításához felhasznált permanens és ideiglenes szeizmológiai állomások eloszlása és adatszolgáltatási időtartama Magyarországon és szűkebb környezetében. A nemzetközi kutatási projektekhez, nagyobb eseményklaszterekhez kapcsolódó ideiglenes állomásokat az országhatáron belül a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat működteti. A színek az állomások években mért adatszolgáltatási időtartamát jelölik 2021-ig. A lila keret a hazai, digitális katalógus által lefedett területet jelöli

Figure 1. *Operational Periods of Permanent and Temporary Seismological Stations in Hungary and its vicinity. Temporary stations associated with international research projects within the national borders are operated by the Hungarian National Seismological Network. The colors indicate the operational periods of the stations until 2021. The purple frame indicates the area covered by the Hungarian digital catalog*

nagyban hozzájárul a helymeghatározási hibák csökkenéséhez.

A szeizmikus események fázisadatai nemcsak a hazai állomásokon kerülnek kimérésre, hanem a határon túli, nyilvános szeizmológiai hálózatok műszerei is hozzájárulnak a munkánkhoz (*1. ábra*). Így például az Osztrák Központi Meteorológiai és Geodéziai Intézet, a Zágrábi Egyetem, a Román Nemzeti Földfizikai Intézet, a Szlovén Környezetvédelmi Ügynökség, a Szlovák Akadémia Földtudományi Intézete, az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia Geofizikai Intézetének Kárpát Térségi Ága, a Szerb Szeizmológiai Felmérés, a GEOFON Szeizmikus Hálózat és a Geo Forschungs Zentrum hullámformáit is felhasználjuk.

Az MNSZH állomásait és a Magyarország közvetlen környezetében található legfontosabb állomásokat, valamint azok években mért működési időtartamát az *1. ábra* mutatja. A legsötétebb színnel jelölt állomások működése már évtizedekre nyúlik vissza, ám az állomásgeometriát jelentősen javító ideiglenes állomások működési ideje még csak pár év. Ennek a fejlődő állomásgeometriának köszönhető a detekciós küszöb javulása és részben a helymeghatározási hibák csökkenése.

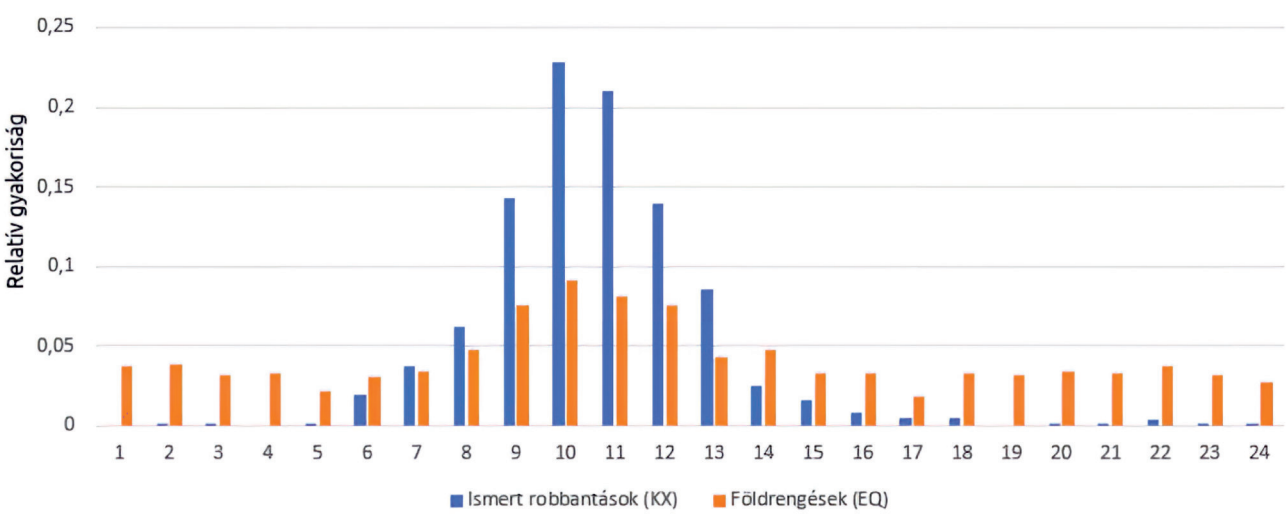
Helymeghatározások

1995-től 2014-ig a helymeghatározás a Hypo71 (LEE & LAHR 1972) program segítségével történt. 2015-ben áttértünk az iLoc helymeghatározó szoftver alkalmazására, és megtörtént a korábbi események egységes újrafeldolgozása is (BONDÁR et al. 2018).

Az iLoc abszolút helymeghatározó algoritmus (BONDÁR & MCLAUGHLIN 2009a, BONDÁR & STORCHAK 2011) az ISC (International Seismological Center) lokátorának továbbfejlesztett változata. A helymeghatározáshoz sebességmodellre van szükség, amely leírja, hogy a különböző hullámfázisok milyen sebességgel haladnak át a megtett úton. A gyorsaság érdekében ezek általában egydimenziós, radiálisan szimmetrikus modellek, vagyis a sebesség kizárólag a mélység függvénye. Mivel BONDÁR et al. (2018) tanulmánya jól demonstrálja, hogy hazánk területén az elérhető sebességmodellek közül a 3D-s RSTT (MYERS et al. 2010) sebességmodellel érhetőek el a legpontosabb eredmények, a helymeghatározásokat minden esetben ezzel végeztük el. A 3D-s sebességmodell nemcsak a függőleges, hanem a kelet-nyugati és északi-déli irányú változásokat is leírja (az RSTT 3D modell esetében 1×1 fokos rácsháló mentén), így a modellezett sebességstruktúra jóval pontosabban közelíti a valóságot. A hazai digitális katalógus 1996 és 2021 között ösz-szesen 9586 db földrengést tartalmaz a 45,5°–49°É és 16°–23°K által határolt területen belül. Ezek hipocentrumait ismételten meghatároztuk, jelentősen csökkentve a helymeghatározási hibákat. Az eredeti adatbázis nem mindig tartalmazta az összes releváns kimérést, ezért számos esetben az ISC nyilvános adatbázisát is felhasználtuk, valamint a helymeghatározásokat a hazai és nemzetközi adatok összefésülése után végeztük el. Minden olyan eseményt elvetettünk, ahol a másodlagos azimutális nyílás nagy, így a helymeghatározás nagyon bizonytalan volt. Általánosságban elmondható, hogy az újraértékelt földrengések többsége kedvező állomásgeometriával rendelkezik.

Robbantások elkülönítése

A szeizmikus hálózat gyors fejlődése nem csak a pontosabb helymeghatározást tette lehetővé. A detekciós küszöb is alacsonyabb lett, így az eddigieknél kisebb energiájú események is regisztrálásra kerültek. A Kárpát-Pannon régió általában nyugodt, a legtöbb szeizmikus esemény kis energiájú, így nem érzékelhető a lakosság számára. Azonban a bányászati robbantások komoly problémát jelentenek a természetes földrengések felismerése során, mivel energiájuk gyakran összemérhető a kisebb, természetes földrengésekével. További nehézséget jelent, hogy a kőbányák általában olyan területeken találhatók, ahol természetes szeizmicitás is megfigyelhető. Az obszervatórium minden évben össze-



2. ábra. Ismert robbantások és a természetes eredetűként nyilvántartott szeizmikus események napszakon belüli eloszlása az átdolgozás előtti katalógusban

Figure 2. *Diurnal distribution of documented explosions and seismic events classified as naturally occurring in the pre-revised catalog*

gyűjti a bányakapitányságok által igazolt robbantásos, antropogén eseményeket, az ún. alapeseményeket (*groundtruth* – GT), amelyek fontosak a helymeghatározások hibáinak mérése során. A GT-események kategóriákba sorolhatóak annak függvényében, mennyire pontosan ismert a kipattanás helye. Ha az igazolt bányarobbantás 2 km-es pontossággal ismert, akkor GT2 alapesemény kategóriába tartozik (Bondár et al. 2004).

A bányakapitányságok által igazolt események közel sem fedik le a teljes antropogén tevékenységet, ezért további megkülönböztetésre van szükség a katalógus szennyezettségének csökkentése érdekében. Ha a földrengésként nyilvántartott események időbeli eloszlását ábrázoljuk, látható, hogy van egy napi csúcsidőszak (*2. ábra*), míg a természetes földrengések eloszlása egyenletes, nem függ a napszaktól, éjjel és nappal egyaránt előfordulhatnak.

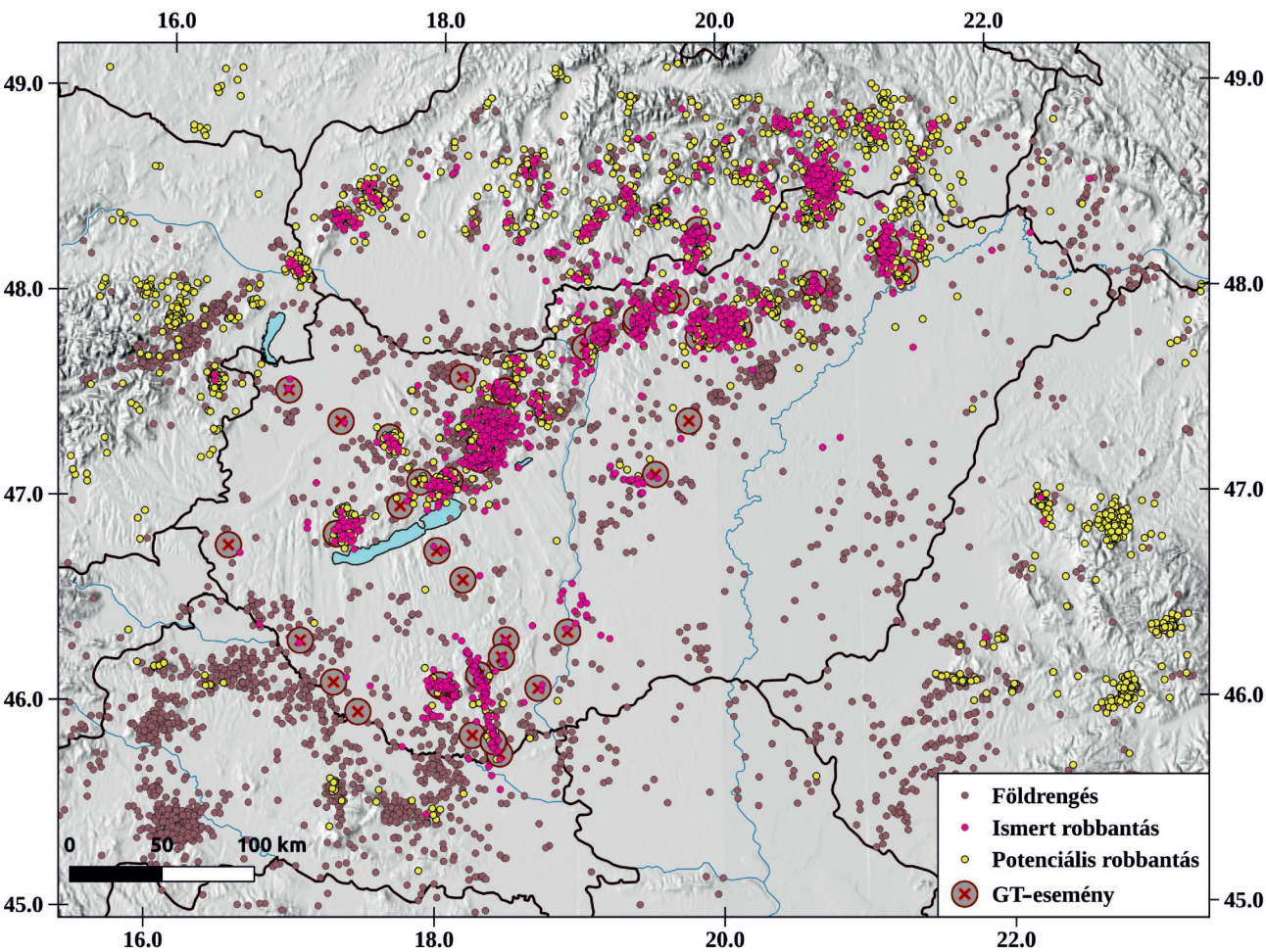
Az antropogén események meghatározására hatékony módszer a hullámforma-korrelációra épülő klaszterezés, amely lehetővé teszi az egymáshoz hasonló hullámformájú események csoportosítását a korrelációs koefficiensük alapján. A módszer felhasználásával számos bánya robbantásait sikerült kiszűrnünk az adatbázisból.

Emellett a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága Országos Bányakapitányság nyilvános bányatelek-nyilvántartásának térképét is felhasználtuk a bányaterületekhez kapcsolódó szeizmikus események lehatárolásához, figyelembe véve a kipattanási időt és a magnitúdót is. Ennek eredményeként további 845 eseményt azonosítottunk robbantásként az adatbázisban, mely korábban földrengésként volt nyilvántartva (*3. ábra*).

A hazai digitális katalógusban jelenleg 4579 természetes eredetű földrengésként jelölt esemény található. Az említett módszerekkel eltávolított robbantások után a földrengések kipattanási idejének eloszlása egyenletesebb lett, de fontos tudni, hogy a bulletinek továbbra is tartalmazhatnak kisebb mértékű szennyezettséget.

Klaszteranalízis, többeseményes helymeghatározások

Az iLoc szoftverrel történt helymeghatározások mellett néhány eseményklasztert a HypoDD (Waldhauser & Ellsworth 2000) többeseményes helymeghatározó algoritmus segítségével is feldolgoztunk, mely jelentősen redukál-



3. ábra. A felülvizsgált események eloszlása 1996. januártól 2021. decemberig. Természetes eredetű földrengések (barna), GT-események (rózsaszín x barna körben), ismert robbantások (rózsaszín), potenciális robbantások (sárga)

Figure 3. *Distribution of the reviewed events from January 1996 to December 2021. Naturally occurring earthquakes (brown), GT events (pink x in brown circle), confirmed explosions (pink), potential explosions (yellow)*

ja a helymeghatározási hibákat (BÉKÉSI et al. 2017, CZECZE et al. 2018, CZECZE & BONDÁR 2019, WÉBER et al. 2020). A kettős különbségeken alapuló HypoDD algoritmus egy olyan relatív földrengés-helymeghatározó módszer, amely az abszolút menetidőmérések mellett a hullámformák keresztkorrelációjából származó P- és S-hullám differenciális menetidőadatokat is felhasználja. A hullámformák keresztkorrelációjának elvégzése jelentős mennyiségű új adatot biztosított, ami segítette mind a diszkriminációt, mind a helymeghatározások pontosítását.

Az egyik legnagyobb figyelmet igénylő eseményklaszter a Gánt környéki kevert, mesterséges és természetes eredetű eseményeket is tartalmazó csoport volt. Az átdolgozott katalógusban 7 db eseményklaszter többeseményes analízisének eredménye található meg preferált megoldásként, amelyek jelentősen javították a kezdeti helymeghatározások pontosságát.

A felülvizsgálat eredményei

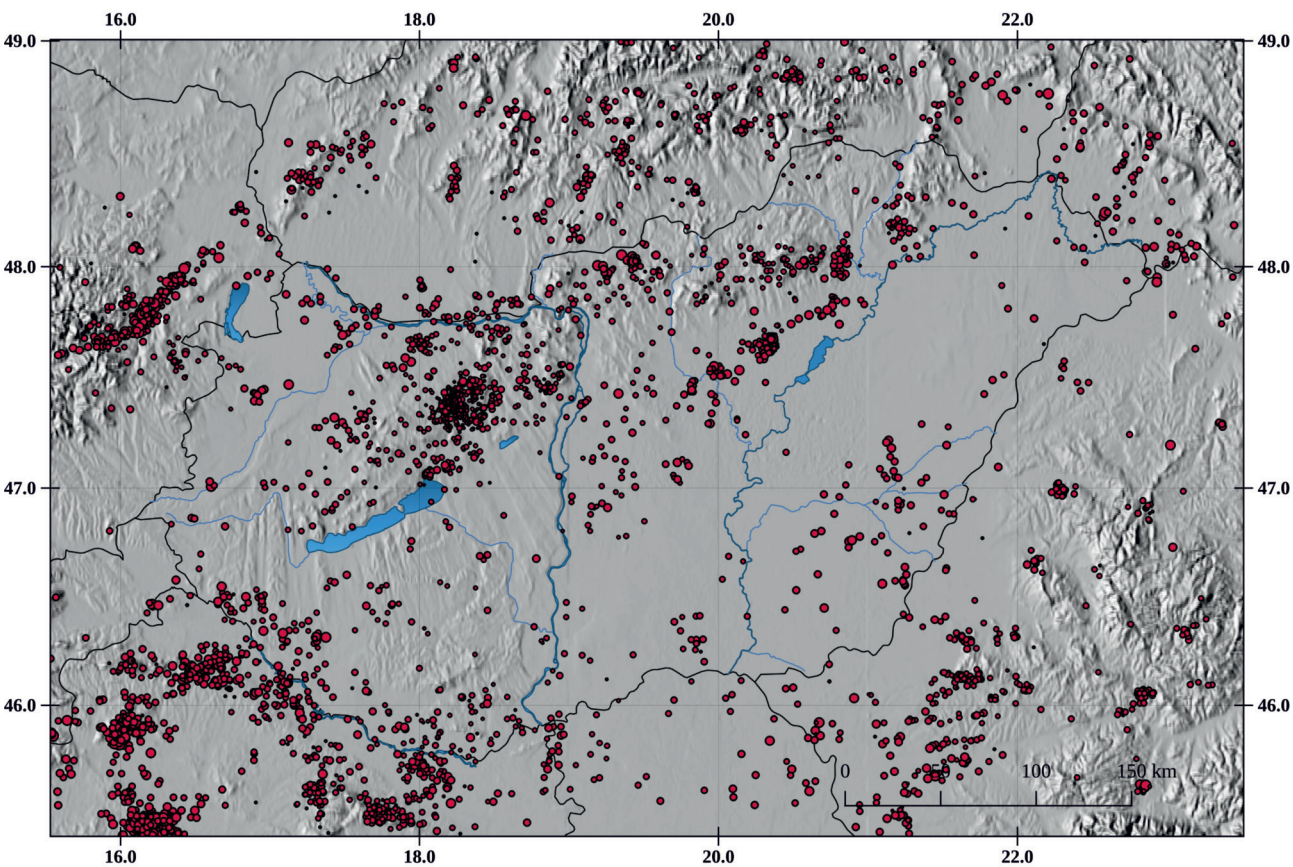
A felülvizsgált hazai digitális katalógusban található természetes eredetű földrengések epicentrumait a *4. ábra* térképe mutatja. Kis méretarányú szeizmicitástérképek összehasonlításával nehezen látható lényegi különbség, ezért az átdolgozás előtti és az átdolgozott katalógus közötti különbséget néhány részterületen mutatjuk be (*5a, b, c, d* ábrák). A felülvizsgált adatbázis tartalmazza a korábban sikeresen feldolgozott területeket is (BÉKÉSI et al. 2017, CZECZE et al. 2018, CZECZE & BONDÁR 2019, WÉBER et al. 2020)

Az *5a ábrá*n hazánk egyik legaktívabb területe látható, ahol az oroszlányi földrengés és utórengései, valamint a gánti kőbánya robbantásai keverednek egymással. Míg az eredeti katalógusban nagy keveredés volt jellemző, addig az új katalógus eseményei klasztereződtek, köszönhetően a helymeghatározások pontosításának és a nagy mennyiségű antropogén esemény eltávolításának.

Az *5b ábra* Magyarország és Horvátország határának szintén kevert szeizmicitású területe, ahol a kezdetben tévesen földrengésként nyilvántartott események valótlan geológiai interpretációhoz vezethettek. Az É–D irányítottságú vonal csupán a kedvezőtlen állomásgeometriából fakadó hiba (CZECZE & BONDÁR 2019), mely az antropogén események eltávolítása után teljesen eltűnt a térképről.

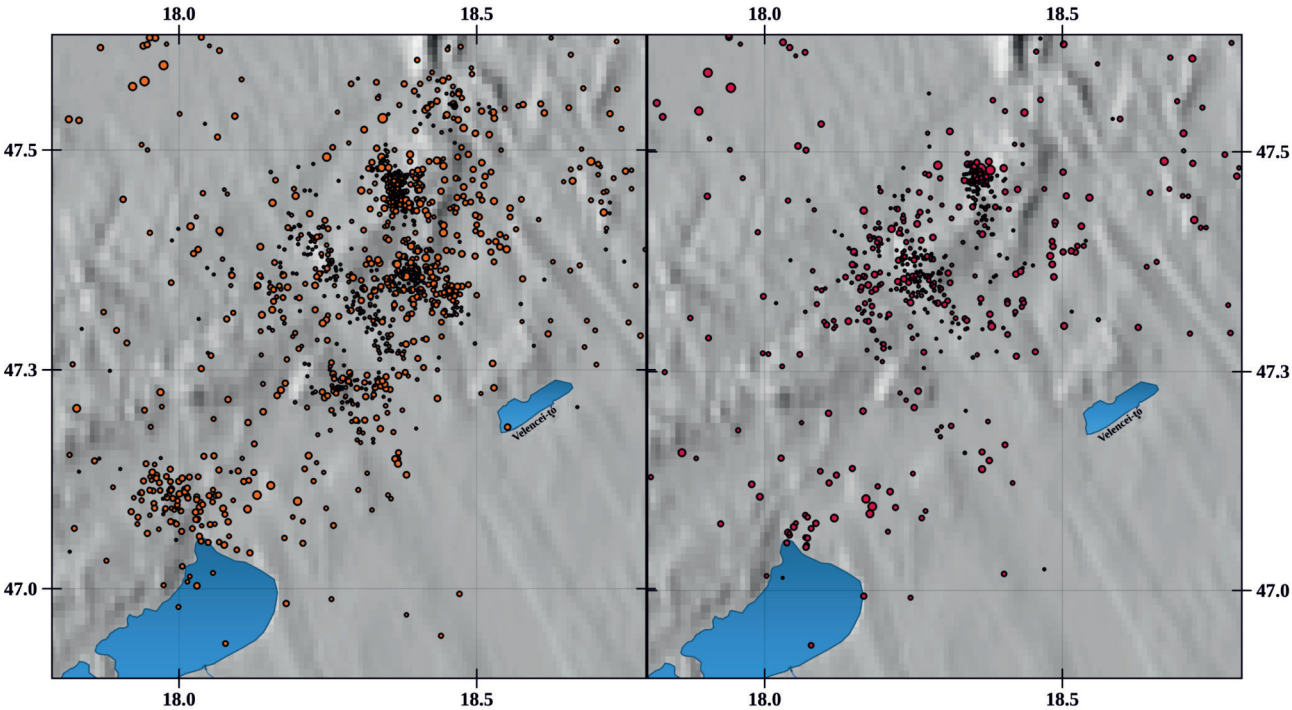
Ugyanez figyelhető meg az *5c ábrá*n is, mely a magyar–szlovák határ közelében található bányaterület Hidvégardótól mindössze 2,5 km-re. A bánya jelentős eseményklasztert generált az eredeti katalógusban (földrengésként nyilvántartva), az átdolgozott katalógus viszont jelentős szűrésen ment keresztül.

Végül az *5d ábra* prezentálja a nemzetközi ISC-adatbázissal való kiegészítés eredményét. Az adatbázisból származó fázisadatokkal kiegészítve saját kiméréseinket több



4. ábra. Átdolgozott hazai digitális katalógus: 1996 és 2021 között kipattant, digitálisan regisztrált, természetes eredetű földrengések (iLoc és hypoDD megoldások)

Figure 4. *Revised Hungarian digital catalog. Digitally recorded, naturally occurring earthquakes (iLoc and hypoDD solutions) between 1996 and 2021*

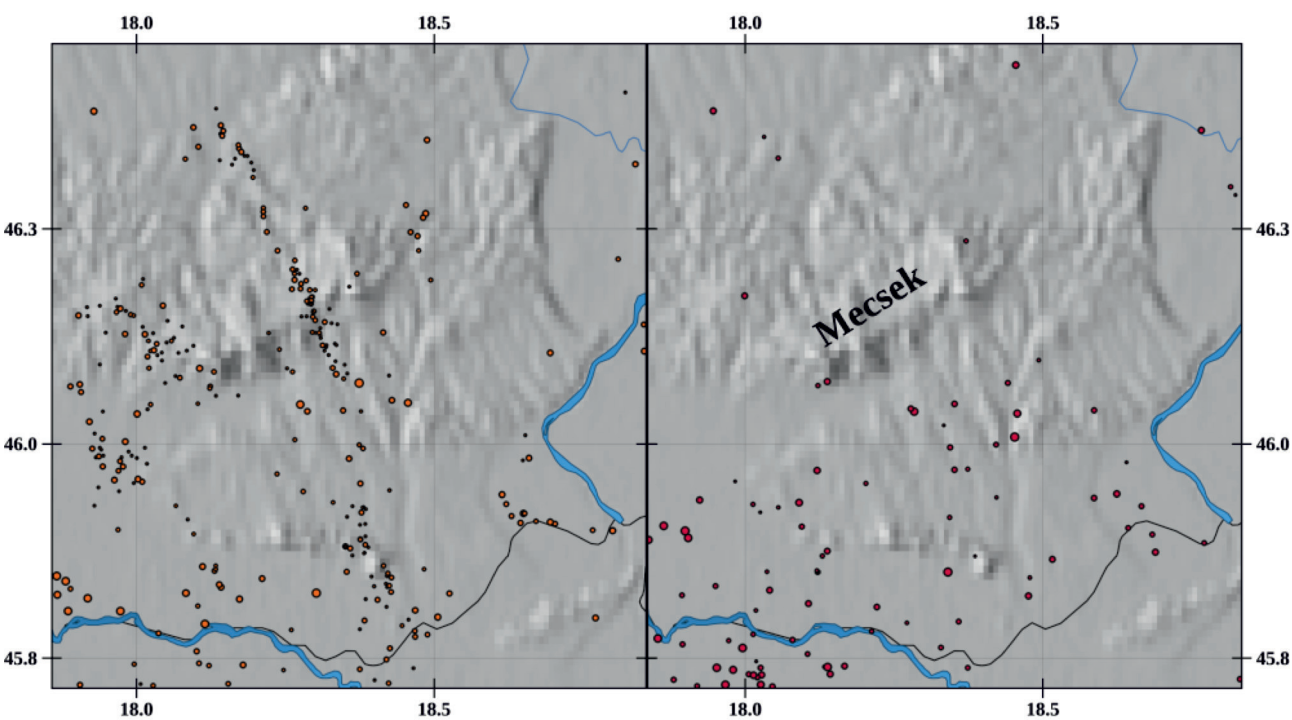


5a ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) a Vértes hegység környékén

Figure 5a. *The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) in the vicinity of the Vértes Hills*

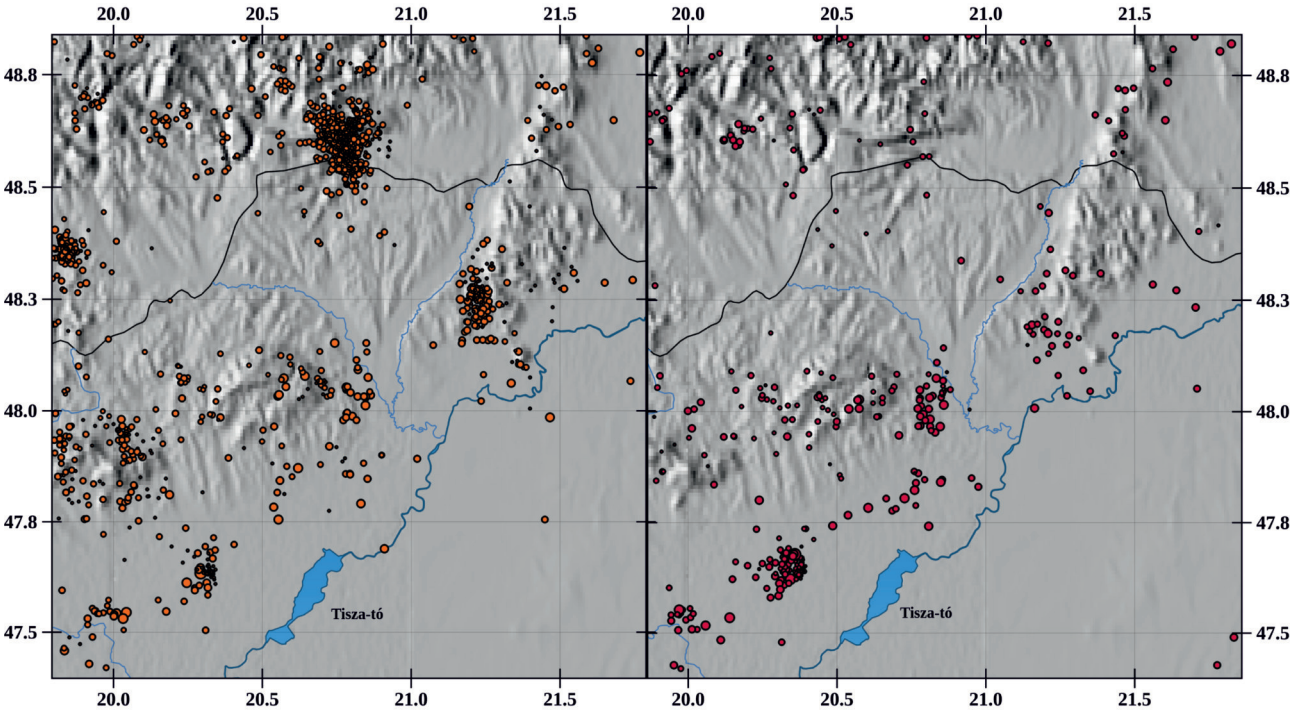
földrengés hipocentrumát sikerült megfelelő pontossággal meghatároznunk. Így jelentősen több esemény áll rendelkezésünkre a területről, és a Bécsi-medencén is áthúzódó Mur–Mürz vonalról is részletesebb képet kaptunk.

Magyarországon és közvetlen környezetében általában a sekély fészkű földrengések jellemzők, melyek leggyakrabban a 6–10 km közötti mélységtartományban keletkeznek, ahogy a *6. ábra* eloszlása is mutatja. Amennyiben – pl. az éppen aktuális állomásgeometria miatt (*1. ábra*) – nem áll rendelkezésre elegendő mélységfázis a megbízható mélységmeghatározáshoz, a mélység nem szabad paraméter, így manuális rögzítése szükséges. Ekkor próbaként a leggyak-



5b ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) Magyarország és Horvátország határán

Figure 5b. *The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) at the border of Hungary and Croatia*

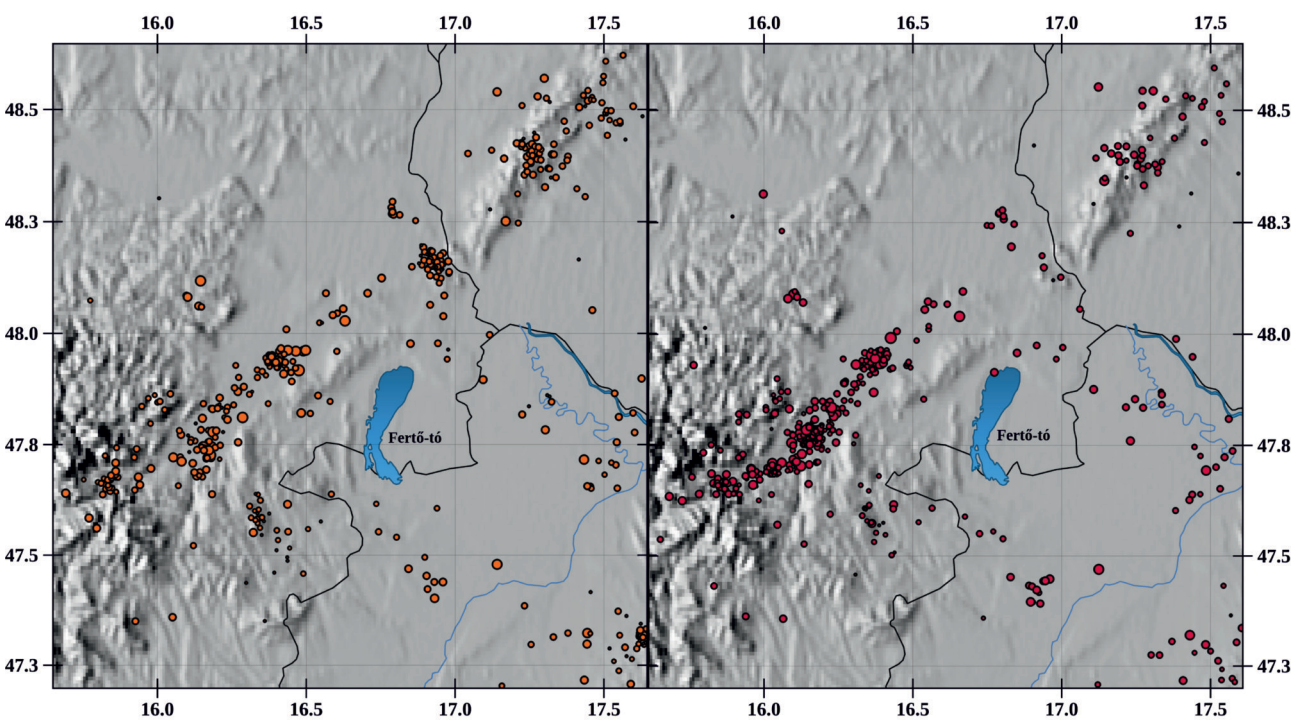


5c ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) Észak-Magyarországon

Figure 5c. *The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) in Northern Hungary*

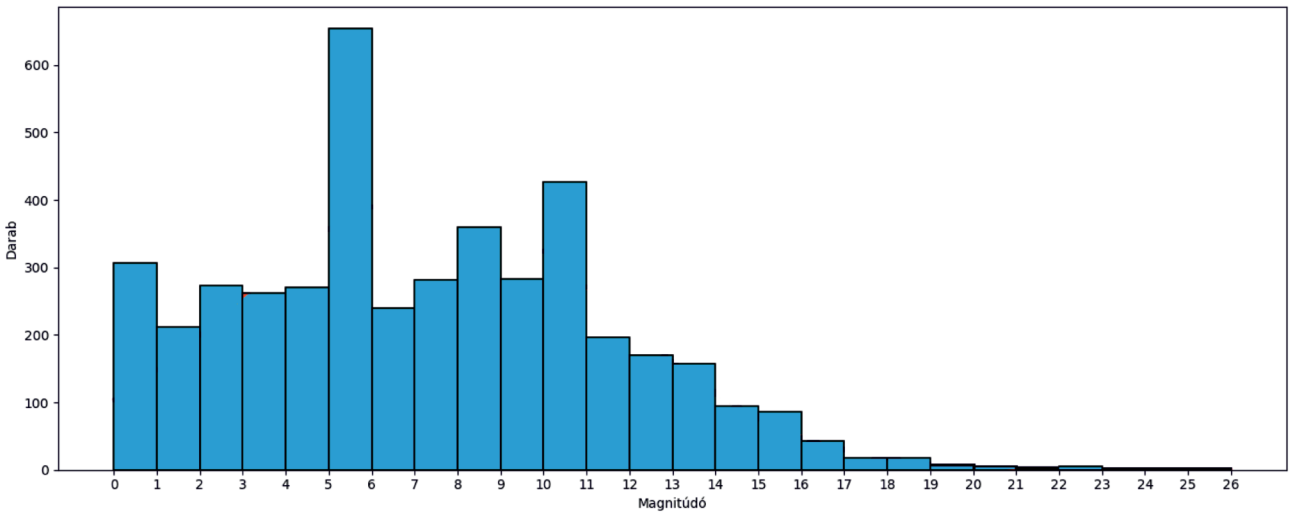
rabban előforduló mélységekben kerülnek rögzítésre az események, majd a legkisebb hibát eredményező megoldás preferált megoldásként kerül a katalógusba. Az 5 és 10 km-es mélységű kiugró értékek ezeket a rögzített mélységeket jelzik.

A projekt végére 1996 és 2021 között a teljes Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin egységesen átdolgozásra került. A KRSZO-ban bevezetésre került a projektben alkalmazott metódus, aminek eredményeként lehetővé válik az adatbázis egységes bővítése minden évben az új földrengésadatokkal.



5d ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) a Bécsi-medence környékén

Figure 5d. *The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) in the vicinity of the Vienna Basin*



6. ábra. A hazai digitális katalógus eseményeinek mélységeloszlása 1996–2021-ig

Figure 6. *Depth distribution of events in the Hungarian digital catalog from 1996 to 2021*

A Kárpát-Pannon régió teljes, kombinált földrengés-katalógusa

A felhasznált adatok forrásai, a katalógus előállítása

A Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium korábban is rendelkezett történelmi és műszeres adatokat tartalmazó földrengés-katalógussal, amely az évek során fokozatos fejlődésen, kiegészítéseken ment keresztül. A legutolsó katalógus Zsíros Tibor sokéves gyűjtőmunkájának eredménye (Zsíros 2014), 70615 feljegyzést tartalmazott a 456–2010 közötti időszakra és a 44°–50°É és 13°–28°K körök által bezárt területre kizárólag számítógépes állományban. Egy földrengés-katalógus sosem lehet teljes, mivel a régióban folyamatosan keletkeznek földrengések, amelyek miatt a katalógusban is folyamatosan nő a bejegyzések száma, és az adatfeldolgozási módszerek is változnak. Célunk a projekt során az volt, hogy egy olyan katalógus jöjjön létre, amely tartalmazza a történelmi múltban keletkezett és műszeresen regisztrált földrengések alapadatait egyaránt, valamint kiindulásként szolgál a későbbi kiegészítéseknek és továbbfejlesztéseknek.

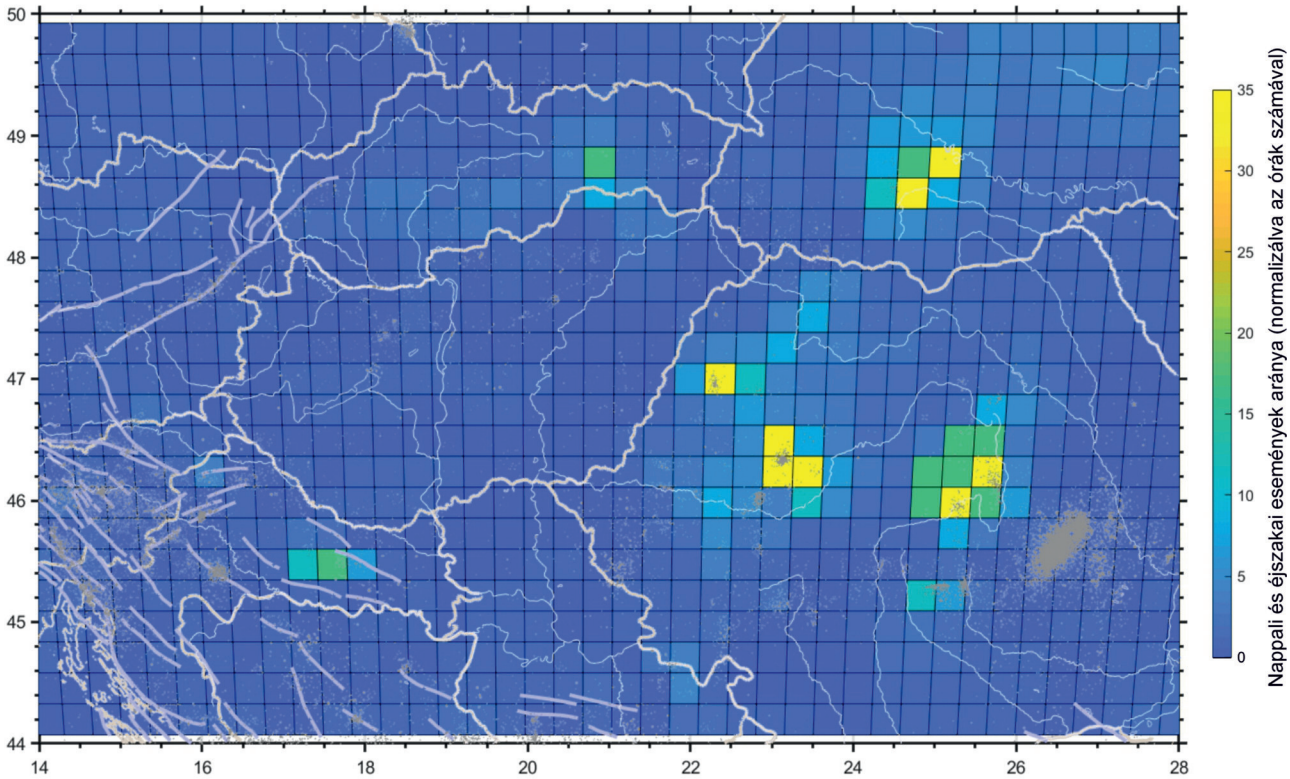
A kiindulásként felhasznált Zsíros (2014) katalógusban megtalálhatók az egyes rengések időpontjai, koordinátái, epicentrális intenzitásai és a momentummagnitúdók, amelyek szükségesek a veszélyeztetettségi számításokhoz. Azonban a magnitúdóértékek származtatása nem volt visszakövethető, mivel az eredeti magnitúdóértékeket és -típusokat nem tartalmazta, így a pontosításhoz vagy továbbfejlesztéshez nem volt felhasználható az adott formában. Ezért a katalógust első lépésben a különböző elérhető magnitúdótípusokkal (ML, MS, mb, MD, Mw) és a műszeres meghatározásoknál a bizonytalanságot jellemző hibaellipszis paramétereivel egészítettük ki.

2011-ben az ISC új, továbbfejlesztett hipocentrum- és magnitúdómeghatározási eljárásra tért át (Bondár & Storchak 2011). Az új eljárással az 1964 és 2010 közötti időszakra teljesen újraszámolták a rengések fészekparamétereit (Storchak et al. 2017, 2020), így a kezdeti (Zsíros 2014) katalógus egyes eseményeihez tartozó paramétereket felülírtuk a felülvizsgált ISC-katalógusban található paraméterekkel.

A 2011 és 2020 közötti időszakra, a teljes Kárpát-medence területére az ISC katalógusából importáltuk az M≥2 magnitúdójú földrengéseket. A katalógus bővítésének időpontjában az ISC-ben 2020. december 31-ig álltak rendelkezésre a hipocentrumadatok, ezért ezt a kombinált katalógust a teljes területen is csak 2020 végéig bezárólag egészítettük ki.

Magyarországon és közvetlen környezetében a legpontosabb földrengés-paraméterek a hazai átdolgozott digitális katalógusban találhatók. A sűrű állomáshálózat nagyobb érzékenysége miatt ez olyan kis magnitúdójú eseményeket is tartalmaz, amelyek nem találhatók meg az ISC adatbázisában, ezért a teljes, kombinált katalógus ezekkel a kis eseményekkel is kiegészült. Az ún. bulletinterületen (45,5–49°É, 16–23°K) az 1996 és 2020 közötti időszakban keletkezett földrengéseknél az átdolgozott digitális katalógusban lévő paramétereket tartottuk meg preferált megoldásként. Az ország középső részén, a paksi atomerőmű környezetében a GeoRisk Kft. 1995 óta sűrű és érzékeny szeizmológiai állomáshálózatot működtet (ehhez a hálózathoz a KRSZO 2011-ig fért hozzá). Felhasználva az MNSZH nyilvános állandó állomásainak regisztrátumait, 2012 óta önállóan adja ki a *Magyarországi Földrengések Évkönyvé*t. Az ezekben megjelent, megbízhatónak ítélt eseményekből válogatva további 129 rengéssel bővítettük a teljes, kombinált katalógust (Tóth et al. 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021).

A HNSB területén (45,5–49°É, 16–23°K) a jelenlegi sűrű hálózattal detektált események több mint fele bányarobbantás, ezért utolsó, de annál fontosabb lépésként a katalógust szennyező, de a különböző vizsgálatokkal azonosított bányarobbantásokat távolítottuk el. Azt, hogy ezután a katalógusban maradtak-e mégis robbantásokkal szennyezett területek, a nappali és éjszakai események számának az ará-



7. ábra. A nappali és éjszakai események arányának területi eloszlása. A nem szennyezett, csak természetes rengéseket tartalmazó részterületeknél az arány 0 és 1 közé esik (kék színek). A térképen belül látható szürke pontok az epicentrumokat, a háló az egyes vizsgált grideket mutatja

Figure 7. *Spatial distribution of the ratio between daytime and nighttime events. For non-contaminated sub-areas containing only natural earthquakes, the ratio falls between 0 and 1 (blue colors). The gray dots visible in the map show the epicenters, and the mesh shows the individual investigated grids*

nyával vizsgáltuk. A *7. ábra* a nappalinak (vagyis munkaidőben, 7–17 óra között) és éjszakainak (munkaidőn kívülinek, 17–07 óra között) számított időszakokon belüli egész órák számával normalizált arány területi eloszlását mutatja. A térkép alapján megállapítható, hogy Magyarország területén belül a robbantásokat nagyrészt sikerült eltávolítani, némi szennyezettség, vagyis földrengésnek vélt robbantás a magyar–szlovák határ még közelében található. Erősebben szennyezett robbantásokkal Románia területe, Ukrajnában az Északkeleti-Kárpátok és Horvátországban a Krndija-hegység területe. Megvizsgálva a romániai Nemzeti Földfizikai Intézet által kiadott ROMPLUS-katalógust (POPA et al. 2022), ugyanezt a szennyezettséget találtuk. Ezeket a területeket azért fontos ismernünk, hogy ne vezessenek téves szeizmotektonikai értelmezéshez az ott látható epicentrumok.

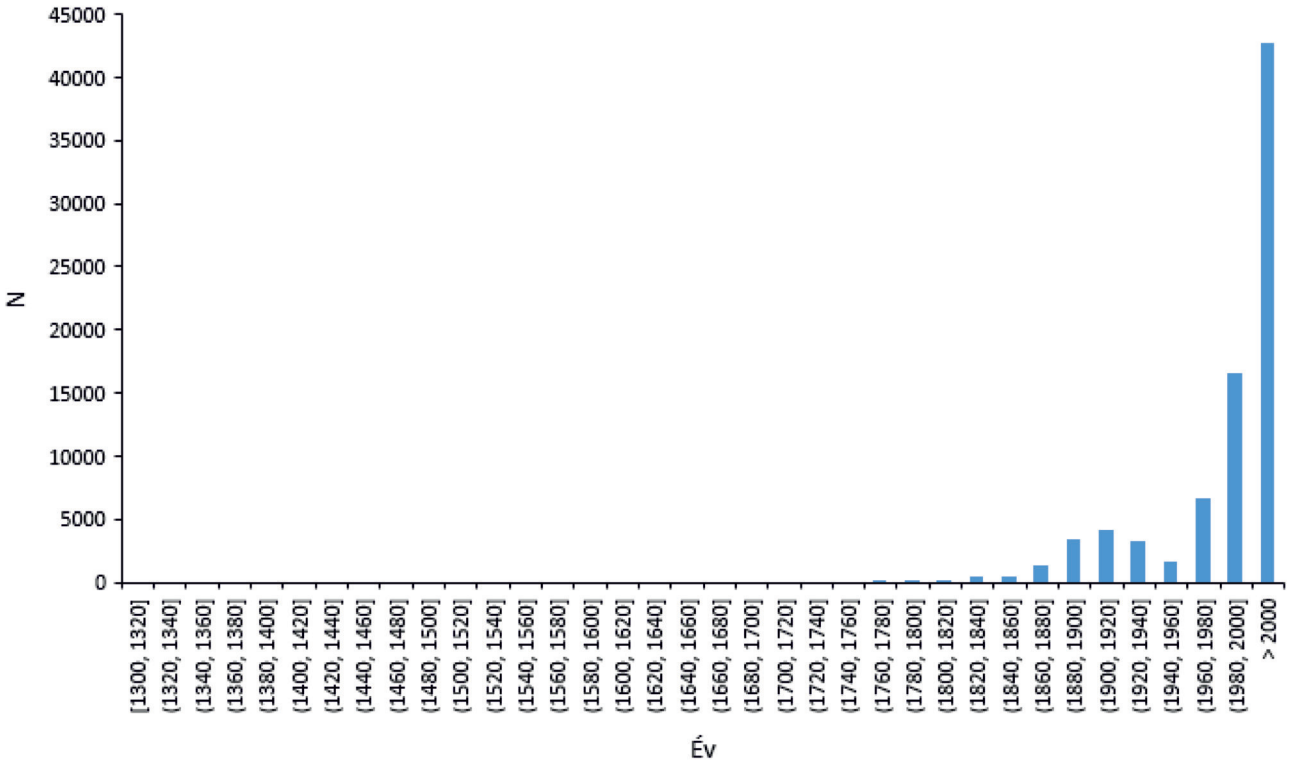
A földrengés-veszélyeztetettség számításokhoz a momentummagnitúdók ismerete szükséges. Ezért az adatbázist kiegészítettük a saját spektrális számításainkból, fészekmechanizmus-megoldásainkból származó és a szakirodalomban megjelent momentummagnitúdókkal (SÜLE & WÉBER 2013; WÉBER et al. 2020, 2023). Így 322 esemény rendelkezett momentummagnitúdóval. Azoknál az eseteknél, ahol nem volt spektrálisan számított érték, korrelációs összefüggéseket határoztunk meg, és ezek segítségével becsültük a momentummagnitúdót. A számítás rövid összefoglalója a függelékben található.

A szeizmicitás jellemzői a teljes, kombinált katalógus alapján

A katalógus 2020 decemberéig összesen 82 642 eseményt tartalmaz, ezek közül közelítőleg 90%-nak van magnitúdója. Eloszlásukat a projekt keretében elkészített szeizmicitástérkép mutatja (GYŐRI et al. 2023). A térképen csak a magnitúdóértékkel rendelkező, és kettesnél nagyobb magnitúdójú földrengések láthatók, kiszűrve ezzel a még bennmaradt bányarobbantások nagy részét.

A történelmi múltban keletkezett földrengésekről az ismereteink sokszor nagyon hiányosak. Jelentős előrelépést jelentett a XX. század elején az első szeizmológiai állomások telepítése. A ’90-es évek elején megkezdte működését Piszkés-tetőn az első hazai digitális állomás, majd 1995-től a Paks körüli hálózat. Az állomások száma azóta is folyamatosan nőtt, ami maga után vonta a hálózat érzékenységének növekedését (*8. ábra*). Az állomáshálózat sűrűsödésével az egyre kisebb magnitúdójú események megfigyelése is lehetségessé vált (*9. ábra*). Egyes területeken már 1-nél kisebb, nullához közeli magnitúdójú rengések detektálása is lehetséges (SÜLE et al. 2020), amelyek ugyan nem jelentenek veszélyt, de segítenek egyes területek, törésvonalak aktivitásának megítélésében.

A *10. ábra* a teljes, kombinált katalógusban található földrengések magnitúdójának eloszlását mutatja, amely alapján megállapítható, hogy a 2–2,5 magnitúdójúnál kisebb

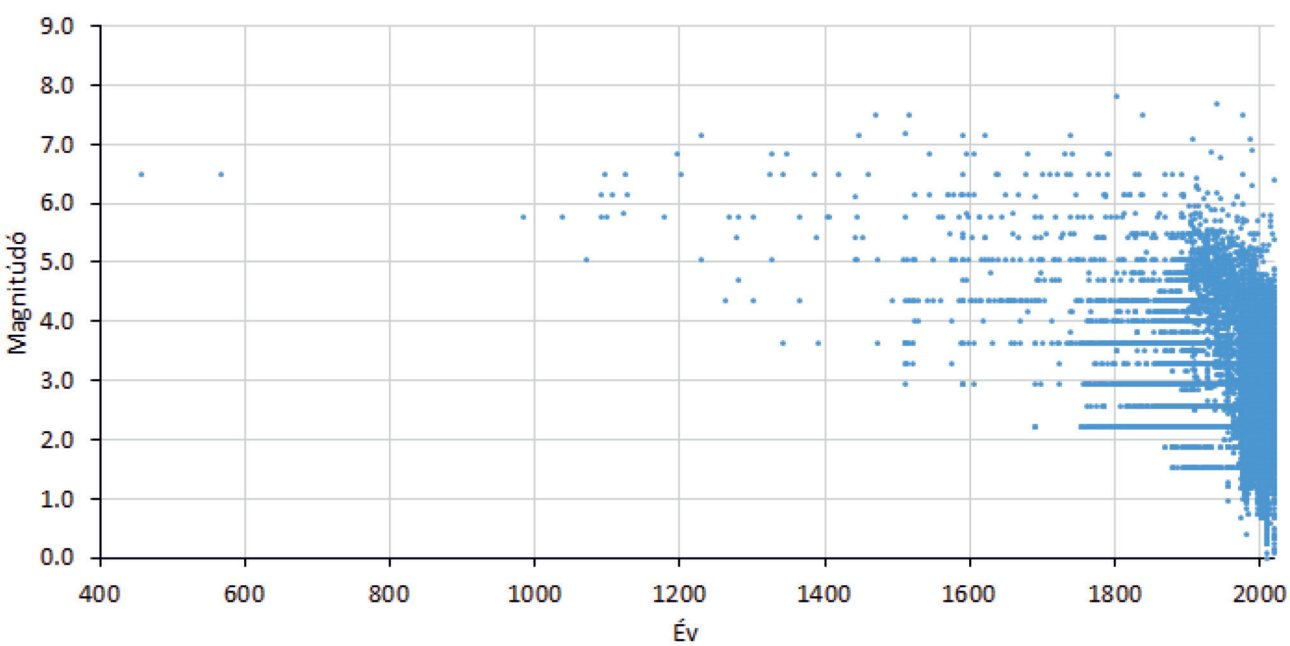


8. ábra. A teljes, kombinált katalógusban található események számának növekedése az idővel

Figure 8. *The temporal distribution of the events listed in the entire combined catalog*

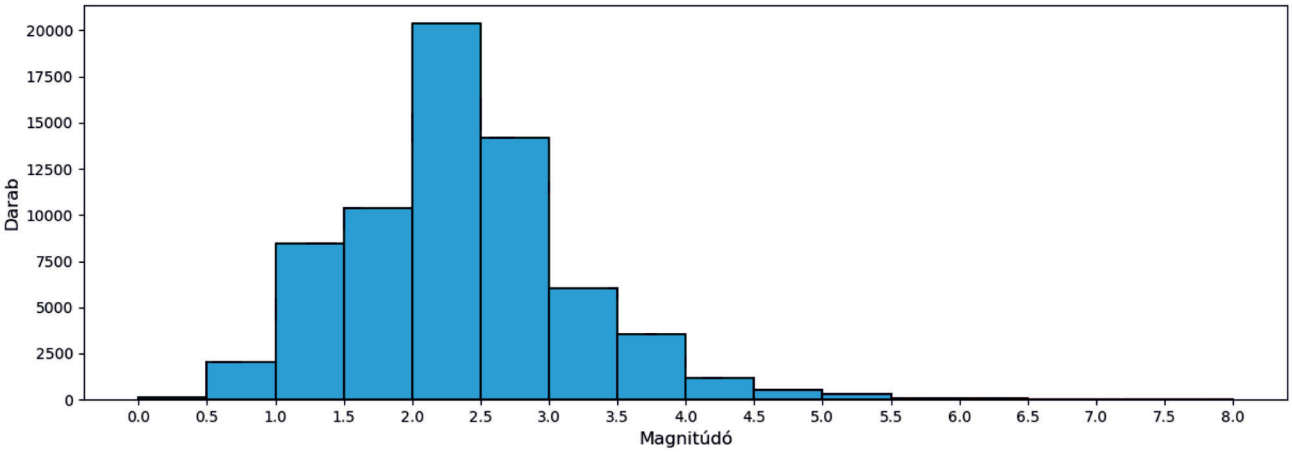
rengések csak részben szerepelnek a katalógusban, és csak korlátozott részeken vannak róluk információink. Statisztikai adatokra támaszkodva ezen kis események száma a valóságban sokkal nagyobb, de az állomásgeometria robbanásszerű fejlődése előtt (*1. ábra*) sokszor láthatatlanok maradtak.

Ha ábrázoljuk az 1 rögzített magnitúdónál erősebb földrengések összegzett számát az idő függvényében, meghatározhatjuk azt, hogy mikortól kezdve ismerjük az összes, adott magnitúdójúnál erősebb földrengést. A földrengések közel egyenletes eloszlását feltételezve az időben a görbe meredekségének megváltozása jelzi ezt az időpontot. A *11. ábra* alapján a teljes Kárpát-Pannon régió rengéseit tartalmazó katalógus az 1700-as évek közepétől teljes az $M_W \geq 6$, a



9. ábra. A teljes, kombinált katalógusban található események magnitúdójának eloszlása az idő függvényében.

Figure 9. *Distribution of event magnitudes in the entire combined catalog over time.*



10. ábra. A teljes, kombinált katalógusra jellemző magnitúdóeloszlás
Figure 10. *Magnitude distribution characteristic of the entire combined catalog*

XIX. és XX. század fordulójától, az intézményes földrengéskutatás kezdetétől az $M_W \geq 5$ és $M_W \geq 4$, és mindössze 1975-től az $M_W \geq 3$ földrengésekre.

A teljesség területi eloszlása azonban nem egyenletes. Ha csak Magyarország jelenlegi területét és annak közvetlen környezetét nézzük (HNSB területe, 45,5–49°É, 16–23°K), azt mondhatjuk, hogy az 1700-as évektől kezdve ismerjük az összes 6-nál nagyobb, az 1763-as komáromi földrengéstől kezdve az összes 5-nél nagyobb, 1868-tól az összes 4-nél nagyobb és 1975-től az összes 3-nál nagyobb magnitúdójú földrengést.

A földrengések előfordulásának gyakoriságát egy adott területen a Gutenberg–Richter-egyenlet írja le. Eszerint $logN = a - bM$, ahol M a magnitúdó, N az M-nél nagyobb vagy egyenlő magnitúdójú események éves számát adja meg, a és b pedig konstansok. A teljes régióra (44°–50°É, 13°–28°K) $a = 5{,}34$, $b = 1{,}01 \pm 0{,}04$, az M magnitúdó pedig momentum magnitúdóban (M_w) értendő. A számítást az 1975 és 2020 között keletkezett, $M_W \geq 3$ földrengésekre, a ZMAP-szoftver (WIEMER 2001) segítségével végeztük el, a b bizonytalanságának becslése bootstrap eljárással (EFRON 1979) történt. Az egyenlet alapján a területen 5-ösnél nagyobb magnitúdójú földrengés évente átlagosan 2 fordul elő, míg 6-nál nagyobb 5 évente, 7-nél nagyobb pedig 54 évente keletkezik.

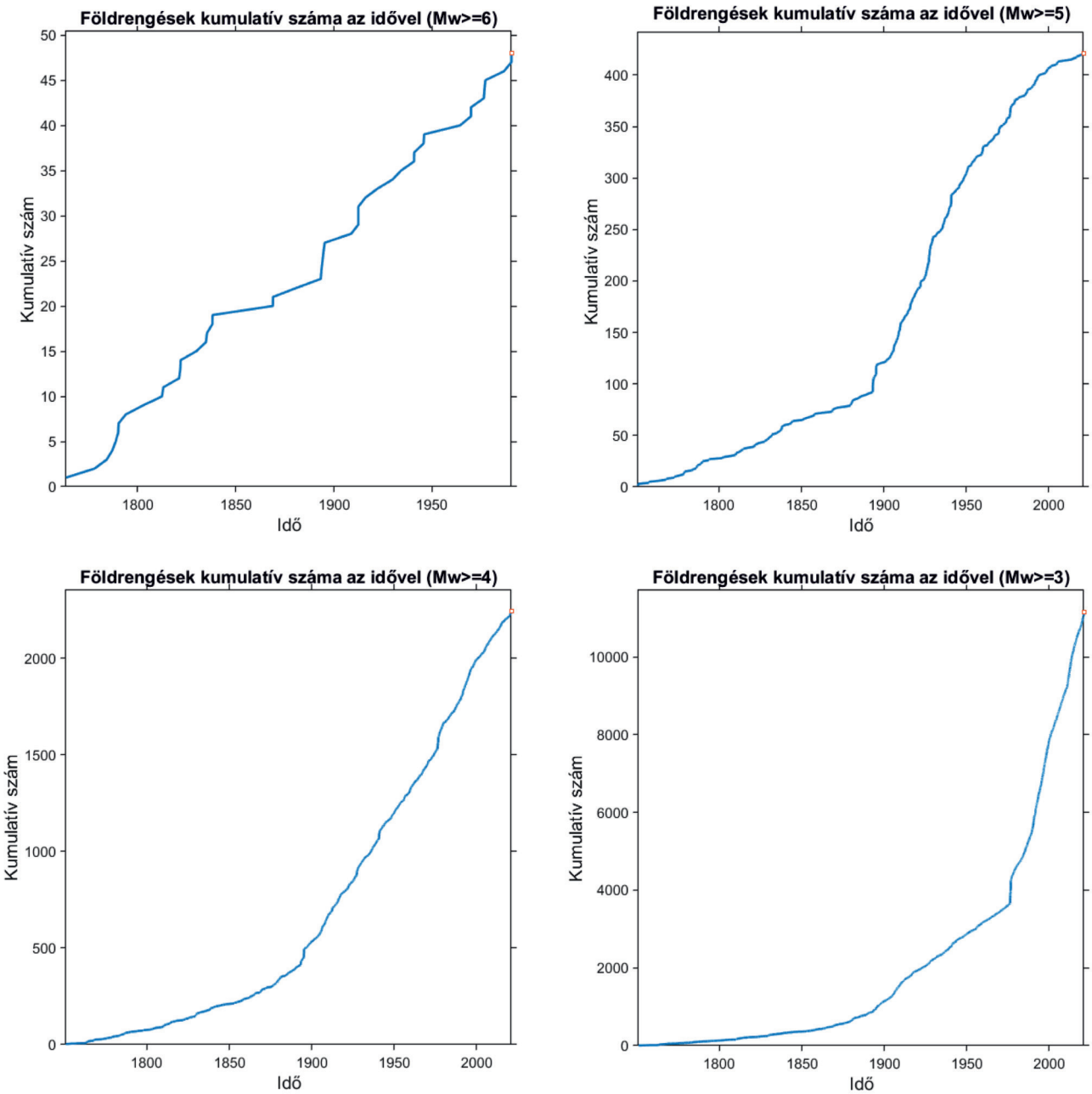
Az általunk számított egyenlet a és b konstansai nagyon hasonlítanak a ZSÍROS (2000) katalógusában található gyakorisági egyenlet együtthatóihoz. Ám közvetlenül a két egyenlet mégsem hasonlítható össze egymással, mivel mi a számításokat a momentummagnitúdók használatával végeztük, míg ZSÍROS egyenletében az ún. „átlag" magnitúdó szerepel.

A fészekmélységek sok historikus rengés esetében egyáltalán nem határozhatók meg, másoknál pedig csak akkor, ha nagyobb számú intenzitásadat áll rendelkezésre, de akkor is csak nagy bizonytalansággal. A jelenlegi műszerek és számítási módszerek már egyre biztosabb mélységeket szolgáltatnak, így a katalógusban található események közel 60%-ának van mélységadata. A mélységeloszlás a teljes régióra a *12. ábrá*n, míg a Bulletin területére a *6. ábrá*n látható. A Kárpát-Pannon régióban kipattanó események mélysége változó, de több jellemző mélységtartomány is felismerhető. Míg a Pannon-medence területén főleg sekély fészkű rengések pattannak ki a kéreg felsőbb részében (5–15 km), addig néhány területen kifejezetten mély fészkű rengések is előfordulnak – a Vrancea-zónában akár 150 km mély események is kipattanhatnak (ISMAEL-ZADEH et al. 2012, ENESCU et al. 2023).

A katalógus vizsgálatához energiafelszabadulás-térképet is készítettünk (*13. ábra*), mely megmutatja a földrengések során felszabaduló, összegzett energia térbeli eloszlását. Az ábrán jól kirajzolódnak azok a területek, amelyek emelkedett szeizmikus aktivitást mutatnak. Azok a régiók, melyek a környezetüknél nagyobb energiafelszabadulással jellemezhetők, tökéletes összhangban vannak azokkal a területekkel, ahol a legnagyobb deformációk mennek végbe (KOROKNAI et al. 2020). Kiemelkedő a Délkeleti-Alpok (SARAŇ et al. 2021) a Dinaridák (CARULLI et al. 1990) és a Bécsi-medencét átszelő Mur–Mürz törési zóna (HAUSMANN et al. 2010), valamint a Vrancea területe is. Hazánkon belül az egyik legkritikusabb kirajzolódó terület a Balaton (MAGYARI et al. 2005, VISNOVITZ et al. 2021) és Komárom (VARGA et al. 2021) között húzódó régió. A Vértes és a Berhida–Mór–Komárom háromszög a legaktívabb, legveszélyeztetettebb rész, ahol az elmúlt 300 évben 4 jelentősebb földrengés is kipattant (TÓTH et al. 1989, STEGENA & SZEIDOVITZ 1991). Ezek mellett a Közép-magyarországi-nyírózónához (KMZ) kapcsolódó aktivitás is megjelenik (CSONTOS & NAGYMAROSY 1998, RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2009).

Következtetések

A projekt végére egységesen átdolgozásra került az 1996 és 2021 közötti időszak Magyarországon és közvetlen környezetében (45,5°–49°É; 16°–23°K) keletkezett, digitálisan regisztrált földrengéseket tartalmazó, hazai digitális katalógus. A projektben alkalmazott metódust bevezettük a hazai obszervatóriumi gyakorlatba, aminek eredményeként lehetővé válik az adatbázis egységes bővítése minden évben az új földrengésadatokkal.



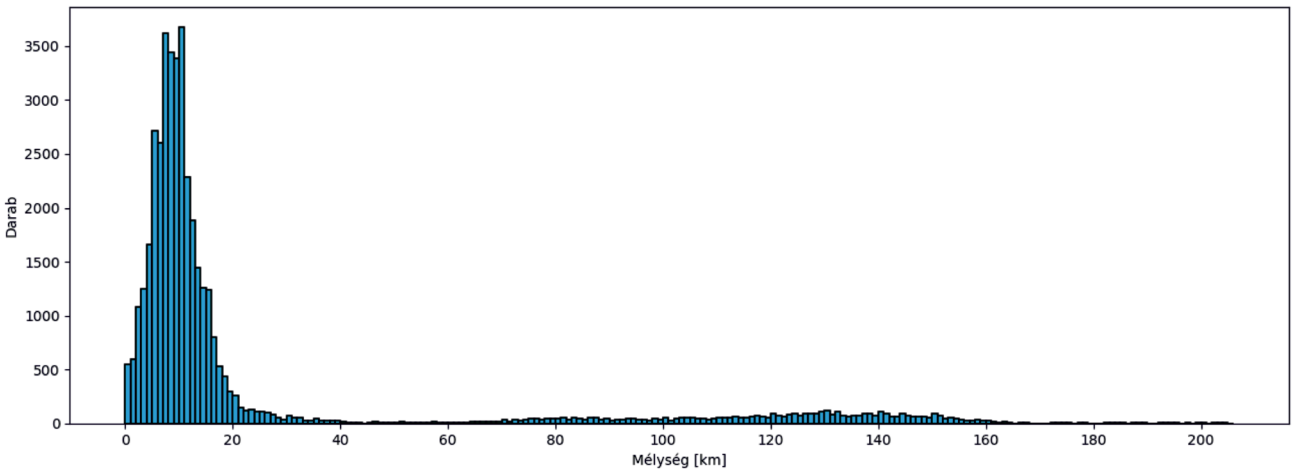
11. ábra. A teljes, kombinált katalógusban található földrengések összegzett, kumulatív száma az idő (évszám) függvényében a) a 6-os b) az 5-ös c) a 4-es és d) a 3-as magnitúdónál nagyobb földrengéseket tekintve

Figure 11. *Summarized cumulative number of earthquakes in the complete catalog over time considering a) events with magnitude 6 and greater, b) events with magnitude 5 and greater, c) events with magnitude 4 and greater, and d) events with magnitude greater than 3*

Mivel az ország területét az országhatáron kívül keletkező nagyobb földrengések is veszélyeztetik, ezért szükség volt a tágabb környezet földrengéseit tartalmazó katalógusra is. Kibővítettük és átdolgoztuk a Kárpát-medence földrengés-katalógusát, ami jelenleg 82 642 eseményt tartalmaz a 44°–50°É szélességi és 13°–28°K hosszúsági körök által határolt területről a 456 és 2020 közötti időszakból. A katalógusban lévő események közelítőleg 90%-ának van magnitúdó- és 60%-ának mélységadata, ami lehetővé teszi a különböző statisztikai vizsgálatok elvégzését.

A kutatás során többféle módszerrel próbáltuk eltávolítani a katalógust szennyező antropogén eseményeket, ezeken belül főként a bányarobbantásokat. Magyarország területén ez nagyrészt sikerült, némi szennyezettség, vagyis földrengésnek vélt robbantás a Zempléni-hegységben és a magyar–szlovák határ közelében maradt, melyeket nem tudtunk egyértelmű szabályok alapján kiszűrni az adatbázisból. A statisztikai vizsgálatok alapján erősebben szennyezett területeket az országhatáron kívül találtunk. Ezeken a területeken a bizonytalanságokat fontos figyelembe vennünk, hogy ne vezessenek téves szeizmotektonikai értelmezéshez az ott látható epicentrumok.

A szeizmológiai állomások számának növekedésével egyre több földrengésről tudunk, és az egyre kisebb magni-



12. ábra. A teljes Kárpát-Pannon régióra jellemző mélységeloszlás

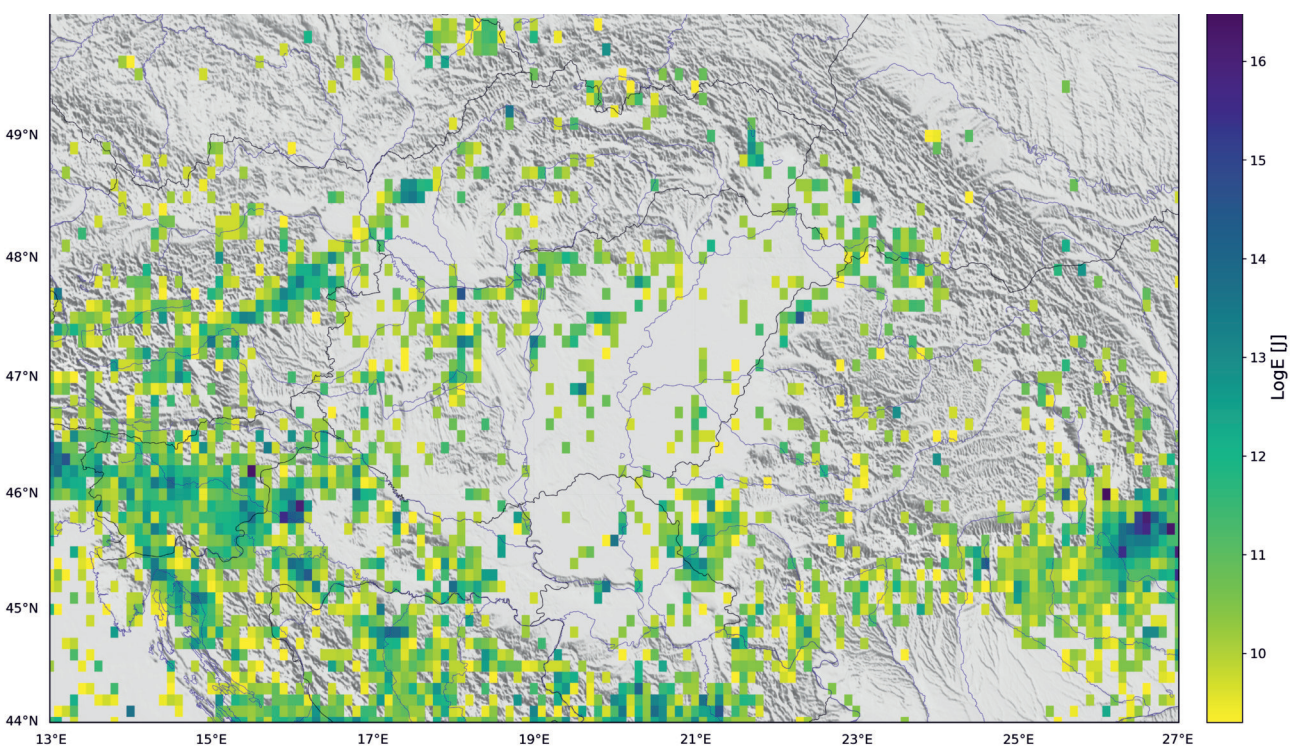
Figure 12. *Depth distribution characteristic of the entire Carpathian-Pannonian region*

túdójú események megfigyelése is lehetségessé vált. Egyes területeken már a nagyon pici, nullához közeli magnitúdójú rengések detektálása is lehetséges, amelyek ugyan nem jelentenek veszélyt, de segítenek az egyes fókuszpontok aktivitásának megítélésében.

Vizsgáltuk a katalógus teljességét a teljes Kárpát-Pannon régióra és a Magyarországot magában foglaló kisebb, Bulletin-területre egyaránt, és meghatároztuk a földrengések előfordulási gyakoriságát leíró Gutenberg–Richter-egyenletet. Az egyenlet alapján a Kárpát-Pannon régióban (44°–50°É; 13°–28°K) 5-ösnél nagyobb magnitúdójú földrengés évente átlagosan 2, míg 6-nál nagyobb 5 évente, 7-nél nagyobb pedig 54 évente fordul elő.

Vizsgáltuk az események fészekmélységeinek eloszlását a Magyarországot magában foglaló szűkebb és teljes régióban. Eszerint a teljes régióban főként a sekély kéregrengések a jellemzők, de az igen aktív Vrancea-zónában nagy számban láthatók közepes fészkű (100–150 km) rengések is.

A projekt keretében új szeizmicitástérképet készítettünk, és számítottuk a földrengések során felszabadult, összegzett energiát. Mindkét térképen jól kirajzolódnak az erősebb szeizmicitású területek. Azok a régiók, melyeknél a



13. ábra. A földrengések során felszabadult, összegzett energia logaritmusa Joule-ban. A számítás az 1750 után kipattant, $M_W \geq 3$ magnitúdójú földrengések felhasználásával történt

Figure 13. *Logarithm of the total released energy due to earthquakes in Joules. The calculation is based on earthquakes with magnitudes $M_w \geq 3$ that occurred after 1750*

nagyobb energiafelszabadulás jellemző, összhangban vannak azokkal a területekkel, ahol a legnagyobb deformációk mennek végbe. Kiemelkedő a Délkeleti-Alpok és Dinaridák, a Bécsi-medencét átszelő Mur–Mürz törési zóna, és a Vrancea területe is. Hazánkon belül az egyik legkritikusabb terület a Balaton és Komárom között húzódó régió. A Vértes-hegység a Berhida–Mór–Komárom háromszög legaktívabb, legveszélyeztetettebb része, ahol az elmúlt 300 évben 4 jelentősebb földrengés is kipattant. Ezek mellett a Középmagyarországi-nyírózónához (KMZ) kapcsolódó aktivitás is megjelenik.

Az új katalógus és az ennek alapján készült szeizmicitástérkép szerves része a projekt során elkészült szeizmotektonikai térképnek, ami alapul szolgál a későbbi elemzéseknek, és megbízhatóbb földrengés-veszélyeztetettség számítást tesz lehetővé.

Ám azt is fontos hangsúlyozni, hogy egy földrengés-katalógus sosem lehet teljesen kész. A régióban folyamatosan keletkeznek földrengések, így a katalógusban is folyamatosan nő a bejegyzések száma. Változnak az adatfeldolgozási módszerek, ami miatt a korábbi paraméterek átdolgozására lehet szükség. Emellett a katalógus teljességének vizsgálata arra is rámutatott, hogy mennyire fontos a múltban keletkezett földrengések vizsgálata.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 „Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése” kutatási projekt keretén belül jött létre. Köszönjük a *Földtani Közlöny* bírálóinak a megjegyzéseket és tanácsokat, melyek emelték a kézirat színvonalát.

Az ábrák és térképek a QGIS (v. 3.10.4, QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org), ZMAP (Wiemer 2001) és Python Matplotlib (Hunter 2007) szoftverek felhasználásával készültek.

Elektronikus melléklet

Győri, Erzsébet, Czecze, Barbara, Timkó, Máté, Bondár, István, Czanik, Csenge, Czifra, Tibor, Fodor, Csilla, Grácczer, Zoltán, Gribovszki, Katalin, Gyarmati, Anett, Kalmár, Dániel, Kiszely, Márta, Kovács, István János, Mónus, Péter, Süle, Bálint, Szanyi, Gyöngyvér, Tóth, László, Varga, Péter, Zsíros, Tibor, Wéber, Zoltán: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020) (M>2). https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA

Irodalom – References

Békési, E., Süle, B., Lenkey, L., Lenkey-Bőgér, Á. & Bondár, I. 2017: Double-difference relocation of the 29 January 2011 ML 4.5 Oroszlány earthquake and its aftershocks and its relevance to the rheology of the lithosphere and geothermal prospectivity. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **52**, 229–242 https://doi.org/10.1007/s40328-017-0195-7

Bondár, I. & Storchak, D. 2011: Improved location procedures at the International Seismological Centre. – *Geophysical Journal International* **186**, 1220–1244. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x

Bondár, I. & McLaughlin, K. 2009a: A new ground truth data set for seismic studies. *Seismological Research Letters* **80/3,** 465–472. https://doi.org/10.1785/gssrl.80.3.465

Bondár, I. & McLaughlin, K. 2009b: Seismic location bias and uncertainty in the presence of correlated and non-Gaussian travel-time errors. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **99/1,** 172–193. https://doi.org/10.1785/0120080922

Bondár, I., Mónus, P., Czanik, Cs., Kiszely, M., Grácczer, Z., Wéber, Z. & the AlpArrayWorking Group 2018: Relocation of Seismicity in the Pannonian Basin Using a Global 3D Velocity Model. – *Seismological Research Letters* **89,** 2284–2293. https://doi.org/10.1785/0220180143.

Bondár, I., Myers, S., Engdahl, E. & Bergman, E. 2004: Epicenter accuracy based on seismic network criteria. – *Geophysical Journal International* **156,** 483–496. https://doi.org/10.1111/j.1365- 246X.2004.02070.x.

Carulli, G., Nicolich, R., Rebez, A. & Slejko, D. 1990: Seismotectonics of the Northwest External Dinarides. – *Tectonophysics* **179,** 11–25. https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90353-A.

Czecze, B. & Bondár, I. 2019: Hierarchical cluster analysis and multiple event relocation of seismic event clusters in Hungary between 2000 and 2016. – *Journal of Seismology* **23,** 1313–1326. https://doi.org/10.1007/s10950-019-09868-5

Czecze B., Süle B. & Bondár I. 2018: A 2013. évi Heves megyei földrengéssorozat helymeghatározása többeseményes algoritmussal (Multiple event relocation of the 22 April 2013, ML = 4.8 Tenk (Hungary) earthquake aftershocks). – *Magyar Geofizika* **58,** 162–174.

Csontos, L. & Nagymarosy, A. 1998:. The Mid-Hungarian line: A zone of repeated tectonic inversions. – *Tectonophysics* **297,** 51–71. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00163-2.

Efron, B. 1979: Bootstrap methods: Another look at the jackknife. – *Annals of Statistics* **7/1,** 1–26. https://doi.org/10.1214/aos/1176344552

Enescu, B., Ghita, C., Moldovan, I. & Radulian, M. 2023: Revisiting Vrancea (Romania) Intermediate-Depth Seismicity: Some Statistical Characteristics and Seismic Quiescence Testing. – *Geosciences* **13,** 219. https://doi.org/10.3390/geosciences13070219.

Grácczer, Z., Szanyi, G., Bondár, I., Czanik, Cs., Czifra, T., Győri, E., Hetényi, Gy., Kovács, I., Molinari, Süle, B., Szucs, E., Wesztergom, V., Wéber, Z. & AlpArray Working Group 2018: AlpArray in Hungary: temporary and permanent seismological

networks in the transition zone between the Eastern Alps and the Pannonian basin. – *Acta Geodaetica et Geophysica.* https://doi.org/10.1007/s40328-018-0213-4

GYŐRI, E., CZECZE, B., TIMKÓ, M., BONDÁR, I., CZANIK, Cs., CZIFRA, T., FODOR, Cs., GRÁCZER, Z., GRIBOVSZKI, K., GYARMATI, A., KALMÁR, D., KISZELY, M., KOVÁCS, I. J., MÓNUS, P., SÜLE, B., SZANYI, Gy., TÓTH, L., VARGA, P., ZSÍROS, T. &WÉBER, Z. 2023: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020). Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 297. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA

HAUSMANN, H., HOYER, S., SCHURR, B., BRÜCKL, E., HOUSEMAN, G. & STUART, G. 2010:. New seismic data improve earthquake location in the Vienna Basin area, Austria. – *Austrian Journal of Earth Sciences* **103,** 2–14.

HUNTER, J. D. 2007: Matplotlib: A 2D Graphics Environment. – *Computing in Science & Engineering* **9/3,** 90–95. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTRE 2022: On-line Bulletin, https://doi.org/10.31905/D808B830

ISMAEL-ZADEH, A., MATENCO, L., RADULIAN, M., CLOETINGH, S. & PANZA, G. 2012: Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): Current state-of-the art. – *Tectonophysics* **530,** 50–79. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.016.

KOROKNAI B., KOVÁCS G., WÓRUM G., BÉKÉSI E., GYŐRI E., CZECZE B., WÉBER Z., PORKOLÁB K., BOZSÓ I., SZÁRNYA Cs., SZŰCS E., NÉMETH V., BALÁZS L., SZABÓ G. & TÓTH T. 2023a: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 335–352. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335

KOROKNAI, B., WÓRUM, G., TOTH, T., KOROKNAI, Zs., FEKETE-NÉMETH, V. & KOVÁCS, G. 2020: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. – *Earth-Science Reviews* **211,** 103411. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103411.

KOROKNAI B., WÓRUM G., TÓTH T., KOROKNAI Zs., FEKETE-NÉMETH V. & KOVÁCS G. 2023b: Neotektonikus fázis deformációi Magyarországon. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 313–334. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.313

LEE, W. K. & LAHR, J. C. 1972: HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes (p. 100). – *US Department of the Interior, Geological Survey, National Center for Earthquake Research.*

MAGYARI, Á., MUSITZ, B., CSONTOS, L. & VAN VLIET-LANOË, B. 2005: Quaternary neotectonics of the Somogy Hills, Hungary (part I): Evidence from field observations. – *Tectonophysics* **410/1–4,** 43–62. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.044

MYERS, S., BEGNAUD, M., BALLARD, S., PASYANOS, M., PHILLIPS, W., RAMIREZ, A., ANTOLIK, M., HUTCHENSON, K., DWYER, J., ROWE, C. & WAGNER, G. S. 2010: A crust and upper-mantle model for Eurasia and North Africa for Pn travel-time calculation. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **100,** 640–656. https://doi.org/10.1785/0120090198

POPA, M., CHIRCEA, A., DINESCU R., NEAGOE, C., GRECU, B. & BORLEANU, F. 2022: Romanian Earthquake Catalogue (ROMPLUS), Mendeley Data, V2. https://doi.org/10.17632/tdfb4fgghy.2

RUSZKICZAY, Zs., FODOR, L. I., HORVÁTH, E. & TELBISZ, T. 2009: Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: a DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. – *Geomorphology* **104,** 203–217. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014

SARAŇ, A., SUGAN, M., BRESSAN, G., RENNER, G. & RESTIVO, A. 2021: A focal mechanism catalogue of earthquakes that occurred in the southeastern Alps and surrounding areas from 1928–2019. – *Earth System Science Data* **13,** 2245. https://doi.org/10.5194/essd-13-2245-2021.

SCHLÖMER, A., WASSERMANN, J., FRIEDERICH, W., KORN, M., MEIER, T., RÜMPKER, G. & RITTER, J. 2022: UNIBRA/DSEBRA: The German Seismological Broadband Array and Its Contribution to AlpArray—Deployment and Performance. – *Seismological Society of America* **93/4,** 2077–2095. https://doi.org/10.1785/0220210287

STEGENA, L. & SZEIDOVITZ, Gy. 1991: The 14 January 1810 earthquake in Mór, Hungary: the first isoseismal map. – *Tectonophysics* **193,** 109–115. https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90192-U.

STORCHAK, D. A., HARRIS, J., BROWN, L., LIESER, K., SHUMBA, B., VERNEY, R., DI GIACOMO, D. & KORGER, E. M. 2017: Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC), part 1: 1964–1979. – *Geoscience Letters* **4,** 32. https://doi.org/10.1186/s40562-017-0098-z

STORCHAK, D. A., HARRIS, J., BROWN, L., LIESER, K., SHUMBA, B. & DI GIACOMO, D. 2020: Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC)—part 2: 1980–2010. – *Geoscience Letters* **7,** 18. https://doi.org/10.1186/s40562-020-00164-6

SÜLE, B. & WÉBER, Z. 2013: Earthquake source parameters and scaling relationships in Hungary (central Pannonian basin). – *Journal of seismology* **17/2,** 507–521.

SÜLE B., BONDÁR I., CZANIK Cs., GRÁCZER Z., GYŐRI E., SZANYI Gy., WÉBER Z. & KOVÁCS J. 2020: Így figyeljük hazánk földjének minden rezdülését. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium fejlődése és küldetése 2013-tól napjainkig. – *Magyar Tudomány* **181,** 1202–1215.

TÓTH, L., MÓNUS, P. & ZSÍROS, T. 1989: The Berhida (Hungary) earthquake of 1985. – *Gerlands Beiträge* zur *Geophysik* **98,** 312–321.

TÓTH, L., MÓNUS, P. & ZSÍROS, T. 1996: Hungarian Earthquake Bulletin – 1995. – Budapest, GeoRisk Kft.

TÓTH L., MÓNUS P., ZSÍROS T. & KISZELY M. 2002: A Pannon-medence szeizmicitása. – *Földtani Közlöny* **132,** 327–337.

TÓTH, L., MÓNUS, P., ZSÍROS, T., KISZELY, M. & CZIFRA, T. 2012: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2011. – Budapest, GeoRisk Kft.

TÓTH, L., MÓNUS, P., ZSÍROS, T., KISZELI, M. & CZIFRA, T. 2013: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2012. Budapest: *GeoRisk Kft.*

TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELI, M. & TÓTH, L. 2014: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2013. – Budapest, GeoRisk Kft.

Tóth, L., Mónus, P., Kiszely, M. & Tóth, L. 2015: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2014. – Budapest, GeoRisk Kft.

Tóth, L., Mónus, P., Kiszeli, M. & Tóth, L. 2016: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2015. – Budapest, GeoRisk Kft. http://doi.org/10.7914/SN/HM

Tóth, L., Mónus, P., Kiszeli, M. & Tóth, L. 2017: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2016. – Budapest, GeoRisk Kft. http://doi.org/10.7914/SN/HM

Tóth, L., Mónus, P., Kiszeli, M., Trosits, D. & Tóth, L. 2018: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2017. – Budapest, GeoRisk Kft. http://doi.org/10.7914/SN/HM

Tóth, L., Mónus, P., Kiszely, M., Trosits, D. & Tóth, L. 2019: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2018. – Budapest, GeoRisk Kft.

Tóth, L., Mónus, P., Kiszely, M., Trosits, D. & Tóth, L. 2020: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2019. – Budapest, GeoRisk Kft.

Tóth, L., Mónus, P., Kiszely, M., Trosits, D. & Tóth, L. 2021: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2020. – Budapest, GeoRisk Kft..

Varga, P., Győri, E. & Timár, G. 2021: The Most Devastating Earthquake in the Pannonian Basin: 28 June 1763 Komárom. *Seismological Research Letters* **92**, 1168–1180. https://doi.org/10.1785/0220200411.

Visnovitz, F., Jakab, B., Czecze, B., Hámori, Z., Székely, B., Fodor, L. & Horváth, F. 2021: High resolution architecture of neotectonic fault zones and post-8-Ma deformations in western Hungary: Observations and neotectonic characteristics of the fault zone at the Eastern Lake Balaton. – *Global and Planetary Change* **203,** 103540. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103540.

Waldhauser, F. & Ellsworth, W. 2000: A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **90,** 1353–1368.

Wéber, Z., Czecze, B., Süle, B. & Bondár, I. 2020: Source analysis of the March 7, 2019 M-L=4.0 Somogyszob, Hungary earthquake sequence. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **55**/3, 371–387. https://doi.org/10.1007/s40328-020-00311-7

Wéber Z., Koroknai B. & Szárnya Cs. (szerk.) 2023: Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése. Zárótanulmány. – Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron–Budapest, 174 p.

Wiemer, S. 2001: A software package to analyze seismicity: ZMAP. – *Seismological Research Letters* **72/3,** 373–382. https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373

Zsíros T. 2000: *A Kárpát-medence szeizmicitása és földrengés veszélyessége: Magyar földrengés katalógus (456–1995).* – MTA Földtudományi Kutatóközpont GGKI, Budapest, 495 p.

Zsíros T. 2014: *Földrengések a Kárpát-medence térségében; Magyar földrengés katalógus (456–2010).* – Budapest, számítógépes állomány

Zsíros, T., Mónus, P. & Tóth, L. 1988: *Hungarian Earthquake Catalog (456–1986).* – Budapest, 182 p.

Kézirat leadva: 2023. 08. 10.

Függelék

A momentummagnitúdók becslése

A szakirodalomban számos különböző területekre felállított és publikált összefüggés létezik a különböző magnitúdótípusok közötti korrelációk leírására és azok alkalmazási módjára. A momentummagnitúdóra való áttérés vagy egy, vagy két egymás utáni lépésben történik. Például ZSÍROS a 2014-es katalógus előállítása során sekély rengéseknél először a lokális magnitúdóra végezte az átszámítást, majd ezután tért át momentummagnitúdóra. A rendelkezésre álló momentummagnitúdók viszonylag nagyobb száma lehetővé tette a különböző típusú magnitúdók közötti összefüggések közvetlen számítását, így a hibaterjedés csökkentését.

A Kárpát-medencében jellemzően sekély fészkű földrengések fordulnak elő, kivétel ez alól a romániai Vrancea-zóna, ahol közepes és mély fészkű rengések is gyakran keletkeznek. Ezért azt külön kezeltük, és a zóna 65 km-nél mélyebb fészkű földrengéseire külön korrelációs összefüggéseket határoztunk meg. Az adatbázis alapján előállított korrelációs összefüggéseket az *I. táblázat* mutatja.

I. táblázat. Az adatbázis alapján felállított korrelációs összefüggések a momentummagnitúdó meghatározására

Table I. *Correlations established based on the database for determining momentum magnitude*

Sorszám	Egyenlet	Korrelációs együttható (R)	Magnitúdótartomány
a teljes terület 65 km-nél sekélyebb rengései			
1.	$M_w = 0.847M_L + 0.668$	0.94	$0.8 \leq M_L \leq 6.5$
2.	$M_w = 0.670M_S + 1.940$	0.96	$2.3 \leq M_S \leq 6.6$
3.	$M_w = 0.897m_b + 0.564$	0.90	$2.0 \leq m_b \leq 6.0$
4.	$M_w = 0.745M_D + 1.096$	0.82	$2.5 \leq M_D \leq 6.5$
5.	$M_w = 0.709I_0 + 0.097$	0.92	$III \leq I_0 \leq IX - X$
a Vrancea-zóna 65 km-nél mélyebb rengései			
6.	$M_w = 0.913M_L + 0.428$	0.83	$3.3 \leq M_L \leq 6.5$
7.	$M_w = 0.607M_S + 2.668$	0.90	$2.5 \leq M_S \leq 7.3$
8.	$M_w = 0.956m_b + 0.252$	0.94	$3.5 \leq m_b \leq 6.3$
9.	$M_w = 0.799M_D + 0.829$	0.83	$3.2 \leq M_D \leq 6.5$
10.	$M_w = 0.665I_0 + 1.508$	0.96	$V \leq I_0 \leq X$

A momentummagnitúdóra való áttéréshez az adatbázisban szereplő rengések alapján meghatározott, az *I. táblázat*ban megadott egyenleteket alkalmaztuk. A korrelációs összefüggések meghatározásánál a fészekmélységet – annak viszonylag nagy hibája miatt – nem vettük figyelembe. Sekély fészkű rengéseknél az egyenletek alkalmazása a következő prioritással történt: ahol volt lokális magnitúdó, ott azt alkalmaztuk, ennek hiányában a sorrend M_S, m_b, M_D, I_0 volt. A Vrancea-zóna mély fészkű rengéseinél elsőként a térhullám-magnitúdót (m_b) használtuk, ennek hiányában a prioritási sorrend M_L, M_S, M_D, I_0 volt. A történeti rengések momentummagnitúdójának becslése hordozza a legnagyobb bizonytalanságot, ám figyelembevételük elengedhetetlen a veszélyeztetettségi számításoknál. A momentummagnitúdók előzetes becsléséhez a maximális intenzitások ismeretéből indultunk ki. Azonban ahol rendelkezésre állt az adott rengéshez intenzitáseloszlás, a szakirodalomban megjelent, különböző optimalizációs eljárással becsült momentummagnitúdókat tekintettük elsődlegesnek. A történeti rengések kutatása a KRSZO-ban jelenleg is folyik, így az ezekhez tartozó magnitúdók a következőkben is módosulhatnak. A katalógus alapjául szolgáló adatbázisban a momentummagnitúdók eredete, előállításának módja követhető, így a további kutatási eredmények, új ismeretek a jövőben beépíthetők.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 297., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA

Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020) (M>2)

GYŐRI, Erzsébet[1], CZECZE, Barbara[1,2], TIMKÓ, Máté[1], BONDÁR, István[3], CZANIK, Csenge[1], CZIFRA, Tibor[1], FODOR, Csilla[1], GRÁCZER, Zoltán, GRIBOVSZKI, Katalin[1], GYARMATI, Anett[1], KALMÁR, Dániel[1], KISZELY, Márta[1], KOVÁCS, István János[1], MÓNUS, Péter[4], SÜLE, Bálint[1], SZANYI, Gyöngyvér, TÓTH, László[4], VARGA, Péter[1], ZSÍROS, Tibor, WÉBER, Zoltán[1]

[1]Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
[2]ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
[3]Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet
[4]GeoRisk Kft.

A Cirkum-Pannon-régió szeizmicitása (456–2020) (M>2)

Összefoglalás

A Cirkum-Pannon-régió szeizmicitásának térképe (456–2020) (M>2) a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, a 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt keretében készült el 1:1 500 000 léptékben. Az új szeizmicitástérkép összefoglalja a 2-es magnitúdónál nagyobb historikus és modern műszeresen regisztrált földrengések hipocentrumait Magyarországon és tágabb környezetében. Az új térkép kombinálja az elérhető történelmi katalógusokat 456-tól, az átdolgozott hazai hipocentrumokat, valamint a nemzetközi adatbázisok modern műszeres eredményeit, ezzel teljesebb képet adva a Cirkum-Pannon-régió szeizmicitásáról.

Kulcsszavak: szeizmicitás, Cirkum-Pannon-régió, térkép

Abstract

The seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020) (M>2) was prepared within the framework of the research project supported by the National Research, Development and Innovation Office under project number 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 at a scale of 1:1 500 000. The new seismicity map summarizes the hypocenters of historical and modern instrumentally recorded earthquakes with a magnitude larger than 2 in Hungary and its surrounding areas. The new map combines the available historical catalogs, revised Hungarian hypocenters, and the modern instrumental results from international databases, providing a more comprehensive picture of seismicity in the Circum-Pannonian region.

Keywords: seismicity, Circum-Pannonian region, map

Creating and analysing the seismotectonic model of Hungary.

SEISMICITY IN THE CIRCUM-PANNONIAN REGION (456-2020)(M>2)

1:1 500 000

GEOMEGA

SEISNKP

NATIONAL RESEARCH, DEVELOPMENT AND INNOVATION OFFICE HUNGARY

PROJECT FINANCED FROM THE NRDI FUND

Project: 2018-1.2.1-NKP-2018-00007

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA

Reference:

Győri, E., Czecze, B., Timkó M., Bondár, I., Czanik, Cs., Czifra, T., Fodor, Cs., Gráczer, Z., Gribovszki, K., Gyarmati, A., Kalmár, D., Kiszely, M., Kovács, I.J., Mónus, P., Süle, B., Szanyi, Gy., Tóth, L., Varga, P., Zsíros, T., Wéber, Z., 2022. Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456-2020). Földtani Közlöny 153/4, 297.

For explanation of the map see:

Czecze B., Győri E., Timkó M., Kiszely M., Süle B., Wéber Z. 2023: A Kárpát-Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földrengés-adatbázis. Földtani Közlöny 153/4, 279–296.

0 25 50 75 100 km

Map projection: WGS 84 / Pseudo-Mercator, EPSG: 3857
Cultural data source: OpenStreetMap contributors
Map compiled by
HUN-REN Institute of Earth Physics and Space Science

Magnitude

7
6
5
4
3
2

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 299–308., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.299

Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében: új adatrendszerek és térképek bemutatása

Porkoláb Kristóf[1], Békési Eszter[1], Broerse, Taco[2], Kenyeres Ambrus[3], Wéber Zoltán[1]

[1]HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (HUN-REN FI), Sopron
[2]Department of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, Hollandia
[3]Lechner Non-Profit Kft. – Kozmikus Geodéziai Obszervatórium, Budapest, Magyarország

Regional stress field and strain rate field in the Pannonian region: recent datasets and maps

Abstract

The interpretation of active deformation processes in the Pannonian region remains a challenge. Its refinement and quantification is a key for seismic hazard assessment and for the geodynamic understanding of the region. This study summarizes recent (crustal) stress and GNSS-based strain rate results and their implications for active deformation processes. In addition to the in-text figures, the results are presented in two map supplements with individual digital identifiers at a scale of 1:1 500 000. The stress and strain rate results show that the active tectonics in the Pannonian Basin is determined by the transpressional stress field and associated shortening and transpressional deformation. The direction and ratio of principal stress axes show good agreement with those of the principal strain rate axes in most of the study area, suggesting that the upper crustal stress field and surface deformation are closely linked. Besides the northward motion of the Adria Microplate, we identify the slower but consistent SW-directed motion of the Eastern and Southern Carpathian areas as an important boundary condition for the stress field and deformation of the Pannonian region. The results largely agree with but also complement and refine previous stress and ground motion datasets and may be used as input parameters or references for geodynamic and structural models and analyses, seismotectonic models, earthquake hazard assessments, and geo-energy projects.

Keywords: stress field, strain rate field, Pannonian Basin, seismotectonics, active tectonics

Összefoglalás

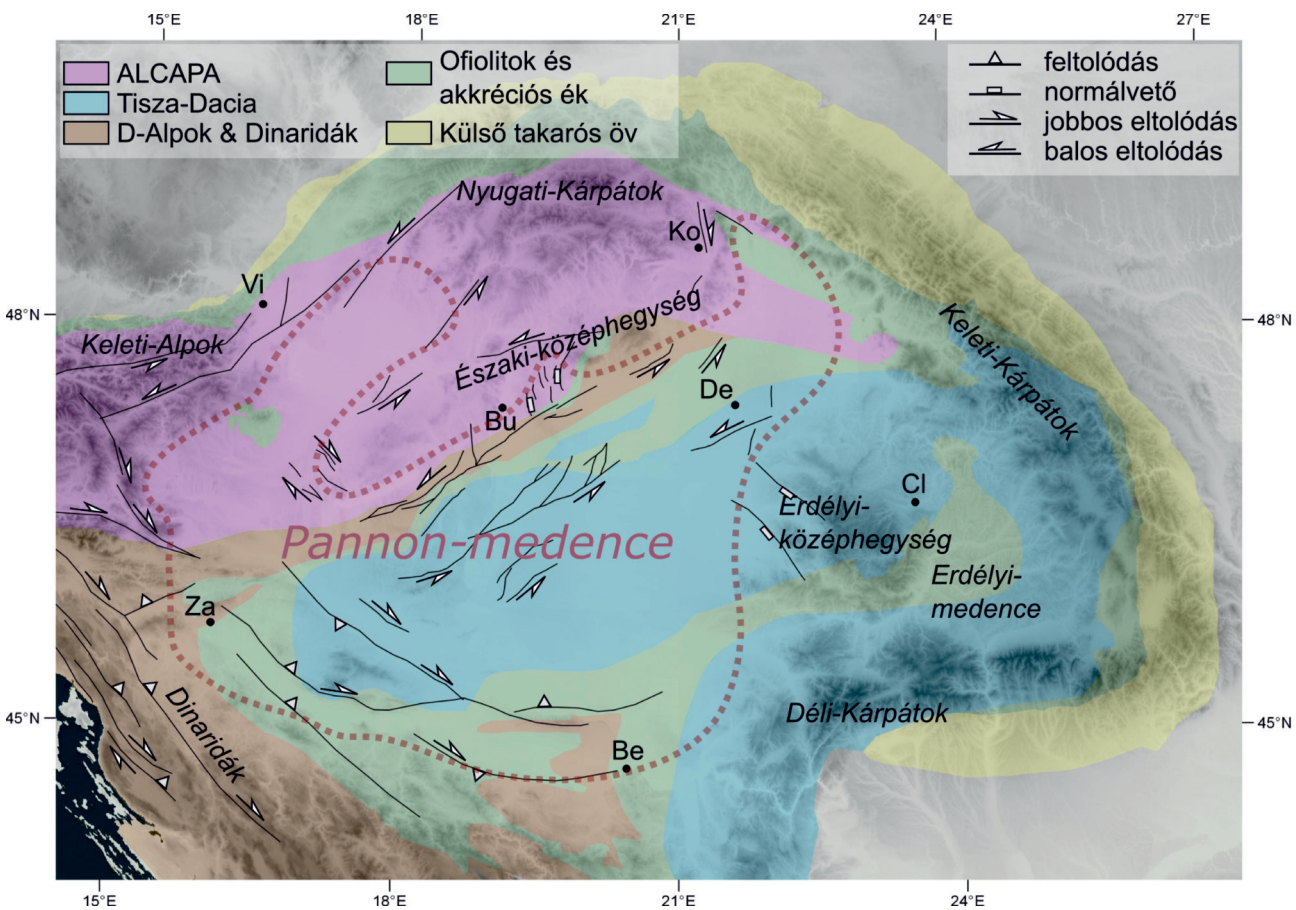
A Pannon-térségben továbbra is kihívást jelent az aktív deformációs folyamatok értelmezése. Ennek pontosítása és mennyiségi leírása kulcsfontosságú a szeizmotektonikai veszélyeztetettség és a geodinamikai értelmezés tekintetében. Ez a tanulmány összefoglalja a legújabb (kéreg) feszültség és GNSS-alapú alakváltozási sebesség eredményeit, valamint ezek vonatkozásait az aktív deformációs folyamatokra. A szövegben található ábrákon kívül az eredményeket két önálló digitális azonosítóval rendelkező térképmellékletben is bemutatjuk 1:1 500 000 méretarányban. A feszültség és deformációs ráta eredményei azt mutatják, hogy a Pannon-térségben a transzpressziós feszültségmező és ehhez kapcsolódóan a rövidüléses és a transzpressziós deformáció határozzák meg az aktív tektonikát. A főfeszültség tengelyek iránya és aránya a terület nagy részén jó egyezést mutat a deformációs ráta főtengelyek irányával és arányával, ami arra utal, hogy a felsőkéreg feszültségek és a felszíndeformáció szoros kapcsolatban állnak. Az Adria-mikrolemez észak felé irányuló mozgása mellett a Keleti- és Déli-Kárpátok területének lassabb, de konzisztens délnyugati irányú mozgását a Pannon-térség feszültségmezőjének és deformációjának fontos peremfeltételeként azonosítjuk. Az eredmények általában jó egyezést mutatnak és nagyban kiegészítik, pontosítják az előző feszültség- és felszíndeformációs adatbázisokat, valamint bemenő paraméterként vagy referenciaként szolgálhatnak geodinamikai és szerkezeti modellekhez és elemzésekhez, szeizmotektonikai modellekhez, földrengés-veszélyeztetettségi becslésekhez és geo-energetikai projektekhez is.

Kulcsszavak: feszültségmező, deformációs ráta, Pannon-medence, szeizmotektonika, aktív tektonika

Bevezetés

A Pannon-medence térségének neotektonikus (elmúlt 6–8 millió év) és jelenleg aktív deformációját az inverzió (pozitív inverzió, vagyis extenziót követő rövidülés) jellemzi (BADA et al. 2007a, FODOR et al. 2005, HORVÁTH & CLOETINGH 1996, KOROKNAI et al. 2020). Az inverziót az Adria-mikrolemez Eurázsiához viszonyított északias mozgása (az óramutató járásával ellentétes forgása), valamint a Pannon-medence kelet felé beszorított helyzete által kialakított transzpressziós feszültségmező okozza (BADA et al. 2007b, HORVÁTH 1993, VRABEC & FODOR 2006). A jelenleg is zajló rövidülést jelzi az ÉK-i irányú tektonikus mozgások egyre csökkenő sebessége a medence belseje felé (GRENERCZY et al. 2005). Ez a kontrakció szerkezeti szempontból a már meglévő normálvetők reverz és ferde reaktiválásában, az ezzel kapcsolatos redőkben és eltolódásos törészónák kialakulásában tükröződik (*1. ábra*; FODOR et al. 2005; KOROKNAI et al. 2020). Ez a „geodinamikai keret" az ezredforduló környékén készült úttörő tanulmányokon alapul, amelyek napjainkig meghatározzák a Pannon-medence fiatal tektonikájának értelmezését. A Pannon-medencében azonban továbbra is kihívást jelent az aktív deformációs folyamatok számszerűsítése és értelmezése, amelyhez elengedhetetlen a sűrűbb és megbízhatóbb adatrendszerek előállítása és használata, különös tekintettel a (kéreg)feszültségadatokra (BADA et al. 2007a) és (űr)geodéziai felszínmozgásadatokra (GRENERCZY et al. 2005).

Az elmúlt közel két évtized során olyan új adatrendszerek gyűltek össze, amelyek lehetőséget nyújtanak a Pannon-térség eddig ismert geodinamikai, tektonikai képének finomítására, mennyiségi leírására és a különböző adatrendszerek korrelációjára. Jelen munkában a közelmúltban megjelent feszültség és a GNSS („Global Navigation Satellite System") alapú elmozdulásadatokra fókuszálunk (BÉKÉSI et al. 2023b, PORKOLÁB et al. 2023a), amelyek alapján bemutatjuk a Pannon-térség új regionális feszültségmező (BÉKÉSI et al. 2023a, http://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB) és deformációs sebesség (PORKOLÁB et al. 2023b, https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC) térképeit. A térképek a hivatkozott DOI-k segítségével érhetőek el minden érdeklődő és potenciális felhasználó számára. A kutatómunka elsődleges célja – az általános geodinamikai ismeretek bővítése mellett – a szeizmotektonikai veszélyeztetettség becslésének elősegítése volt, hiszen a feszültség- és deformációadatok kritikus jelentőségűek ebben a tekintetben. A kutatás ezen szeizmotektonikai jelentőségét KOROKNAI et al. (2023) mutatja be.



1. ábra. A Pannon-medence tektonikai környezete a fő aljzati földtani egységekkel és a neotektonikus fázis során aktív szerkezetekkel (PORKOLÁB et al. 2023b után módosítva; vetőminta BADA et al. 2007a; KOROKNAI et al. 2020 alapján). A pontozott körvonal a Pannon-medencét jelöli

Figure 1. *Tectonic units and neotectonically active faults of the Pannonian region (after PORKOLÁB et al. 2023b; fault pattern based on BADA et al. 2007a; KOROKNAI et al. 2020). Dotted line denotes the Pannonian Basin*

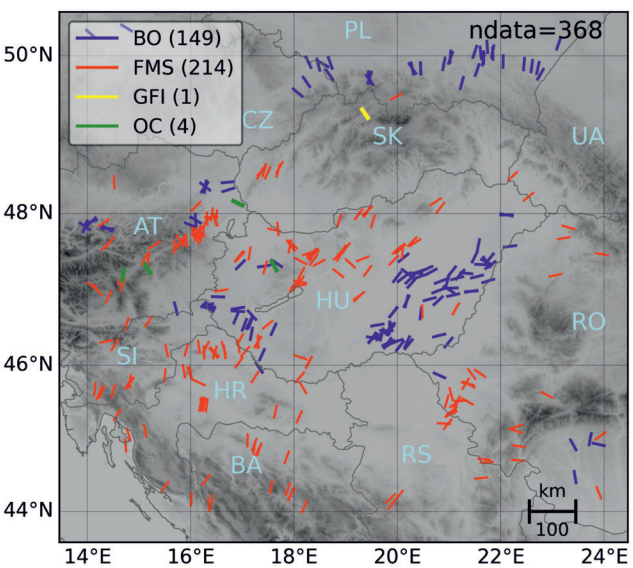
Adatok és módszertan

Feszültségadatok és interpoláció

A feszültség-adatbázis magját a Pannon-térség földrengés-fészekmechanizmus megoldásai adják (összesen 214 darab). A fészekmechanizmus-adatbázis új megoldásokból (részletekért lásd Békési et al. 2023b), korábban publikált adatok (Wéber 2016a, b; Wéber & Süle 2014; Wéber et al. 2020) frissített megoldásaiból (az MCMT- és JOWAPO-algoritmusok továbbfejlesztett változataival, lásd Wéber 2009, 2018), a szomszédos országok adataiból, a nemzetközi szervezetek (U.S. Geological Survey, USGS, National Earthquake Information Center, NEIC, a Deutsche GeoForschungsZentrum, GFZ, az Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV és a National Institute for Earth Physics, NIEP) adataiból, a Pannon-térség korábban összeállított adatbázisából (Bada et al. 2007a), valamint a World Stress Map (WSM) projekt 2016-os adatbázisából (Heidbach et al. 2016) származnak. A fészekmechanizmus-megoldások mellett fúrólyukfal-kirepedéseket (149 indikátor), ráfúrásos méréseket (3 indikátor) és geológiai indikátort (1 indikátor) is beépítettünk az új adatbázisba. Az adatbázisból meghatároztuk a maximális horizontális főfeszültség (S_{Hmax}) irányok térbeli eloszlását (az adatbázis részletes leírását lásd Békési et al. 2023b).

A feszültségindikátorok eloszlása a területen nem homogén (*2. ábra*). Ezért a feszültségmező regionális léptékű értelmezéséhez szükséges volt az S_{Hmax} irányok interpolációjára. Az interpolációhoz Carafa & Barba (2013) módszerét használtuk a SHINE szoftver alkalmazásával (Carafa et al. 2015). A SHINE program klaszter (hasonló S_{Hmax} irányokat mutató halmaz) alapú interpolációt alkalmaz, egy adott keresési sugáron belüli S_{Hmax} indikátorokat veszi figyelembe az interpolációhoz a területre eső pontokban. Sok esetben egy adott területen több, azonos irányú, egymáshoz nagyon közel eső indikátor található, ezért a helyi források túlsúlyozásának elkerülése végett fontos a klaszterek kijelölése. A keresési sugáron belül tehát klaszterek kerülnek meghatározásra, majd minden egyes klaszter egy-egy S_{Hmax} értéket kap. A klaszterek S_{Hmax} orientációit a klaszterek földrajzi középpontjához rendeljük. Az S_{Hmax} irányokat ezután interpoláljuk egy adott helyre (rácspontra).

Az S_{Hmax} értékeket a 14°K–23,9°K és 44°É–50,2°É területre interpoláltuk egy szabályos, 0,25°-os felbontású rácshálóra. Az interpolációs eljárás során több paraméterkombinációt teszteltünk a SHINE javasolt tartományain belül (Carafa et al. 2015). Végső paraméterkombinációként 96 km-es keresési sugarat, 3 minimális klaszterszámot és 50°-os maximálisan elfogadható 90%-os megbízhatósági határt választottunk. A viszonylag kis keresési sugár biztosította, hogy a regionális orientációk mellett a helyi feszültséganomáliák is tükröződjenek az interpolált feszültségmezőn (Békési et al. 2023a). A paraméterkombináció lehetővé tette az S_{Hmax} irányok interpolációját a vizsgált terület nagy részén (Békési et al. 2023a) viszonylag alacsony bizonytalansággal (többnyire 10°–30° között). A feszültségirányok nagy léptékű áttekintése és neotektonikai képbe helyezése érdekében az interpolált S_{Hmax} mező alapján feszültség trajektóriákat is számoltunk (*3. ábra*).



2. ábra. Maximális horizontális főfeszültség (S_{Hmax}) irányok a Kárpát-Pannon régióban (Békési et al. 2023b)

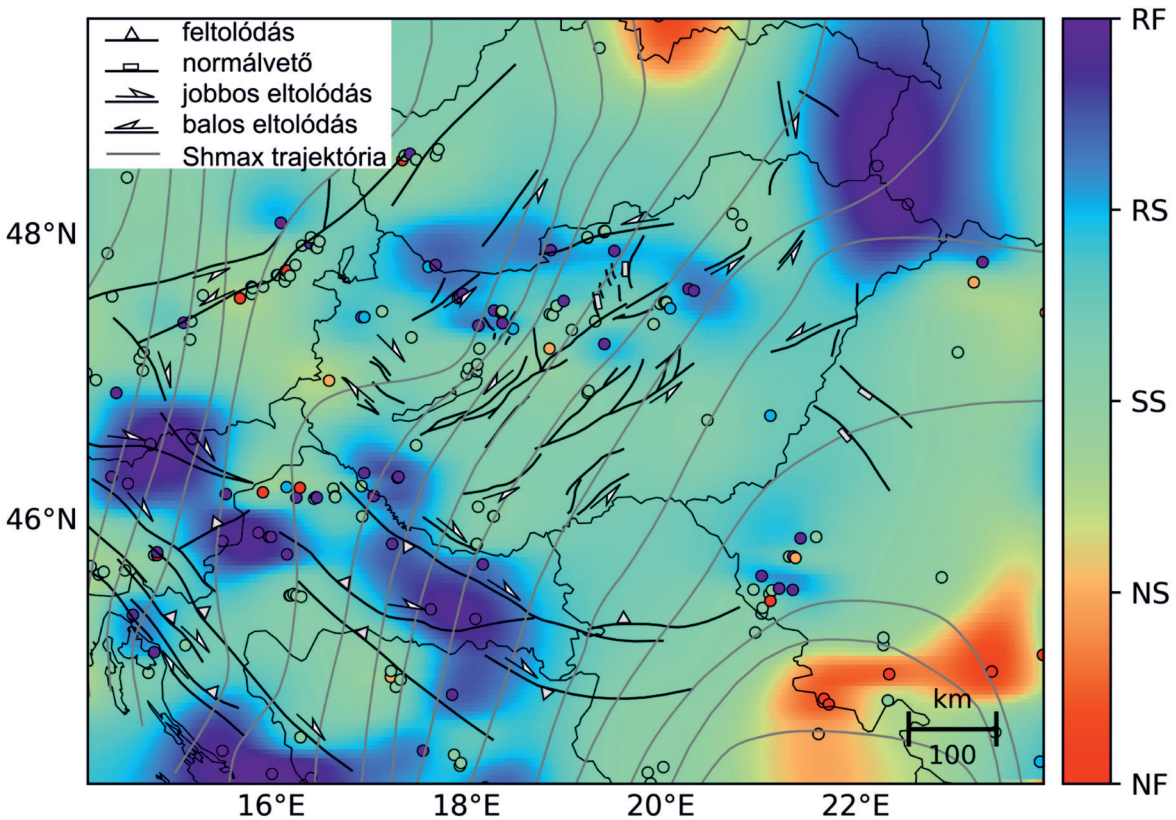
kék = fúrólyukfal-deformáció (BO), piros = fészekmechanizmus-megoldás (FMS), sárga = geológiai indikátor (GFI), zöld = ráfúrásos mérés (OC). Országkódok: AT – Ausztria, BA – Bosznia-Hercegovina, HR – Horvátország, CZ – Csehország, HU – Magyarország, PL – Lengyelország, RO – Románia, RS – Szerbia, SK – Szlovákia, SI – Szlovénia, UA – Ukrajna

Figure 2. *Maximum horizontal stress directions in the Circum-Pannonian region. Coloured lines indicate various S_{Hmax} observations*

blue = borehole breakout analysis (BO), red = focal mechanism solution (FMS), yellow = geologic fault-slip data (GFI), green = overcoring measurement (OC). Country abbreviations: AT – Austria, BA – Bosnia and Herzegovina, HR – Croatia, CZ – Czech Republic, HU – Hungary, PL – Poland, RO – Romania, RS – Serbia, SK – Slovakia, SI – Slovenia, UA – Ukraine

GNSS adatok és interpoláció

A tektonikus mozgásokról a folyamatosan működő referenciaállomás-hálózatok (CORS) szolgáltatnak mennyiségi adatokat. Európában az EUREF Permanens Állomáshálózat (EPN) sűrítésére irányuló projekt (EPND) célja az összes nemzeti CORS-hálózat integrálása (Kenyeres et al. 2019) és sűrű, jó minőségű állomássebesség-információk szolgáltatása. A GNSS-adatokat a nemzeti elemzőközpontok (AC) rutinszerűen, szabványosított feldolgozási irányelvek szerint dolgozzák fel, és az eredményeket a szabványos SINEX (*Software Independent Exchange*) formátumban szállítják. Az egyes AC-kből érkező napi/heti pozíciómegoldásokat összevetik, tisztítják, majd a heti SINEX-szinten egyesítik, és egyedi megoldási sorozatot hoznak létre. Ezt követően egy nagy kiegyenlítési folyamatot indítanak el, amely magában foglalja az összes egyesített SINEX-fájlt, és többéves pozíció- és sebességmegoldást ad. Az EPND-termékek a Bernese és a GAMIT feldolgozáson alapuló AC-termék összetétele. Minden kombinációs folyamat a CATREF szoftverrel történik (Altamimi et al. 2007). A GNSS-adatok feldolgozásával kapcsolatos további információkért az olvasót a Kenyeres et al. (2019) és Porkoláb et al. (2023a) tanulmányhoz referáljuk.



3. ábra. Feszültségmező a Kárpát–Pannon régióban (BÉKÉSI et al. 2023b) A háttér és a színezett körök (adatok) a tektonikai stílusokat mutatják (NF = extenziós/normálvetős, NS = transztenziós, SS = oldaleltolódásos, RS = transzpressziós, RF = feltolódásos). Az interpolált S_{Hmax} orientációkból számított feszültségtrajektóriákat szürke vonalak, a neotektonikusan aktív szerkezeteket fekete vonalak mutatják (vetőminta BADA et al. 2007b; KOROKNAI et al. 2020 alapján)

Figure 3. *Stress field in the Carpathian–Pannonian region (BÉKÉSI et al. 2023b). The background and the coloured circles (data) show the tectonic style (NF = extensional/normal faulting, NS = transtensional, SS = strike-slip, RS = transpressional, RF = reverse faulting). Stress trajectories calculated from interpolated S_{Hmax} orientations are shown by grey lines, neotectonically active structures by black lines (fault pattern based on BADA et al. 2007a; KOROKNAI et al. 2020)*

A folytonos alakváltozási sebességmező becsléséhez a GNSS által származtatott pontszerű sebességeket lokális ordináris krigeléssel interpoláljuk. Az ordináris krigelés egy sztochasztikus súlyozott átlagolási módszer, amely az adatok statisztikai információit használja fel a megfigyeletlen helyeken lévő mennyiségek becsléséhez (WACKERNAGEL 2003). Ezt a statisztikai információt egy korrelogrammal írja le, amely a sebességek varianciáját és kovarianciáját/korrelációját adja meg a távolság függvényében. Általában a közeli sebességek hasonlóak, és a sebességek közötti korreláció a távolság növekedésével csökken. A helyi korrelogramok meghatározásához (minden interpolációs ponthoz egy-egy korrelogrammal) először empirikusan meghatározzuk a helyi varianciát, ahol az összes megfigyelés közötti korrelációt határozzuk meg a távolság függvényében. A helyi adatok súlyozásához Gauss-kerneleket alkalmazunk (MACHUCA-MORY & DEUTSCH 2013). A sebességmező keleti és északi komponensére külön-külön alkalmazzuk a krigelést. Az interpolált sebességmezőből számoljuk ki az alakváltozási sebességeket („strain rate"), továbbá követjük BROERSE et al. (2021) módszerét, ahol az alakváltozási sebességet rövidülésként, nyírásként vagy nyúlásként (extenzió) jellemezzük (a „strain rate" számítás részleteiért lásd PORKOLÁB et al. 2023a).

Eredmények

Feszültségmező: maximális horizontális főfeszültség (S_{Hmax}) és feszültségrezsim

Az interpolált S_{Hmax} a Pannon-medence középső részén ÉK–DNy irányú (BÉKÉSI et al. 2023a). A Pannon-medence ÉNy-i része felé és a Dinaridákban az ÉÉNy–DDK és ÉNy–DK irányultságok dominálnak. Keletebbre, a Déli- és Keleti-Kárpátok felé az S_{Hmax} K–Ny-i irányba fordul, a vizsgált terület délkeleti sarkában pedig még vissza is fordul ~ É–D-i irányba (BÉKÉSI et al. 2023a). A Nyugati-Kárpátokat É–D-i S_{Hmax} irányok jellemzik, míg a Keleti-Alpokban a feszültségmezőben jelentős variációk mutatkoznak, É–D-i és K–Ny-i orientációk egyaránt megjelennek (BÉKÉSI et al. 2023a).

A Pannon-medencén belül a feszültségmezőben lokálisabb perturbációk is előfordulnak, például Magyarország nyugati határának közelében (BÉKÉSI et al. 2023a). Ezen a kb. 200×100 km-es területen K–Ny-i irányú orientációk mutatkoznak, amelyeket mind a fúrólyukfal-deformációk, mind a fészekmechanizmus-megoldások alátámasztanak. Észak felé az orientációk élesen megváltoznak, az ÉÉK–DDNy-i irányok válnak dominánssá. Ezek az anomáliák összetett feszültségmezőre utalnak a Pannon-medence északnyugati

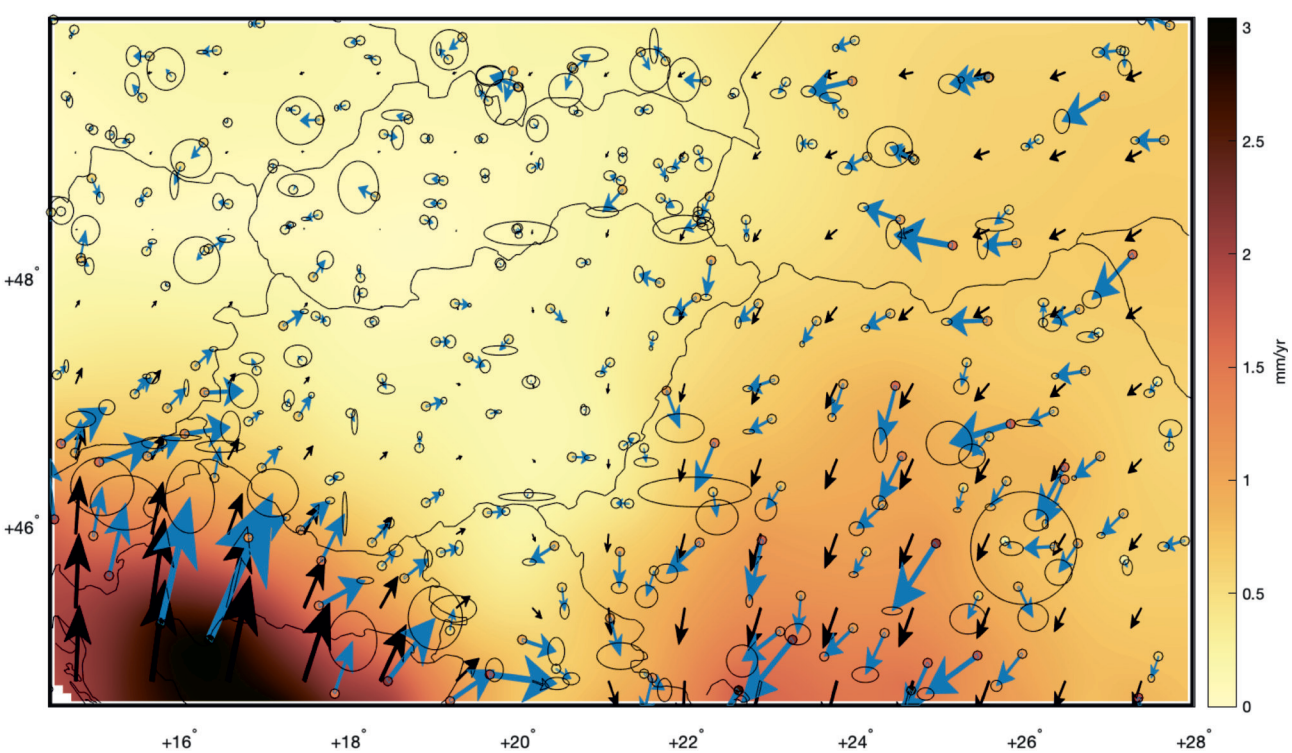
részén. A medence keleti és északkeleti részén az általában ÉK–DNy irányú feszültségmező K–Ny-i irányba fordul (Békési et al. 2023a), de ez a tendencia a Keleti-Kárpátok felé tovább folytatódik.

A 368 S_{Hmax} indikátor közül a 214 fészekmechanizmus-megoldás lehetővé tette a tektonikai stílus vagy feszültségrezsim meghatározását (*3. ábra*). Hangsúlyozzuk, hogy az ilyen típusú interpolált feszültségrezsim-térkép csak a jelentős vető menti elmozdulások (földrengések) által hordozott információkat tartalmazza, míg az esetleges aszeizmikus-mikroszeizmikus deformációs folyamatokat – amelyek az egyes nagyobb földrengések közötti területeken meghatározók lehetnek – nem. A fészekmechanizmus-megoldások által meghatározott tektonikai stílus és azok interpolált képe többnyire oldaleltolódásos és feltolódásos jelleget mutat (*3. ábra*). Pannon-medence középső részén az oldaleltolódásos rezsim figyelhető meg, míg a medence periférikus területei felé DNy-on, ÉNy-on, É-on (Északi-középhegység; *3. ábra*) és ÉK-en (a Keleti-Kárpátok felé; *3. ábra*) a transzpressziós és feltolódásos stílus dominál. Érdekes módon a Magyarország nyugati határának közelében megfigyelt helyi S_{Hmax} perturbációt (Békési et al. 2023a) transztenziós rezsim jellemzi (*3. ábra*). Ezt az anomáliát csak egy fészekmechanizmus-megoldás támasztja alá, és északi és déli irányból transzpressziós stílusú területek övezik. A vizsgált terület DNy-i részén, a Dinaridák területén a feszültségmező oldaleltolódásos és transzpressziós jelleget mutat. A kutatási terület DK-i része, a Déli-Kárpátok normál és transztenziós rezsimmel jellemezhető (*3. ábra*). A vizsgált terület legészakibb részén, a Nyugati-Kárpátokban lokálisan szintén megfigyelhető az extenziós rezsim (*3. ábra*), bár ezt csak egyetlen fészekmechanizmus-megoldás támasztja alá.

Elmozdulások és alakváltozási (~ deformációs) sebesség („strain rate”)

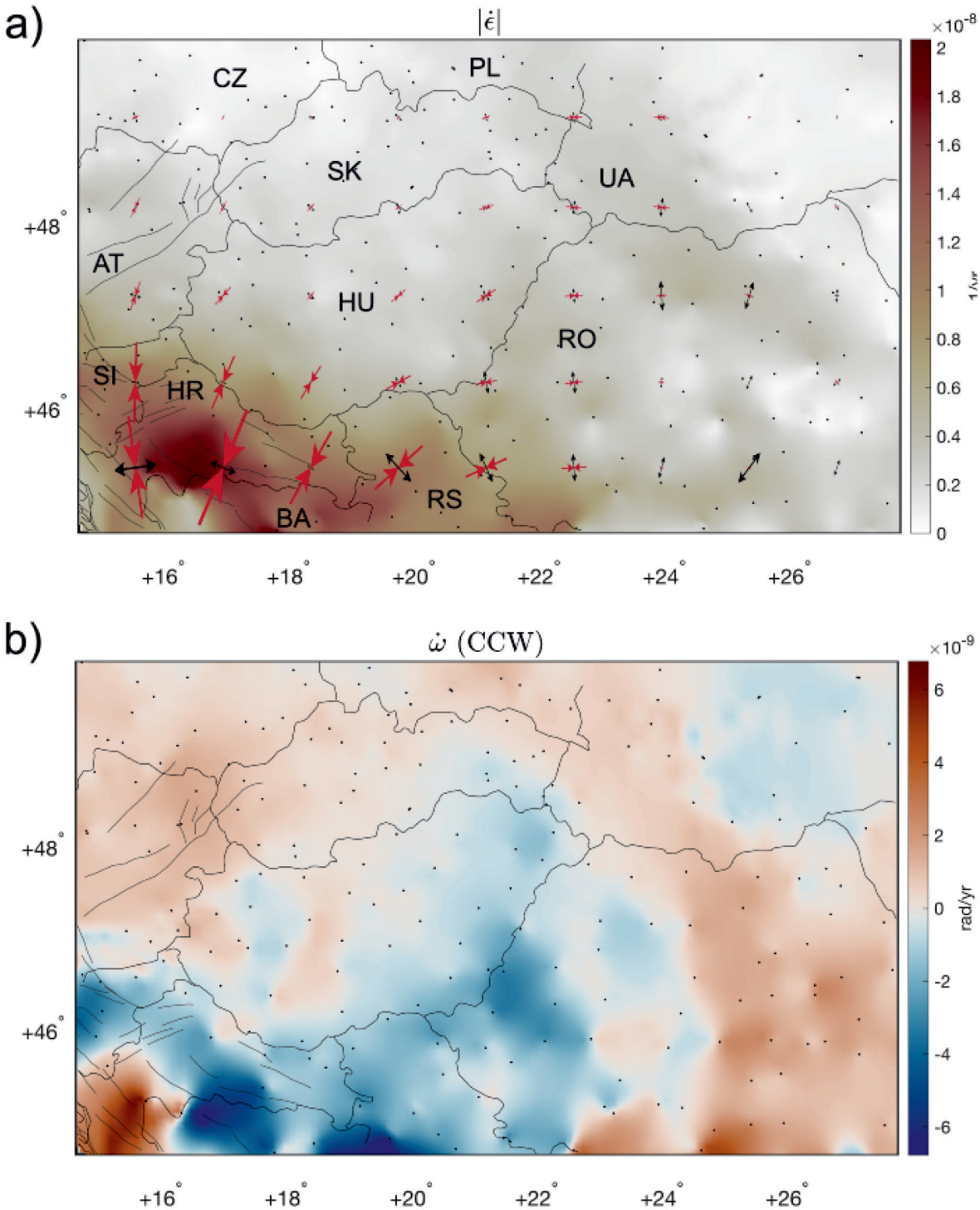
A GNSS-mérésekkel meghatározott horizontális sebességek és azok interpolációja (a stabil eurázsiai lemezhez viszonyítva) a vizsgált terület DNy-i részén (Dinaridák és annak a Pannon-medence felé való átmenete) koherens, 2–3 mm/éves, ÉÉK-i irányú mozgást, a vizsgált terület DK-i részén (Erdélyi-medence és a dél-délkeleti Kárpátok) pedig koherens, 1–1,5mm/éves, DDNy irányú mozgást mutat (*4. ábra*). A Pannon-medencét és a szlovákiai Nyugati-Kárpátokat nagyon alacsony, 0,1–0,5 mm/év sebesség jellemzi kevésbé koherens irányokkal, a Pannon-medence DNy-i részén valamivel magasabb értékekkel. Ennek a lassú mozgásnak az iránya a nyugati és a középső Pannon-medencében ÉÉK, a Nyugati-Kárpátokban NyDNy, a Pannon-medence keleti részén pedig DDNy (*4. ábra*).

Az *5. ábra a* a referenciamodellben becsült alakváltozási sebességet mutatja (kontúrvonalas ábrázolásért lásd Porkoláb et al. 2023b). A Dinaridák területe deformálódik a leggyorsabban, akár 20 nstrain/év sebességgel (nstrain = nanostrain: 10^{-9} strain, vagyis alakváltozás, dimenzió nélküli mennyiség), míg a terület többi része jellemzően 1–10 nstrain/év sebességgel deformálódik. Az Északi-középhegység, a Nyugati-Kárpátok és az európai előtér mutatja a



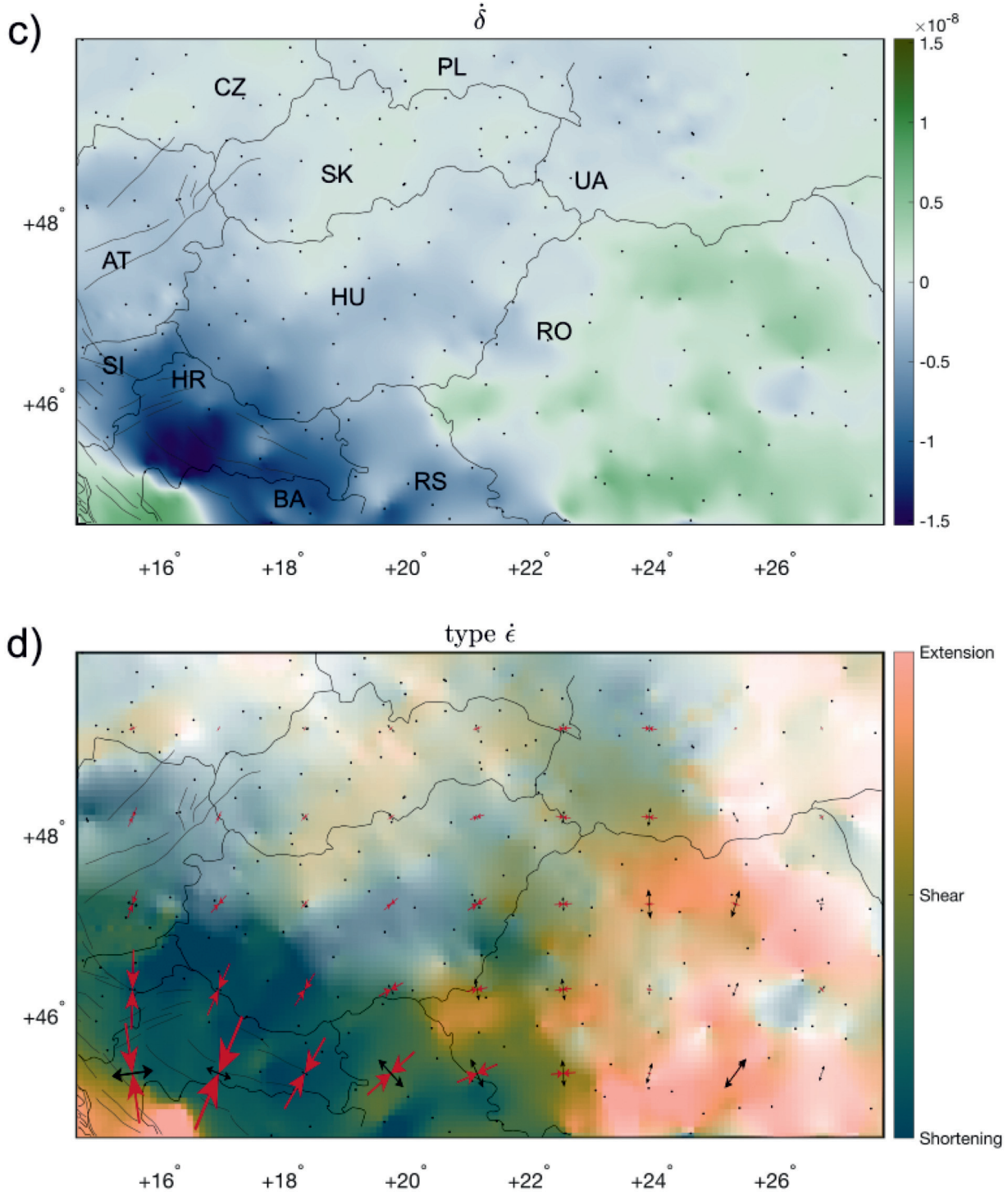
4. ábra. GNSS-mérésekkel meghatározott horizontális sebességek (kék nyilak és fekete 1-σ hibaellipszisek) és azok interpolációja (fekete nyilak és háttér) Porkoláb et al. (2023a) után, a stabil Eurázsiához viszonyítva. A sebességek nagyságát a színskála mutatja (mm/év)

Figure 4. *Horizontal velocities based on GNSS data (blue arrows and black 1-σ uncertainty ellipses) and their interpolation (black arrows and background) after Porkoláb et al. (2023a), with respect to stable Eurasia. Colors denote the magnitude of velocities*



5. ábra. Az alakváltozási sebesség számítási eredményei (PORKOLÁB et al. 2023a), amelyek a) az alakváltozási sebesség nagyságát; b) a forgási sebességet; c) a dilatációs sebességet: területnövekedés (pozitív értékek) vagy -rövidülés (negatív értékek); és d) az alakváltozási sebesség típusait mutatják. Az utóbbi esetében a színtérkép feletti átlátszóságot alkalmazzuk, amikor a nyúlási sebesség nagysága 2 nstrain/év alatt van. Extension: megnyúlás, Shear: meg nem különböztetett tiszta vagy egyszerű nyírás, Shortening; rövidülés. Az a) és d) panelek a fő alakváltozási sebesség orientációját is mutatják. A konvergáló nyilak a rövidülési irányt, a széttartó nyilak a nyúlás (extenzió) irányát mutatják. A nyilak mérete arányos az alakváltozási sebesség nagyságával. Országkódok az a) és c) paneleken: CZ – Csehország, PL – Lengyelország, UA – Ukrajna, AT – Ausztria, HU – Magyarország, SK – Szlovákia, RO – Románia, SI – Szlovénia, HR – Horvátország, BA – Bosznia-Hercegovina, RS – Szerbia

Figure 5. *Strain rate calculation results showing the a) strain rate magnitude (second invariant of the strain rate tensor); b) rotation rate; c) dilatation rate; and d) strain rate types. In case of the latter, transparency over the colormap is applied whenever the strain rate magnitude is below 2 nstrain/yr. Panels a) and d) show principal strain rate orientations. Converging arrows (red) indicate the shortening direction, diverging arrows (black) indicate the extension direction. The size of the symbol is proportional to the strain rate magnitude (corresponding to the magnitude shown in panel a); i.e. larger symbols mean higher strain rates. Country codes on panels a) and c): CZ - Czech Republic, PL - Poland, UA - Ukraine, AT - Austria, HU - Hungary, SK - Slovakia, RO - Romania, SI - Slovenia, HR - Croatia, BA - Bosnia and Herzegovina, RS - Serbia*



5. ábra. Folytatás
Figure 5. *Continued*

legalacsonyabb alakváltozási sebességet általában 1 nstrain/év közeli értékekkel. A Pannon-medencén belül a legnagyobb alakváltozási ráták a délnyugati részen (a magyar–szlovén és a magyar–horvát határ mentén) találhatók, elérve a 6–10 nstrain/év értéket.

A forgási sebességek kb. 6 és –6 nrad (nanoradián)/év között mozognak, ahol a pozitív értékek az óramutató járásával ellentétes (counterclockwise, CCW), a negatív értékek pedig az óramutató járásával megegyező (clockwise, CW) forgásokat jelölik (*5. ábra b*). A terület ÉNy-i részét (Keleti-Alpok, Nyugati-Kárpátok, európai előtér) lassú (kb. 1 nrad/év), de következetes CCW forgások jellemzik. A romániai Kárpátok szintén CCW irányban forognak, bár valamivel gyorsabban (1-4 nrad/év). Ezzel szemben a horvát, boszniai és szerbiai Dinaridák nagy részét, valamint az Erdélyi-középhegység nagy részét és az Erdélyi-medencét követ-

kezetes CW forgás jellemzi. A Pannon-medence magyarországi részét nagyon lassú forgások jellemzik, amelyek 1 és –1 nrad/év között változnak. A terület délnyugati sarka (Külső-Dinaridák) viszonylag gyors CCW forgást mutat.

A dilatációs ráták jelzik a terület növekedését (pozitív értékek) vagy zsugorodását (negatív értékek). Jelentős pozitív dilatáció (kb. 5 nstrain/év) jellemzi a Déli-Kárpátokat és az Erdélyi medencét (*5. ábra c*). Emellett a vizsgált terület DNy-i sarka is pozitív dilatációt mutat, ami a Dinaridák belsőbb részeihez képest a tengerparti területek lassabb ÉK-i mozgásának köszönhető (*4. ábra*). A Nyugati-Kárpátok és az Északi-középhegység lassabb pozitív dilatációt mutat (kb. 1 nstrain/év). Ezzel szemben a Pannon-medence 1–5 nstrain/év negatív dilatációs értékekkel jellemezhető, míg a szlovéniai, közép- és észak-horvátországi, valamint boszniai hegyvonulatok gyorsabb, 5–10 nstrain/év negatív dilatációs rátát mutatnak.

Az *5. ábra d* és PORKOLÁB et al. (2023b) térképe ábrázolja az alakváltozások típusát és a főtengelyek (rövidülés és nyúlás) irányultságát a területen. A Keleti-Alpok, a Dinaridák és a Pannon-medence átmeneti zónájában az ÉÉNy–DDK/ÉK–DNy irányú rövidülés és transzpresszió (rövidülés és alárendelt merőleges nyúlás) dominál, amelynek intenzitása a medencén belül egyre csökken, amint azt a fő alakváltozásiráta-szimbólumok csökkenő mérete is kiemeli. A Pannon-medence nagy részét a rövidülés és transzpressziós deformáció jellemzi, a rövidülés iránya a nyugati területeken ÉÉK–DDNy-ról a keleti területeken KÉK–NyDNy-ra változik. Az uralkodó rövidülés és transzpreszszió az Északi-középhegység felé transztenzióra változik, és a Nyugati-Kárpátok nagy részén is a transztenziós deformáció dominál. A Pannon-medence keleti végét (a Derecskei vetőzóna környéke) a magyar határ mentén nyírásos deformációs zónák jellemzik, ahol a nyúlásos és rövidülési komponensek közelítőleg egyenlőek. Ezek a nyírásos deformációs zónák elválasztják a döntően rövidüléses magyarországi Pannon-medencét és Dinaridákat a döntően nyúlásos (extenziós) Erdélyi-medencétől és a Déli-és Keleti-Kárpátoktól.

Diszkusszió és konklúzió

A feszültség, felszíni mozgás és deformációs ráta eredményei megerősítik, valamint területileg és adatsűrűség tekintetében jelentősen kiegészítik és pontosítják a korábbi eredményeket (BADA et al. 2007a, b; GRENERCZY et al. 2005): a Pannon-térségben a transzpressziós feszültségmező és ehhez kapcsolódóan a rövidüléses és a transzpressziós deformáció határozzák meg az aktív tektonikát. Az új deformációsráta-adatoknak és deformációs főtengelyirányoknak köszönhetően – amelyek eddig csak lokálisan és nagyobb bizonytalansággal álltak rendelkezésre (BUS et al. 2009) – összevethetővé vált a feszültségmező és a deformációs mező összehasonlítása. Ezen új sebességinterpolációs és deformációsráta-adatok szabadon elérhetőek (BROERSE et al. 2023). Az S_{Hmax} (kompresszió) iránya a Pannon-medencében tipikusan ÉK–DNy, ami a terület nagy részén egybeesik a rövidüléses deformációs ráta főtengelyirányával (BÉKÉSI et al. 2023a, PORKOLÁB et al. 2023b). A két főtengely iránya a legtöbb földtani környezetben várhatóan egybe kell, hogy essen, hiszen a kompresszió (összenyomás) iránya tipikusan megegyezik a kontrakció (rövidülés) irányával. A feszültség és deformációs ráta megfigyelései viszont nem ugyanazon térrészre vonatkoznak; a feszültségadatok a felsőkéregre, a deformációs adatok pedig a felszínre. A főtengelyek általános egyezése így arra utal, hogy egyrészt a feszültség- és deformációs adatrendszerek összehasonlíthatók, másrészt a felsőkéreg feszültségmezőjét és a felszín deformációját ugyanazon erők hajtják.

A főtengelyek azonban nem mindenhol egyeznek. Vannak eltérést mutató területek, például a Kisalföld DNy-i területén, ahol az S_{Hmax} irányok K–Ny-i, a rövidülés irányok pedig ÉK–DNy-i orientációt mutatnak (*3.* és *5.d ábrák*). Az S_{Hmax} irányok K–Ny-i „befordulása" ezen a területen már régóta ismert, amelyet részben magyarázhat a kiemelt Keleti-Alpok gravitációs hatása is (BADA et al. 2001). A deformációs ráta eredményei alapján viszont kijelenthető, hogy ez a befordulás a felszínközeli deformációs főtengelyeket nem érinti (*5.d ábra*). Az ilyen anomáliákat vagy a két adatrendszer közti mintavételezési különbségek (pl. a felsőkéreg és felszín deformációja helyileg eltérő), vagy a felsőkéreg elasztikus deformációjából adódó átmeneti jelenségek okozhatják. Elasztikus deformáció esetén ugyanis a feszültség nem a deformációs rátától (*strain rate*) függ, mint a viszkózus (képlékeny) deformáció esetén, hanem magától a deformációtól (*strain*). Ebből kifolyólag előfordulhat, hogy például egy elasztikus, hosszú időtartamú összenyomás alatt álló terület egy rövid ideig nyúlásos deformációs rátát mutat (azaz ideiglenesen csökken az összenyomás foka). Mivel a rideg felsőkéreg elsősorban elasztikusan deformálódik (amíg el nem éri a kritikus feszültséget és a vető menti elmozdulást), előfordulhat, hogy a GNSS-állomások által megfigyelt 1–2 évtizedes időtartam rögzíthetett ehhez hasonló átmeneti deformációs jelenséget, azonban erre bizonyítékaink jelenleg nincsenek; a főtengelyek általános egyezése pedig nem is utal arra, hogy ez a jelenség számottevő lenne. A feszültség- és deformációs anomáliák azonosítása és részletes földtani elemzése túlmutat jelen publikáció keretein, azonban az itt bemutatott új adatoknak köszönhetően ez a lehetőség immáron adott, és nagyban hozzájárulhat a Pannon-térség deformációs folyamatainak megértéséhez.

A feszültségmező és az alakváltozási ráta főtengelyek irányultsága mellett a relatív magnitúdók is hasonlóságot mutatnak. Az új feszültségrezsim-térkép (*3. ábra*) az eddigi ismeretekhez képest jelentős pontosításra került a sűrűbb adatrendszer és a fészekmechanizmusok felülvizsgálatának köszönhetően. Ezen pontosítás egyik legfőbb területe Nógrád megye (és szlovákiai folytatása), ahol a BADA et al. (2007b) által ábrázolt normálvetős rezsim helyett a régióban általános transzpressziós rezsim jelenik meg (*3. ábra*). A Dinaridák és a Pannon-medence nagy része szintén transzpressziós feszültségmezővel és ezzel egybevágva transzpressziós deformációval jellemezhető (*3.* és *5.d ábrák*; BADA et al. 2007b). Megfigyelhető ugyanakkor a Déli-Kárpá-

tok területére jellemző extenziós feszültségmező (*3. ábra*), amely extenziós deformációval párosul (*5. ábra*). Az alapvető hasonlóságok mellett különbségek is megfigyelhetőek a feszültség és deformációs ráta eredményei között: Magyarország középső és déli területein az eltolódásos feszültségmező (interpoláció viszonylag kevés adat alapján) rövidüléses deformációval párosul (*3.* és *5. ábrák*). Ezen a ponton érdemes megjegyezni, hogy a feszültségmező-interpoláció kizárólag fészekmechanizmus-megoldásokon, tehát szeizmikus eseményeken alapul (töréses, lokális deformáció), míg a deformációs ráta becslése regionális, aszeizmikus elmozdulások (elasztikus és viszkózus deformáció) mérésén alapul, amely részben magyarázatot adhat a megfigyelt különbségekre.

A megfigyelt ÉK–DNy irányú összenyomás és rövidülés a Pannon-medencében a Dinaridák 2–3 mm/év ÉÉK-i irányú mozgásából, illetve az ukrajnai és romániai területek 1–1,5 mm/év NyDNy és DDNy felé történő mozgásából adódik (*4. ábra*). A Dinaridák relatíve gyors ÉÉK-i mozgása az Adriai mikrolemez északias mozgásának és ezáltal kifejtett nyomásának köszönhető (Bada et al. 2007b), ami régóta elfogadott, és ma is megkérdőjelezhetetlen peremfeltétele a Pannon-térség aktív deformációjának. Az új GNSS-feldolgozás eredményei azonban arra is rávilágítanak, hogy a keleti területek (elsősorban a Keleti- és Déli-Kárpátok területei) ellentétes irányú, keleten nyugati, majd a Déli-Kárpátoknál délre forduló mozgása (*4. ábra*) is fontos peremfeltétel, amely – a lassabb mozgás alapján kisebb mértékben – szintén hozzájárul a Pannon-medence összenyomásához és ezáltal a megfigyelt feszültségmezőhöz (*3. ábra*; Békési et al. 2023a; Bada et al. 2007a) és deformációs mintázathoz (*5. ábra*; Porkoláb et al. 2023a; Grenerczy et al. 2005). Ezen délies mozgáshoz és az ehhez kapcsolódó extenziós deformációhoz (*5.d ábra*) a szükséges helyet a Hellén szubdukciós zóna déli irányú hátragördülése biztosíthatja, amely „magával húzza" a teljes Égei-térséget, valamint kisebb mértékben a balkáni és az új eredmények fényében a kárpáti területeket is (Müller et al. 2013, Chousianitis et al. 2015, Porkoláb et al. 2023a).

A regionális tektonikai és geodinamikai jelentőségen túl a bemutatott feszültségmező és deformációs ráta eredményei bemenő paraméterekként vagy referenciaként szolgálhatnak geodinamikai és szerkezeti modellekhez és elemzésekhez, szeizmotektonikai modellekhez (lásd Koroknai et al. 2023), földrengés-veszélyeztetettségi becslésekhez és geoenergetikai projektekhez is.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott eredmények a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt („Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése") keretén belül készültek el. Köszönjük a két anonim bírálónak és a szerkesztőknek a konstruktív javaslatokat.

Elektronikus mellékletek

Békési, E., Porkoláb, K. & Wéber, Z.: Stress field of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron.
https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB

Porkoláb, K., Broerse, T., Kenyeres, A., Békési, E., Tóth, S., Magyar, B. & Wesztergom, V.: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron.
https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC

Irodalom – References

Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. & Boucher, C. 2007: ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **112/B9**. https://doi.org/10.1029/2007JB004949

Bada, G., Horváth, F., Cloetingh, S., Coblentz, D. & Tóth, T. 2001: Role of topography induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. – *Tectonics* **20/3,** 343–363. https://doi.org/10.1029/2001TC900001

Bada, G., Horváth, F., Dövényi, P., Szafián, P., Windhoffer, G. & Cloetingh, S. 2007: Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. – *Global and Planetary Change* **58/1–4,** 165–180. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007

Bada, G., Grenerczy, G., Tóth, L., Horváth, F., Stein, S., Cloetingh, S., Windhoffer, G., Fodor, L., Pinter, N. & Fejes, I. 2007: Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian Basin: Seismicity, GPS velocities, and stress transfer. – *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*, **425,** 243–262. https://doi.org/10.1130/2007.2425(16)

Békési, E., Porkoláb, K. & Wéber, Z. 2023a: Stress field of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 309. http://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB.

Békési, E., Porkoláb, K., Wesztergom, V. & Wéber, Z. 2023b: Updated stress dataset of the Circum-Pannonian region: Implications for regional tectonics and geo-energy applications. – *Tectonophysics* **856,** 229860. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229860

Broerse, T., Krstekanić, N., Kasbergen, C. & Willingshofer, E. 2021: Mapping and classifying large deformation from digital imagery: application to analogue models of lithosphere deformation. – *Geophysical Journal International* **226/2,** 984–1017. https://doi.org/10.1093/gji/ggab120

BROERSE, T., PORKOLÁB, K., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023: Data supplement to: Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – Doi: https://doi.org/10.24416/UU01-YV9NWD

BUS, Z., GRENERCZY, G., TÓTH, L. & MÓNUS, P. 2009: Active crustal deformation in two seismogenic zones of the Pannonian region—GPS versus seismological observations. – *Tectonophysics* **474/1–2,** 343–352. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.045

CARAFA, M. & BARBA, S. 2013: The stress field in Europe: optimal orientations with confidence limits. – *Geophysical Journal International* **193/2,** 531–548. https://doi.org/10.1093/gji/ggt024

CARAFA, M., TARABUSI, G. & KASTELIC, V. 2015: SHINE: Web application for determining the horizontal stress orientation. – *Computers & geosciences* **74,** 39–49. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.001

CHOUSIANITIS, K., GANAS, A. & EVANGELIDIS, C. P. 2015: Strain and rotation rate patterns of mainland Greece from continuous GPS data and comparison between seismic and geodetic moment release. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **120/5,** 3909–3931. https://doi.org/10.1002/2014JB011762

FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVÁTH, E., RUSZKICZAY-RÜDIGER, Z., PALOTÁS, K., SÍKHEGYI, F., TIMÁR, G., CLOETINGH, S. & HORVÁTH, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. – *Tectonophysics* **410/1–4,** 15–41. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.06.008

GRENERCZY, G., SELLA, G., STEIN, S. & KENYERES, A. 2005: Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. – *Geophysical Research Letters* **32/16**. https://doi.org/10.1029/2005GL022947

HEIDBACH, O., RAJABI, M., REITER, K., ZIEGLER, M. & TEAM, W. 2016: World stress map database release 2016. – *GFZ Data Services* **10,** 1. https://doi.org/10.5880/WSM.2016.002

HORVÁTH, F. 1993: Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. — *Tectonophysics* **226/1–4,** 333–357. https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90126-5

HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 1996: Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. – *Tectonophysics* **266/1–4,** 287–300. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00194-1

KENYERES, A., BELLET, J., BRUYNINX, C., CAPORALI, A., DE DONCKER, F., DROSCAK, B., DURET, A., FRANKE, P., GEORGIEV, I. & BINGLEY, R. 2019: Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. – *GPS Solutions* **23,** 1–17. https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7

KOROKNAI, B., WÓRUM, G., TOTH, T., KOROKNAI, ZS., FEKETE-NÉMETH, V. & KOVÁCS, G. 2020: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. – *Earth-Science Reviews* **211,** 103411. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103411.

KOROKNAI, B., BÉKÉSI, E., BONDÁR, I., CZECZE, B., GYŐRI, E., KOVÁCS, G., PORKOLÁB, K., TÓTH, T., WESZTERGOM, V., WÉBER, Z. & WÓRUM, G. 2023: Seismotectonic map of Hungary, Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 353. http://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD

KREEMER, C., BLEWITT, G. & KLEIN, E. C. 2014: A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **15/10,** 3849–3889. https://doi.org/10.1002/2014GC005407

MACHUCA-MORY, D. F. & DEUTSCH, C. V. 2013: Non-stationary geostatistical modeling based on distance weighted statistics and distributions. — *Mathematical Geosciences* **45,** 31–48. https://doi.org/10.1007/s11004-012-9428-z

MÜLLER, M., GEIGER, A., KAHLE, H.-G., VEIS, G., BILLIRIS, H., PARADISSIS, D. & FELEKIS, S. 2013: Velocity and deformation fields in the North Aegean domain, Greece, and implications for fault kinematics, derived from GPS data 1993–2009. – *Tectonophysics* **597,** 34–49. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.003

PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023a: Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – *Acta Geodaetica et Geophysica***,** 1–25. https://doi.org/10.1007/s40328-023-00409-8

PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023b: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 311. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC

VRABEC, M. & FODOR, L. 2006: Late Cenozoic tectonics of Slovenia: structural styles at the Northeastern corner of the Adriatic microplate. – *The Adria microplate: GPS geodesy, tectonics and hazards*. Springer, 151–168. https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_10

WACKERNAGEL, H. 2003: *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. – Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5

WÉBER, Z. 2009: Estimating source time function and moment tensor from moment tensor rate functions by constrained L_1 norm minimization. — *Geophysical Journal International* **178/2,** 889–900. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04202.x

WÉBER, Z. 2016a: Source parameters for the 2013–2015 earthquake sequence in Nógrád county, Hungary. – *Journal of Seismology* **20,** 987–999. https://doi.org/10.1007/s10950-016-9576-6

WÉBER, Z. 2016b: Probabilistic waveform inversion for 22 earthquake moment tensors in Hungary: new constraints on the tectonic stress pattern inside the Pannonian basin. – *Geophysical Journal International* **204/1,** 236–249. https://doi.org/10.1093/gji/ggv446

WÉBER, Z. 2018: Probabilistic joint inversion of waveforms and polarity data for double-couple focal mechanisms of local earthquakes. – *Geophysical Journal International* **213/3,** 1586–1598. https://doi.org/10.1093/gji/ggy096

WÉBER, Z. & SÜLE, B. 2014: Source properties of the 29 January 2011 ML 4.5 Oroszlány (Hungary) mainshock and its aftershocks. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **104/1**, 113–127. https://doi.org/10.1785/0120130152

WÉBER, Z., CZECZE, B., SÜLE, B., BONDÁR, I. & GROUP, A. W. 2020: Source analysis of the March 7, 2019 ML= 4.0 Somogyszob, Hungary earthquake sequence. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **55/3,** 371–387. https://doi.org/10.1007/s40328-020-00311-7

Kézirat beérkezett: 2023. 09. 06.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 309., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB

Stress field of the Pannonian region

BÉKÉSI, Eszter, PORKOLÁB, Kristóf, WÉBER, Zoltán

Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet

Feszültségmező a Pannon-térségben

Összefoglalás

A Pannon-térség (kéreg)feszültség-térképe a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, a 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt keretében készült el 1:1 500 000 léptékben. A térkép összesíti és ábrázolja a régióban jelenleg elérhető maximális horizontális főfeszültség (S_{Hmax}) adatokat, valamint az adatok interpolációjából származó irányokat. A térkép lehetővé teszi a jelenkori S_{Hmax} becslését az egész régióban, ezáltal segítve például szerkezeti, szeizmotektonikai vagy geoenergetikai kutatásokat.

Kulcsszavak: feszültségmező, Pannon-térség, térkép

Abstract

The stress field map of the Pannonian region was constructed in the framework of the 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 project, supported by the National Research, Development and Innovation Fund, Hungary, with a scale of 1:1 500 000. The map shows maximum horizontal stress (S_{Hmax}) observations and interpolated S_{Hmax} orientations, allowing for the reconstruction of the present-day stress field of the whole region, providing constraints for structural and seismotectonic studies as well as geo-energy projects.

Keywords: stress field, Pannonian region, map

Creating and analysing the seismotectonic model of Hungary.

STRESS FIELD OF THE PANNONIAN REGION

1:1 500 000

GEOMEGA

PROJECT FINANCED FROM THE NRDI FUND

Project: 2018-1.2.1-NKP-2018-00007

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB

Reference:

Békési E., Porkoláb K., Wéber Z. 2023: Stress field of the Pannonian region. Földtani Közlöny 153/4, 309.

For explanation of the map see:

Porkoláb K., Békési E., Broerse T., Kenyeres A., Wéber Z. 2023: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében: új adatrendszerek és térképek bemutatása. Földtani Közlöny 153/4, 299-308.

Map projection: WGS 84 / Pseudo-Mercator, EPSG: 3857
Cultural data source: OpenStreetMap contributors
Map compiled by
HUN-REN Institute of Earth Physics and Space Science

0 25 50 75 100 km

Legend

maximum horizontal stress directions

- borehole breakout data
- focal mechanism solution
- geological fault slip data
- overcoring data
- interpolated directions

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 311., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC

GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region

Porkoláb, Kristóf[1], Broerse, Taco[2], Kenyeres, Ambrus[3], Békési, Eszter[1], Tóth, Sándor[3], Magyar, Bálint[3], Wesztergom, Viktor[1]

[1]Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
[2]Utrecht University, Department of Geosciences
[3]Kozmikus Geodéziai Obszervatórium – Lechner Non-Profit Kft.

GNSS-alapú deformációs sebesség a Pannon-térségben

Összefoglalás

A Pannon-térség deformációs sebesség (strain rate) térképe a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, a 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt keretében készült el 1:1 500 000 léptékben. A térkép GNSS-adatok interpolációja alapján számolt deformációs sebességek irányát (rövidülés és megnyúlás tengelyek orientációja) és nagyságát (tengelyek nagysága és kontúrvonalak) ábrázolja. A deformációs sebességek kritikus bemenő paraméterek geodinamikai és szeizmotektonikai modellekhez, és nagyban elősegíthetik a Pannon-térség aktív deformációs mechanizmusainak megértését.

Kulcsszavak: deformációs sebesség, Pannon-térség, térkép

Abstract

The GNSS-based strain rate map of the Pannonian region was constructed in the framework of the 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 project, supported by the National Research, Development and Innovation Fund, Hungary, with a scale of 1:1 500 000. The map shows the direction (orientation of shortening and extension axes) and magnitude (magnitude of the axes and contour lines) of strain rates calculated from the interpolation of GNSS data. The strain rate map provides critical input parameters for geodynamic and seismotectonic models and allows for the understanding of active deformation processes in the Pannonian region.

Keywords: strain rate pattern, Pannonian region, map

Creating and analysing the seismotectonic model of Hungary

GNSS-BASED STRAIN RATE PATTERN OF THE PANNONIAN REGION

1:1 500 000

GEOMEGA

PROJECT FINANCED FROM THE NRDI FUND

Project: 2018-1.2.1-NKP-2018-00007

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC

Reference:

Porkoláb K., Broerse t., Kenyeres A., Békési E., Tóth S., Magyar B., Wesztergom V. 2023: Strain rate pattern of the Pannonian region. Földtani Közlöny 153/4, 311.

For explanation of the map see:

Porkoláb K., Békési E., Broerse T., Kenyeres A., Wéber Z. 2023: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében: új adatrendszerek és térképek bemutatása. Földtani Közlöny 153/4, 299-308.

0 25 50 75 100 km

Map projection: WGS 84 / Pseudo-Mercator, EPSG: 3857
Cultural data source: OpenStreetMap contributors
Map compiled by
HUN-REN Institute of Earth Physics and Space Science

Legend

Principal strain rate tensor
direction of shortening (red) and extension (blue)

biaxial shortening | shortening | strike-slip | extension | biaxial extension

strain rate magnitude contours [nanostrain/yr]

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 313–334., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.313

A neotektonikus fázis deformációi Magyarországon

Koroknai Balázs[1], Wórum Géza[1], Tóth Tamás[1], Koroknai Zsuzsa[2], Németh Viktória[1], Kovács Gábor[1,3]

[1]Geomega Kft., 1095 Budapest, Mester u. 4.
[2]Budapest Gyógyfürdői és Hévizei Zrt., 1034 Budapest, Szőlő u. 38.
[3]ELTE BDPK Földrajzi Tanszék, 9700 Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4.

Deformations of the neotectonic phase in Hungary

Abstract

The ultimate goal of the research project 2018-2.2.1-NKP-2018-00007, funded by the National Research, Development and Innovation Office, was to create the seismotectonic model of Hungary. One of the key input elements of the established seismotectonic model was the newly constructed, 1:500 000 scaled, national map of the tectonic and atectonic deformations of the neotectonic phase (<6–8 Myr). The present work aims to introduce briefly the new map and the main results of the mapping completed in the frame of the project.

The new map is based on the structural interpretation of 70 3D seismic data cubes and nearly 2900 2D seismic profiles, as well as on the critical evaluation and integration of relevant results published in the neotectonic literature. The main results of the completed country-wide mapping with respect to previous neotectonic maps are summarized below:

i) A more detailed and accurate representation (actual position, extension and geometry) of young, near-surface structures (faults and folds) than in previous studies.

ii) Definition, characterization and depiction of the different types of faults and folds.

iii) An important novelty of the map is the definition and accurate country-wide representation of major pre-Pannonian deep-seated faults (so-called „root zones") in the context of neotectonic deformation using the availabe seismic dataset, as well as literature data. The combined representation of „root zones" with shallow-level neotectonic structures significantly contributes the better overview and understanding of the local and regional structural context.

(iv) The geometric relationship between near-surface and deep-seated („root") structures clearly indicates that the formation of neotectonic faults is due to the reactivation of pre-existing faults (predominantly associated with Oligo-Miocene extrusion or Miocene rifting) all over the Pannonian Basin, as also indicated by previous studies.

v) A more detailed and country-wide definition and characterization of neotectonic structural domains based on deformation style and patterns.

vi) Interpretation of Late Pannonian/Pliocene kinematics and stress field based on observed neotectonic fault pattern on a country-wide scale.

Keywords: neotectonic phase, seismic interpretation, neotectonic and pre-Pannonian faults, folds, stress field, Pannonian Basin

Összefoglalás

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt végső célját Magyarország szeizmotektonikai modelljének megalkotása jelentette. A új modell egyik kulcsfontosságú elemét képezte a projekt keretében elkészült, a neotektonikus fázis (<6–8 M év) tektonikus és atektonikus eredetű deformációit bemutató új, 1:500 000 léptékű országos térkép. Jelen munka fő célja az új térkép és a kapcsolódó legfontosabb eredmények áttekintése.

A megszerkesztett új térkép alapját 70 db 3D szeizmikus adattömb és közel 2900 db 2D szeizmikus szelvény szerkezeti értelmezése, továbbá a neotektonikai szakirodalom releváns eredményeinek kritikai értékelése és integrációja képezi. Az elvégzett országos térképezés legfőbb eredményei a megelőző neotektonikai térképekkel összevetve az alábbiakban összegezhetők:

i) A fiatal, felszínközeli szerkezetek (vetők és redők) a korábbiaknál részletesebb és pontosabb ábrázolása.

ii) A vetők és redők különböző típusainak elkülönítése, jellemzése és ábrázolása.

iii) Fontos újdonság a jelentősebb prepannóniai vetős mélyszerkezetek (ún. „gyökérzónák") pontos kijelölése és országos ábrázolása a térképezett neotektonikus deformációk kontextusában a rendelkezésre álló szeizmikus adatrendszer

és irodalmi adatok integrált felhasználásával. A „gyökérzónák" és a felszínközeli neotektonikus szerkezetek együttes ábrázolása számottevően segíti elő a vetőkép lokális és regionális szerkezeti kontextusának jobb áttekintését.

iv) A mély- és felszínközeli szerkezetek kapcsolata alapján a neotektonikus vetők kialakulása egyértelműen a megelőző – uralkodóan az oligo-miocén extrúzióhoz vagy a miocén riftesedéshez kapcsolódó – vetők reaktivációjához köthető a Pannon-medencében, összhangban a korábbi tektonikai elemzések eredményeivel.

v) Neotektonikai szerkezeti domének a korábbiaknál pontosabb és országos szintű elkülönítése és jellemzése deformációs stílus és mintázat alapján.

vi) A késő pannon/pliocén kinematika és feszültségmező interpretációja az országos vetőkép és az értelmezett elmozdulások alapján.

Tárgyszavak: neotektonikai fázis, szeizmikus értelmezés, neotektonikus és prepannóniai vetők, redők, feszültségmező, Pannon-medence

Bevezetés

A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet és a Geomega Kft. mint konzorciumi tagok részvételével 2019. január 1-jén kezdődött meg a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal Nemzeti Kiválóság Programjának keretében az a kutatási projekt (2018-2.2.1-NKP-2018-00007), amelynek végcélját „Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése" jelentette. A projekt végső céljának megvalósításhoz számos fontos kutatási mérföldkő teljesítése járult hozzá (áttekintésükért lásd WÉBER et al. 2023 és KOROKNAI et al. 2023b). A projekt szempontjából kiemelkedő fontosságú eredményt képviselt a neotektonikai fázis deformációit bemutató, új országos térkép (WÓRUM et al. 2020) megszerkesztése. Az új térkép a neotektonikai fázis során aktív szerkezeti elemeket (vetők és redők) tünteti fel, amelyek azonosítását és térképezését a rendelkezésre álló, a hegyvidéki területek kivételével országos lefedettséget biztosító, 2–3D szeizmikus adatrendszer és a releváns irodalmi adatok felhasználásával végeztük el. E tanulmány fő célja az új térkép és az elvégzett térképezés legfőbb eredményeinek ismertetése a hazai szakközönség és a téma iránt érdeklődők számára reprezentatív példák bemutatásával.

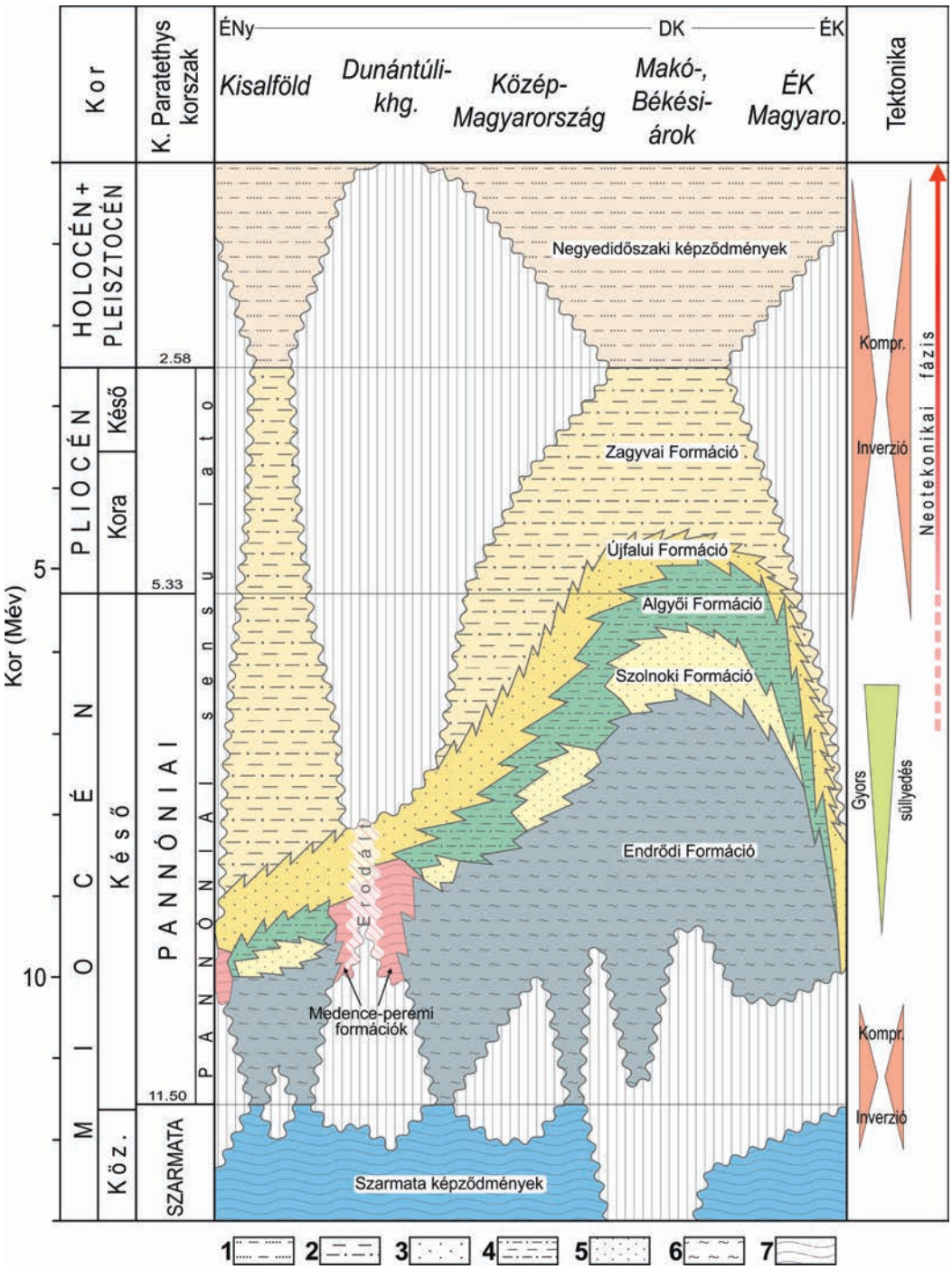
A térkép a megadott hivatkozásban (WÓRUM et al. 2020) szereplő internetes elérhetőségen (nagy felbontású pdf formátumban) túl ugyancsak letölthető az alábbi helyről: http://www.geomega.hu/letoltes/. Itt a térkép georeferált képformátumban is rendelkezésre áll, illetve kérésre a térképen ábrázolt vetők és redők digitális vektoros állományához való hozzáférést is biztosítjuk adatkezelési nyilatkozat kitöltése ellenében.

Előzmények

A jelentősebb térképi előzmények áttekintése előtt fontos rögzíteni a neotektonikus fázis meghatározását tekintettel a térkép tartalmára. Neotektonikus fázis alatt a Pannon-medence legutolsó, mintegy 6–8 millió évvel ezelőtt kezdődő fejlődési szakaszát értjük (*1. ábra*), amely során a medence kialakulásáért felelős extenziós/transztenziós tektonikai rezsimet felváltotta az összenyomásos, illetve transzpreszszív/eltolódásos rezsim (HORVÁTH & CLOETINGH 1996; FODOR et al. 1999, 2005a; CSONTOS et al. 2002; BADA et al. 2007b). Ez a tektonikai stílusváltás egyúttal a medence szerkezeti inverziójával járt együtt (TARI 1994, HORVÁTH 1995, BADA et al. 1999, GERNER et al. 1999). A legfiatalabb (neotektonikus) szerkezeti inverzió (*1. ábra*) nem egyidejűleg zajlott a Pannon-medencében: a medence DNy-i részén mintegy 8 millió éve kezdődött (UHRIN et al. 2009), míg a medence középső és keleti részén ennél jóval később (~4–6 millió éve) jelentkeztek az első, a neotektonikus fázishoz kapcsolható deformációk (TARI 1994; HORVÁTH 1995; FODOR et al. 2005a, b; RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2007; BALÁZS et al. 2016, 2018). Ez az inverzió időbelileg tehát határozottan elkülönül a késő szarmata, illetve kora pannóniai transzpressziós eseményektől (CSONTOS et al. 2005, FODOR et al. 2005b, TÖRŐ et al. 2012, vö. *1. ábra*).

A medence inverziójának hátterében geodinamikai szempontból mindenekelőtt az Adriai-mikrolemez folyamatos, É/ÉK felé történő mozgása (rotációja) állt („Adria-push"; BADA et al. 2007a), amely folyamat a mai napig aktív. Másfelől a Pannon-medence a késő miocén végére szerkezetileg „blokkolt" („land-locked") rendszerré vált (HORVÁTH 1993, HORVÁTH & CLOETINGH 1996) a kárpáti szubdukció hátragördülésének („roll back"; ROYDEN 1993, NEMČOK et al. 1998, SPERNER et al. 2002) megszűnése következtében, ami az egyes szerkezeti egységek további, számottevő keleti irányú elmozdulását már nem tette lehetővé.

Az első modern tektonikai szemléletű, országos léptékű neotektonikai áttekintés FODOR et al. (1999) munkájához kötődik, amely a 6 millió évnél fiatalabb szerkezeteket mutatja be a Pannon-medencében és szűkebb környezetében. E térkép a legjelentősebb neotektonikus szerkezetekről (pl. budafai antiklinális, Kapos-vető és annak alföldi folytatása, Balaton vetőzóna, Mecsek–Villány térség vetői, a Budai-hegység és a Gödöllői-dombság vetői stb.) és azok kinematikai interpretációjáról adott áttekintést. A hazai neotektonikai kutatás történetében mérföldkövet jelentett a 2006-ban megjelent Geodinamikai Atlasz (HORVÁTH et al. 2006), amely az akkor elérhető neotektonikai ismereteket összegezte 1:1 500 000 léptékű térképen a Pannon-medencében és környezetében (*2. ábra*). E térkép némileg módosított változata 2009-ben jelent meg (HORVÁTH et al. 2009), amely a korábbihoz képest néhány újabb neotektonikus szerkezetet is feltüntet (pl. Hernád-vető, kisalföldi vetők), és a korábban ábrázolt elemek lefutásában/geometriájában is mutat kisebb-nagyobb változásokat.



1. ábra. A fiatal (szarmata–negyedidőszaki) medencekitöltés egyszerűsített rétegtana a Pannon-medence hazai részén (Sztanó et al. 2013a, b; Sztanó et al. 2016; Balázs et al. 2018 alapján) és a neotektonikus fázis definíciója (Koroknai et al. 2020 alapján)

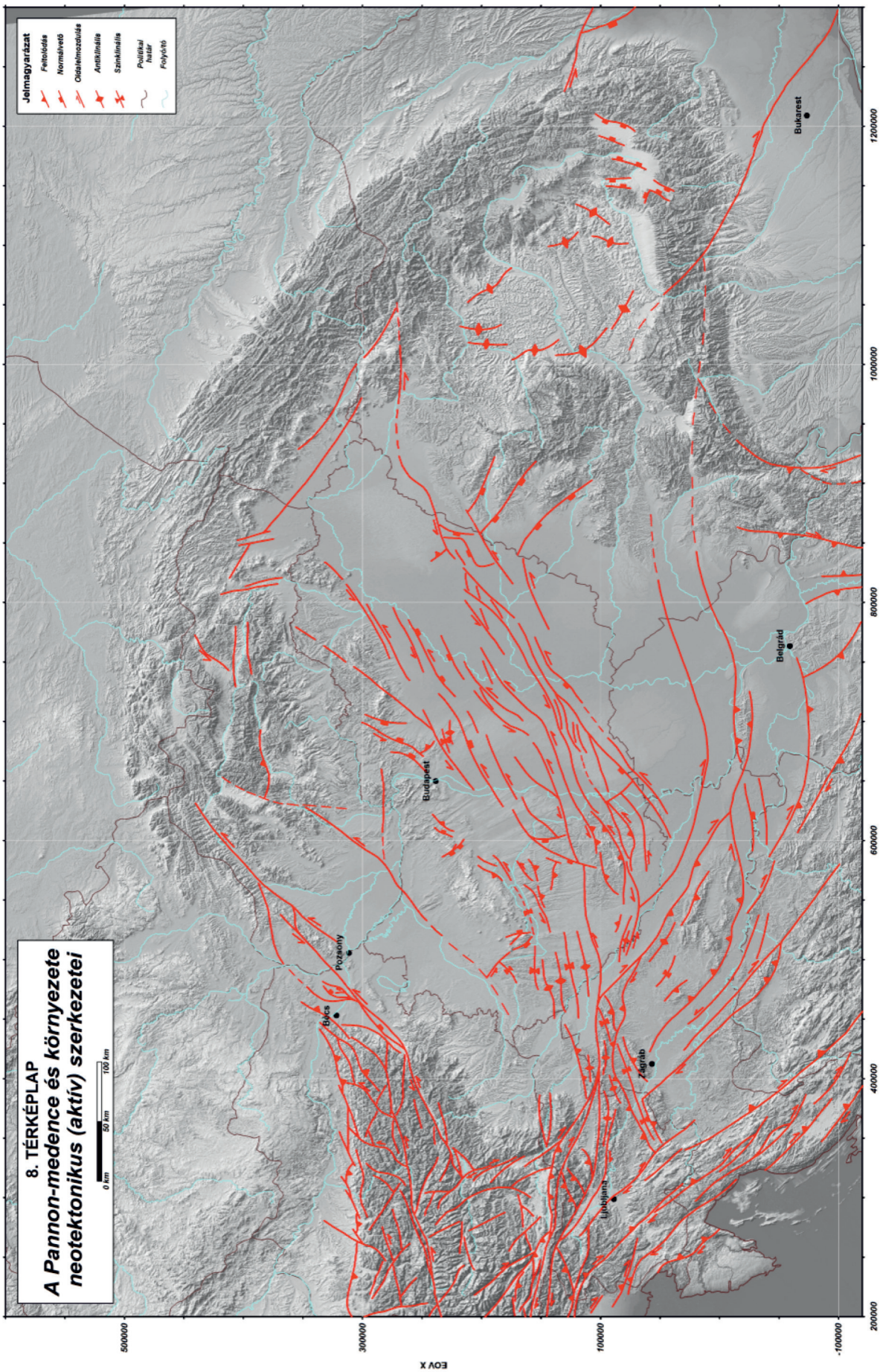
1 – Folyóvízi, tavi és eolikus üledékek (homok, kavics, agyag, lösz), 2 – Folyóvízi és tavi üledékek (homok, agyag), 3 – Selfperemi homok(kő) és agyag(márga), 4 – Selflejtő: agyag(márga) homokkő-betelepülésekkel, 5 – Mélymedence: homokkő (turbidites), agyagmárga, 6 –Mélymedence: márga, mészmárga, 7 – Változatos üledékek, vulkanitok

Figure 1. *Overview of the stratigraphy of the young (Sarmatian to Quaternary) basin fill of the Pannonian Basin in Hungary (based on the works of Sztanó et al. 2013a, b; Sztanó et al. 2016; Balázs et al. 2018) and the definition of the neotectonic phase (slightly modified after Koroknai et al. 2020)*

1 – Fluvial, lacustrine and eolic sediments (sand, gravel, clay, loess), 2 – Fluvial and lacustrine sediments (sand, clay), 3 – Shelf margine: sand(stone) and clay(marl), 4 – Shelf slope: clay(marl) with sandstone intercalations, 5 – Deep basin: sandstone (turbiditic) and clay(marl), 6 – Deep basin: marl, calcareous marl, 7 – Variable sediments, volcanites

Az említetteken kívül más modern szemléletű, országos léptékű neotektonikai áttekintés nem készült, ugyanakkor igen nagyszámú, egy-egy kisebb részterületre fókuszáló tanulmány látott napvilágot, amelyekre a felhasznált adatforrásoknál térünk ki (lásd *Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek*).

Végül hangsúlyozzuk, hogy a korábban publikált, országos léptékű neotektonikai térképek egyike mögött sem állt széleskörű, egységes módszertan alapján szisztematikusan értelmezett, digitális formátumú 2D–3D szeizmikus adatrendszer (vö. *3. ábra*). Ezenfelül az említett munkákban al-



2. ábra. HORVÁTH et al. (2006) neotektonikus térképe a Pannon-medence jelenkori geodinamikai atlaszának térképsorozatából

Figure 2. *The neotectonic map of* HORVÁTH *et al. (2006) published as an element of the Atlas of the present-day geodynamics of the Pannonian Basin*

kalmazott, a teljes Pannon-medencét átfogó lépték is hozzájárult ahhoz, hogy e térképek erősen egyszerűsített, sematikus neotektonikus vetőképet ábrázoltak. Fontos rámutatni, hogy a korábbi, sematikus vetőkép nemcsak az alkalmazott lépték következménye, hanem abban a térképek szerkesztése idején elérhető, korlátozott szeizmikus adatrendszer (jellemzően papíralapú 2D-szelvények), illetve a módszertani háttér is érdemi szerepet játszott.

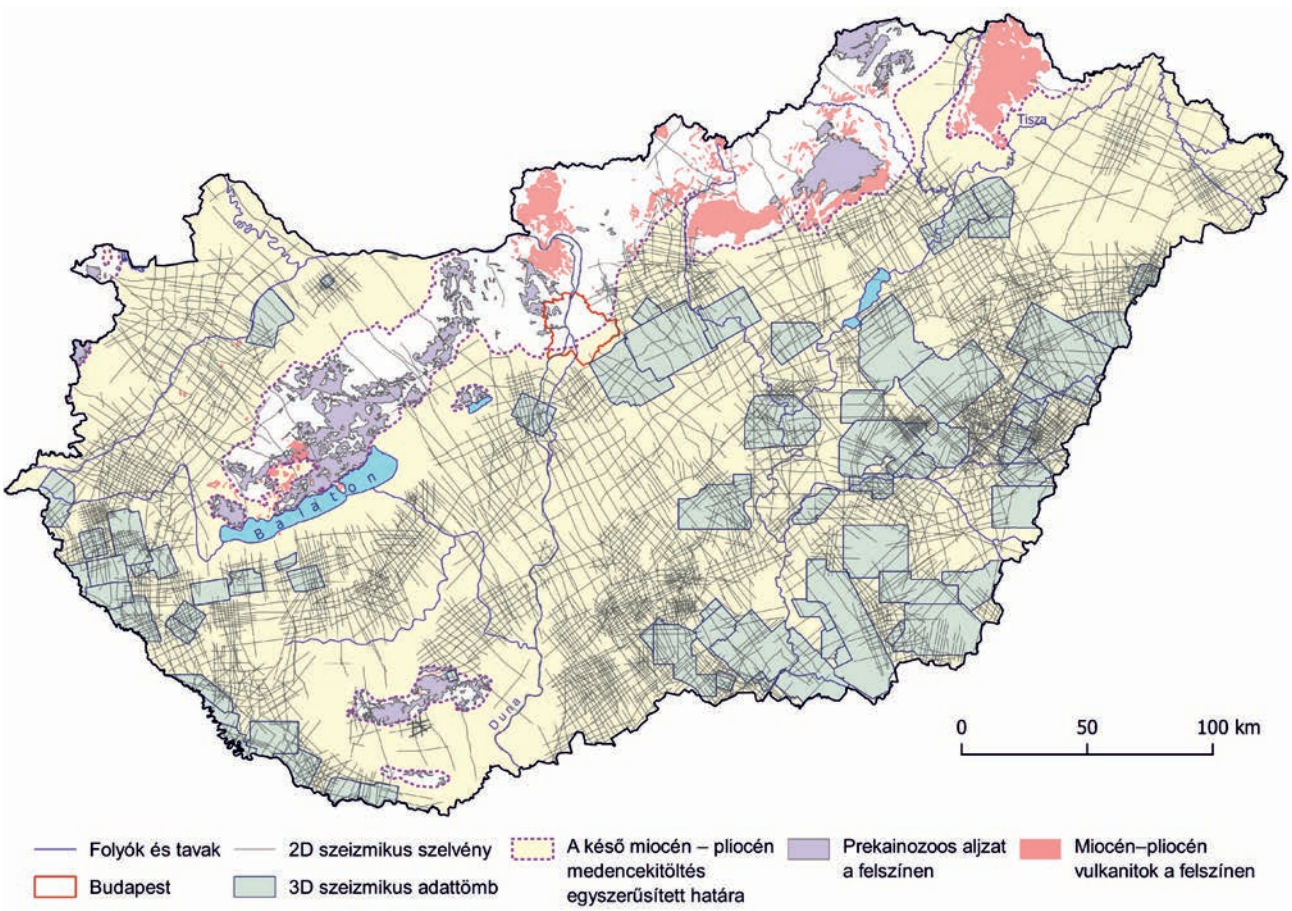
Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek

Az elvégzett országos térképezés alapját két fő adatforrás képezte.

1) A mintegy 2900 darab 2D reflexiós szeizmikus szelvényt és 70 darab 3D szeizmikus adattömböt integráló szeizmikus adatrendszer (*3. ábra*). Ezen adatrendszer az ipari adatok mellett tartalmazza az ország területén a Geomega Kft. által mért sokcsatornás és egycsatornás, nagy felbontású, vízi szeizmikus adatokat is (pl. Balaton, Duna, Tisza).

2) Az elérhető releváns, neotektonikai szakirodalmi adatok: Czakó & Zelenka 1981; Brezsnyánszky & Síkhegyi 1987; Pogácsás et al. 1989; Cserny & Corrada 1990; Fodor et al. 1994, 1999, 2005a, b; 2008; 2013a, b; Csontos 1995; Balla & Dudko 1996; Detzky 1997; Dudko 1997; Tóth & Horváth 1997; Horváth et al. 2006, 2009, 2019; Csontos & Nagymarosy 1998; Halouzka et al. 1998; Wórum 1999; Sacchi et al. 1999; Detzky et al. 2002; Korpás et al. 2002; Kováč et al. 2002; Lopes Cardozo et al. 2002; Síkhegyi 2002, 2008; Bada et al. 2003a-b, 2006, 2010; Tóth 2003; Wórum és Hámori 2004; Csontos et al. 2005; Magyari et al. 2004, 2005; Windhoffer et al. 2005; Juhász et al. 2007, 2013; Nádor et al. 2007; Ruszkiczay-Rüdiger et al. 2007, 2009; 2020; Fodor 2008; Kiszely 2008; Székely et al. 2009; Konrád & Sebe 2010; Bodor 2011; Dudás 2011; Nádor & Sztanó 2011; Várkonyi 2012; Petrovszki et al. 2012; Várkonyi et al. 2013; Kovács et al. 2015; Visnovitz et al. 2015; Petrik 2016; Loisl et al. 2018.

E tanulmányok a medence neoktektonikus szerkezeteit/jelenségeit és fejlődését igen változatos módszerekkel (űrfelvételek, légifotók és geomorfológiai adatok/adatrendszerek elemzése, szeizmikus elemzés, szeizmikus adatok és fúrási adatok együttes értékelése, geomorfológiai és terepi tektonikai vizsgálatok, illetve ezen módszerek különféle kombinációi) vizsgálták többnyire egy-egy kisebb részterületen vagy ritkán országos léptékben. Az elért eredmények és a felhasznált (gyakran integrált) módszertan (pl. mélyszerkezet és felszíni morfológia kapcsolatának vizsgálata geofizikai és geomorfológiai adatrendszerek felhasználásával) alapvető fontosságú és megbízható alapot jelentettek munkánk során. A hivatkozott tanulmányokban közölt neotektonikai térképeket georeferált formában a szeizmikus



3. ábra. A felhasznált 2D és 3D szeizmikus adatrendszer és az alapvető földtani jellemzők áttekintése (Koroknai et al. 2020 alapján)

Figure 3. *Overview of the 2D és 3D seismic database used in the project and basic geological features (based on Koroknai et al. 2020)*

2D–3D adatrendszerrel közös projektbe integráltuk, ami lehetővé tette mindezen adatok gyors és hatékony együttes kezelését és értékelését, illetve szükség szerinti kritikai újraértékelését. Ez utóbbi nem feltétlenül csak a neotektonikai ismereteket, hanem számos esetben az adott területről korábban közölt szerkezeti modell(eke)t is érintette.

A térképezés során a neotektonikai szakirodalmi adatokon túl ugyancsak a projektbe integráltunk számos országos vagy lokális skálájú szerkezeti és geofizikai térképet, amelyek a tektonikai értelmezésben, mindenekelőtt a fontosabb prepannóniai vetők kijelölésében fontos segítséget jelentettek (országos: FÜLÖP & DANK 1987; DANK & FÜLÖP 1990; FODOR et al. 1999, 2005c, 2008, 2013a, b; FODOR 2010; GYALOG & SÍKHEGYI 2005; KISS 2006; KISS & GULYÁS 2006; HAAS et al. 2010; lokális: NÉMEDI VARGA 1977; HETÉNYI et al. 1982; MATURA et al. 1998; KISS et al. 2001; CSONTOS et al. 2002; PALOTAI & CSONTOS 2010; TARI ÉS HORVÁTH 2010; ZÁMOLYI et al. 2010; PALOTAI et al. 2012; PALOTAI 2013; OLÁH et al. 2014; SOÓS 2017; PETRIK et al. 2018; HÉJA et al. 2018).

A szeizmikus értelmezés során alapvető célként tűztük ki a neotektonikus fázis tektonikus és atektonikus eredetű deformációinak

– egységes módszertan szerint történő, konzisztens meghatározását és országos térképezését (lásd még „*Ábrázolt térképi elemek*"),
– a korábbiaknál részletesebb (1:1 500 000 helyett 1:500 000) és pontosabb térképezését,
– a felszínközeli, valós vetőgeometria lehető legjobb ábrázolását az adott léptékben.

A szerkezeti értelmezés során kiemelt szerepet játszott a 70 db, összességében közel 18 000 km^2-nyi területet lefedő, 3D szeizmikus adattömb, amelyek mindegyikére elvégeztük a vonatkozó koherenciatömb kiszámítását. A koherenciatömbökből származó koherencia-időszeletek és a megfelelő szeizmikus szelvények együttes értelmezése/keresztkorrelációja a térképezett szerkezetek (vetők, vetőszegmensek) különösen megbízható azonosítását és korrelációját tette lehetővé (vö. WÓRUM et al. 2020, 5. illusztrációja). Az így kapott jellemző szerkezeti mintázatot és stílust figyelembe véve történt meg a 3D szeizmikus adattömbökhöz csatlakozó 2D szeizmikus háló értelmezése, ami összességében nagyobb területekre is koherens szerkezeti értelmezést tett lehetővé.

A térképezés során külön hangsúlyt fektettünk az elérhető országos geofizikai és geológiai adatrendszerekkel (pl. Bouguer-térkép – KISS 2006, ami egyben a térkép hátterét is képezi), valamint a különböző projektekből már rendelkezésre álló, térképezett szeizmikus horizontok szerkezeti trendjeivel való összhang megteremtésére. A szeizmikusan nem vagy csak gyengén fedett területek esetében mindenekelőtt a releváns szakirodalmi adatokat vettük figyelembe a szerkezetek térképi ábrázolása során.

Ez a módszertan lehetővé tette, hogy a korábbi eredmények integrálásával és (szükség esetén kritikai) értékelésével széles szakmai konszenzus kialakítása mellett születhessen meg a neotektonikus fázis deformációinak új, országos térképe. A térképszerkesztés módszertani hátterét bővebben KOROKNAI et al. (2020) munkája ismerteti.

Ábrázolt térképi elemek

Az új térképen olyan tektonikus és atektonikus eredetű szerkezeteket ábrázoltunk, amelyek a neotektonikus fázis (azaz az utolsó 6–8 millió év) során jöttek létre (*1. ábra*). E szerkezetek – vetők és redők – a szeizmikus anyagban megfelelően leképzett, legfiatalabb pannóniai rétegtani elemek (Zagyva/Újfalu Formáció) deformációját idézték elő. Sőt, helyenként az ezeket fedő és az ipari szeizmikus anyagokban megfelelő minőségben azonban csak ritkán leképzett negyedidőszaki üledékeket is deformálták (POGÁCSÁS et al. 1989, DETZKY 1997, TÓTH & HORVÁTH 1997, DETZKY et al. 2002, MAGYARI et al. 2005, FODOR 2008, HORVÁTH et al. 2019).

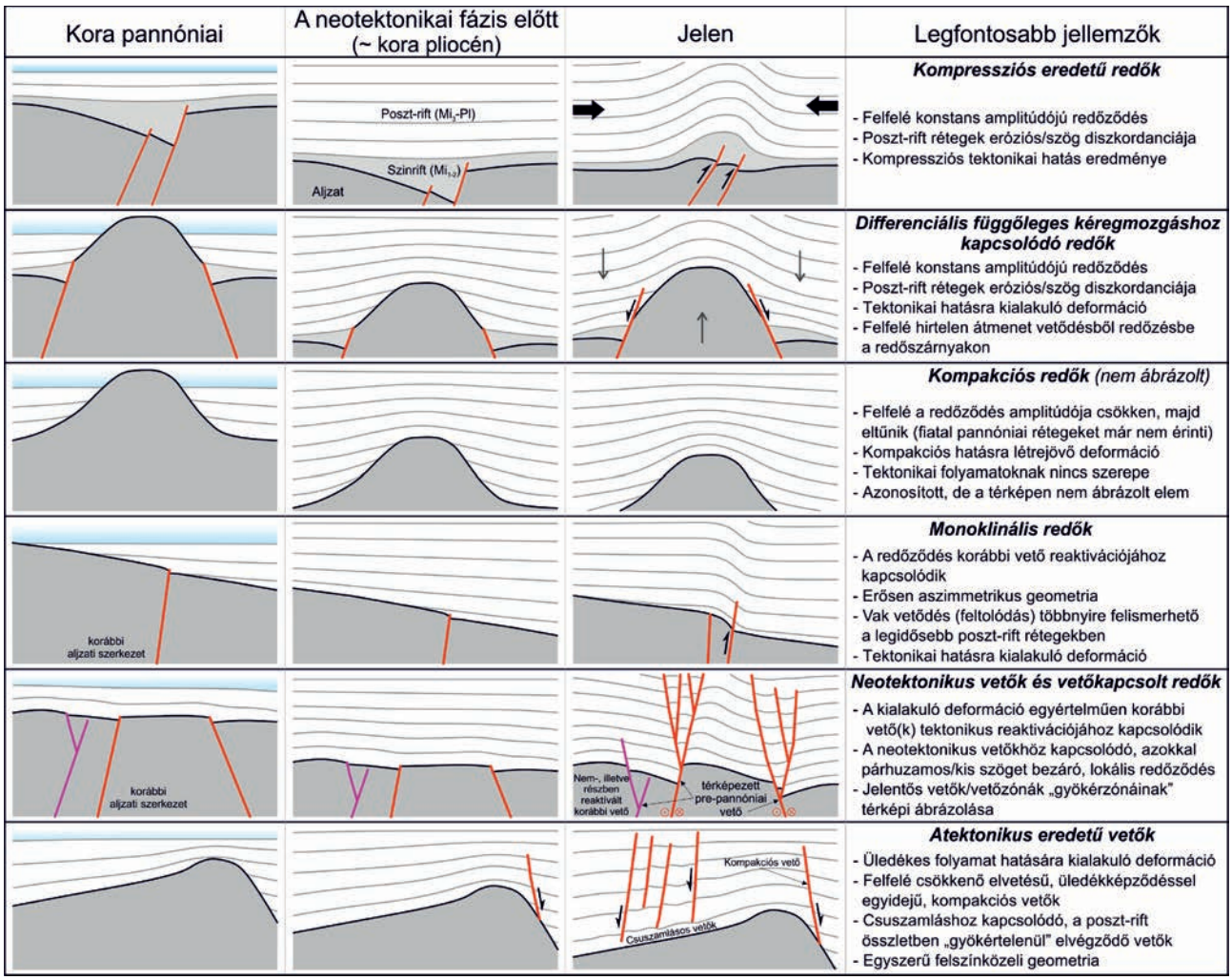
Az alábbiakban a térképezés során elkülönített és ábrázolt szerkezeti elemeket tekintjük át röviden, bemutatva ezen elemek vázlatos fejlődési sémáját és legfontosabb elkülönítő bélyegeit (*4. ábra*).

Vetők

A sekély mélységbe hatoló vetők közt három fő csoportot különítettünk el:

Meglévő vetők felújulásához kapcsolódó tektonikus vetők („klasszikus" neotektonikus vetők; a térképen fekete színnel jelölve). Szeizmikus szelvényen egyik legfontosabb ismérvük a fiatal üledékekben megjelenő bonyolult, felfelé szétágazó, eltolódáshoz kapcsolódó virágszerkezet, illetve a hasonló geometriai megjelenésű, de genetikailag normálvető(k)höz/konjugált normálvetőkhöz kapcsolódó szerkezetek. A szeizmikus szelvényeken továbbá a felújult, idősebb (többnyire a kora és középső miocén medenceképződéshez kapcsolódó) vetők is többnyire jól azonosíthatók, amelyekhez a sekély vetők mint „mélybeli gyökérhez" kapcsolódnak (*4. ábra*: 5. sor).

Kompakciós vagy csuszamlásos eredetű, atektonikus vetők (a térképen lila színnel; *4. ábra*: 6. sor). Ezek képződése nem (vagy csak indirekt módon) kapcsolódik már létező vetők reaktivációjához, a vetőműködést alapvetően gravitációs (esetleg szeizmológiai) hatás váltotta ki, ugyanakkor általában érintik a pannóniai rétegsor legfiatalabb elemeit (Zagyvai/Újfalui Fm.). A *csuszamlásos vetők* könnyen azonosíthatók a „gyökértelen" jellegük alapján, hiszen ezek lefelé haladva elhalnak a pannóniai rétegsorban, mielőtt elérnék a pannóniai talpi elsőrendű unkonformitást. E vetőket csapás mentén több helyen is vizsgáltuk, hogy a lefelé elvégződő jelleg megfelelő biztonsággal megállapítható legyen. Ilyen vetőkre jellegzetes példák ismertek a Kelet-Alföldön Komádi környékén (KOROKNAI et al. 2020, fig. 5.). A *kompakciós vetők* jellemzően aljzati magaslatok peremén jelentkeznek, ahol markánsan eltérő üledékvastagság és ennek következtében eltérő kompakció alakult ki a magaslat és a szomszédos medence felett. Csapás mentén jellemzően viszonylag rövid és egyszerű geometriájú (nem „virágszerkezetű") elemeket alkotnak, tipikus példái az Algyői-hát délnyugati peremén jelennek meg (WÓRUM et al. 2020). Ugyanakkor a kompakciós vetők azonosítása nem minden esetben egyértelmű.



4. ábra. Az új térképen ábrázolt szerkezeti elemek és azok vázlatos fejlődésének áttekintése (Koroknai et al. 2020 alapján)
Figure 4. *Overview of the mapped structural elements and their schematic genetic evolution (based on Koroknai et al. 2020)*

Bizonytalan/vitatott eredetű vetők: ezek esetében a tektonikus vagy atektonikus (kompakciós) eredet nem dönthető el egyértelműen, a szakirodalomban gyakran eltérő a megítélésük (vö. Horváth et al. 2006, 2009; Balázs et al. 2018). Az idesorolt vetők jellemzően aljzati magaslatok felett jelennek meg többnyire jellegzetes „virágszerkezettel", ám csapásirányban a medence felé haladva általában eltűnnek. A térképen e vetőket barna színnel jelenítettük meg. E vetők egy részénél a „vegyes" genetika is lehetséges, azaz tektonikus és kompakciós hatások is hozzájárulhattak jelen formájuk kialakulásához.

A sekély mélységbe hatoló vetők ábrázolása során a vonatkoztatási szint medencék esetében jellemzően kb. 0,5 s volt valamennyi vetőtípusra, míg a medenceperemek esetében 0,2–0,3 s, tekintetbe véve a rendelkezésre álló szeizmikus adatrendszer minőségi adottságait (hiányos vagy többnyire igen gyenge minőségű szeizmikus leképezés a felső 0–0,4 s TWT időtartományban).

Prepannónai vetők

A neotektonikus fázishoz kapcsolódó vetők és redők ábrázolása mellett a térkép fontos szakmai újdonsága a jelentősebb *prepannónai vetők* együttes és országos megjelenítése a felújulásuk során létrejövő új, sekély mélységbe hatoló neotektonikus vetőkkel. A jelentősebb prepannónai vetők (függetlenül azok neotektonikus felújulásától) országos ábrázolását a rendelkezésre álló szeizmikus anyag, a Bouguer-anomália-térkép és a szakirodalmi adatok együttes felhasználása tette lehetővé. Így a vetők országos szintű, egységes szemlélettel készült ábrázolása mind a részletesség, mind az alkalmazott módszertan szempontjából felülmúlja a korábbi országos szintű földtani, szerkezeti és aljzattérképek prepannóniai vetőmintáit (Fülöp & Dank 1987, Dank & Fülöp 1990, Haas et al. 2010, Kövér et al. 2018), továbbá Fodor (2010) tanulmányát, valamint kisebb területek hasonló koncepciójú neotektonikai bemutatását (Matura et al. 1998; Csontos et al. 2005; Ruszkiczay-Rüdiger et al. 2007, 2009; Fodor et al. 2008; Palotai 2013; Petrik 2016).

A prepannónai vetők a sekély mélységbe hatoló neotektonikus vetők szerkezeti fundamentumainak („gyökereinek") tekinthetők (*4. ábra*: 5. sor). Képződésük többnyire a kora és középső miocén extenzióhoz kapcsolódik, de néhány esetben a riftesedésnél korábbi eredetet igazolható (pl. Balaton–Tóalmási- és a teljes Közép-magyarországi-zóna;

BALLA 1984, 1988; CSONTOS & NAGYMAROSY 1992). E „gyökérzónákat" a térképen halványszürke színnel jelenítettük meg. Ábrázolásuk – akárcsak a térkép hátterét képező Bouguer-anomália-térkép – fontos segítséget nyújt az egyes neotektonikus vetők és vetőrendszerek lokális és regionális szerkezeti kontextusának áttekintésében. Fontos kiemelni, hogy a „gyökérzónák" térképi megjelenítése nem köthető valamely konkrét rétegtani horizonthoz (pl. pannóniai összlet bázisa), mivel e „gyökerek" (azaz az egyedi, komplex geometriájú vetőfelületek egyetlen, közös felületbe simulása; *4. ábra*: 5. sor) mélységi és sztratigráfiai helyzete még egy adott vetőn/vetőzónán belül is számos esetben változik csapás mentén.

A térképen az ismertetett valamennyi vetőtípus esetén két minősítő kategóriát (jól vagy gyengén ismert) alkalmaztunk a vetők ismertségi fokának figyelembevételével. E kategóriákat térképileg folytonos vagy szaggatott vonalakkal jelenítettük meg.

Redők

A pannóniai rétegsor legmagasabb helyzetű képződményeit érintő redők az alábbi főbb kategóriákba sorolhatók:

Kompressziós eredetű redők (*4. ábra*: 1. sor). E csoportba tartoznak a „klasszikus", jellemzően nagy hullámhosszú (5–20 km), a maximális rövidülés irányára jellemzően merőleges tengelyű redők. Ez a típusú redőződés szerkezetileg korábbi normál vetők vak feltolódásként történő reaktivációjához kapcsolódik. Ilyen redők mindenekelőtt Nyugat- és Délnyugat-Magyarországon jellemzőek (Zala, Somogy; pl. budafai és lovászi antiklinálisok; HORVÁTH & RUMPLER 1984; CSONTOS et al. 2005; FODOR et al. 2005a, b).

Monoklinális redők (*4. ábra*: 4. sor). E redők a pannóniai rétegsorba nem, vagy csak annak alsó részébe felhatoló fel/rátolódások felett kialakuló, jellegzetesen aszimmetrikus redők. A mélybeli fel/rátolódás nem új, a neotektonikus fázis során létrejött szerkezet, hanem már létező, prepannóniai vető reaktivációjának következménye. Az ilyen típusú redők viszonylag ritkák, főként Nyugat- és Délnyugat-Magyarországon fordulnak elő (Zala, Somogy, Mecsek; l. FODOR et al. 2013a).

Vetőkapcsolt redők (*4. ábra*: 5. sor). E redők képződése a „klasszikus" neotektonikus vetőkhöz kapcsolódik (pl. RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2007, 2009; VISNOVITZ et al. 2021), amelyek kialakulásukat és geometriájukat egyaránt meghatározzák. Többnyire kis hullámhossz (néhány száz métertől max. néhány kilométerig) jellemzi őket, tengelyük párhuzamos vagy kis szöget zár be (gyakran kulisszás geometriával) a létrehozó vetővel/vetőkkel. Az ilyen gyűrődések amplitúdója is lényegesen kisebb, mint a kompressziós eredetű vagy a differenciális függőleges kéregmozgásokhoz kapcsolódó redőké. A térképezett redők közt ez a leggyakoribb redőtípus, amely az országban lényegében mindenhol (így például a Zagyva-árok területén is; *10. ábra*) előfordul.

Differenciális függőleges kéregmozgásokhoz kapcsolódó redők (*4. ábra*: 2. sor; *5. ábra*). E redőtípus azonosítása az elvégzett térképezéshez kötődik. E redők hullámhossz és amplitúdó tekintetében is a kompressziós eredetű redőkkel vethetők össze, azonban azoktól eltérő genetikájúak, hiszen létrejöttükben a függőleges kéregmozgások játszanak szerepet értelmezésünk szerint (lásd *Neotektonikus redők és a felszíni morfológia kapcsolata*). Ilyen típusú redőket a Dunántúl északnyugati részén (Kisalföld) azonosítottunk a szeizmikus anyagban.

A differenciális függőleges kéregmozgásokhoz kapcsolódó redők esetében a redőződés amplitúdója a rétegsorban felfelé haladva csak kismértékben vagy egyáltalán nem csökken. Ezzel szemben az első pillantásra igen hasonló geometriájú kompakciós redők (*4. ábra*: 3. sor) esetében a rétegsorban felfelé haladva a redőződés amplitúdója fokozatosan csökken, majd egy adott szint felett a redőződés megszűnik (*5. ábra*). Ebből következően a kisalföldi redők – megítélésünk szerint – nem tekinthetők kompakciós eredetű redőknek, hiszen a gyűrődés a szeizmikusan leképezett, magas rétegtani helyzetű pannóniai szinteket is egyértelműen érinti, sőt helyenként felszínt is érintő megnyilvánulása is valószínűsíthető (vö. *Neotektonikus redők és a felszíni morfológia kapcsolata*, *9. ábra*). A kompakciós redőket, tekintettel a pannóniai rétegsor fiatal elemeit általában már nem érintő jellegére és atektonikus eredetükre, azonosítottuk, de a térképen nem ábrázoltuk.

A redőtengelyek térképi ábrázolása során a vonatkoztatási szintet valamennyi elkülönített redőkategória esetén az a pannóniai szeizmikus horizont jelentette, amelyben a redőződés még egyértelműen és laterálisan is jól követhetően azonosítható volt.

Főbb eredmények

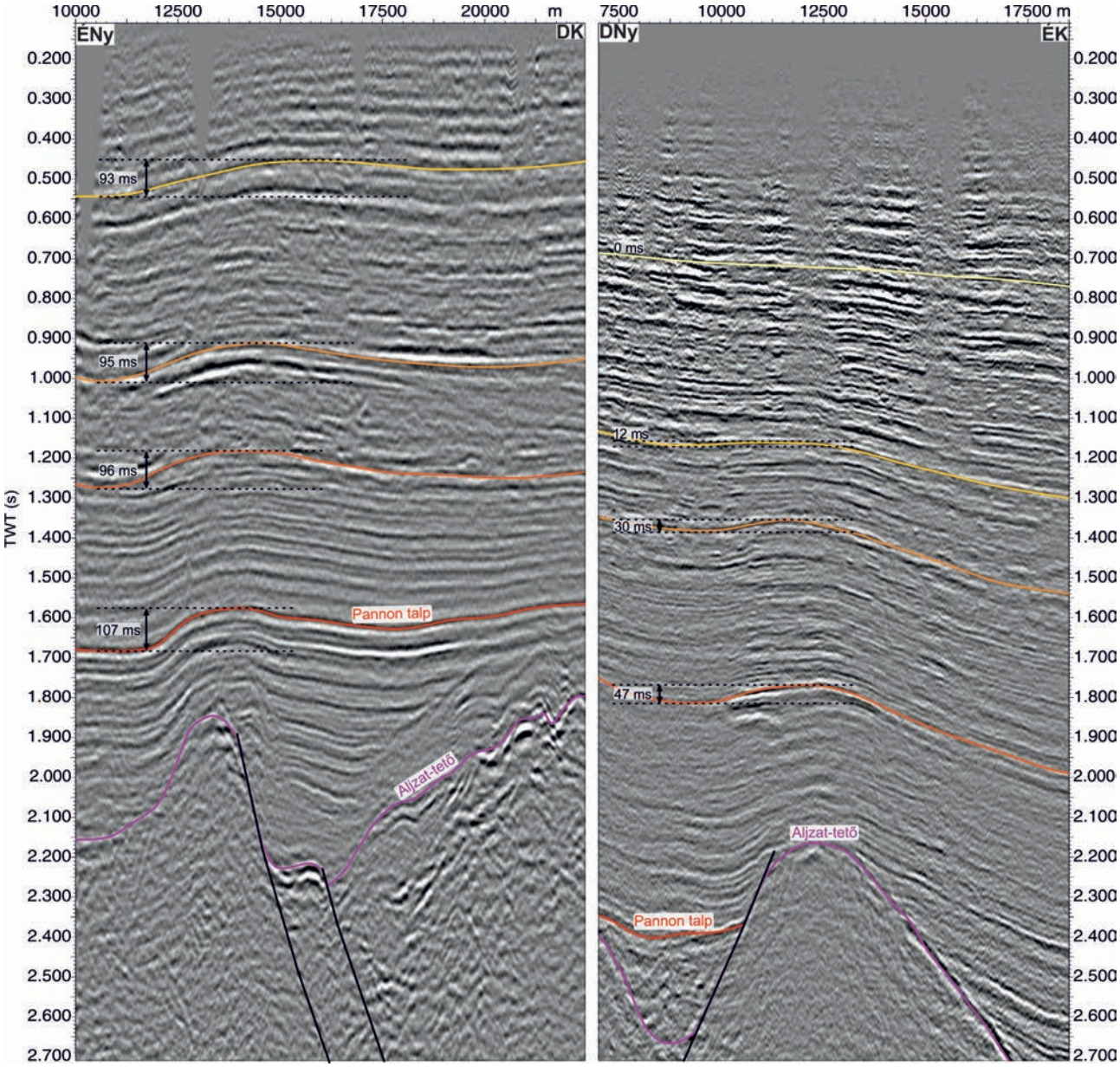
Neotektonikai szerkezeti kép

Az elvégzett térképezés legfontosabb eredménye a neotektonikus fázis során létrejött, sekély mélységbe hatoló szerkezeteknek (vetők, redők) a korábbiaknál lényegesen részletesebb és pontosabb ábrázolása (WÓRUM et al. 2020). Így a korábbi, alapvetően sematikus jellegű (lásd *Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek*), országos neotektonikus vetőkép helyett olyan új tektonikai adatrendszer született meg az ország területére, amely a jövőben mind ipari felhasználási szempontból (pl. geotermia, szénhidrogénkutatás), mind tudományos kutatási szempontból (pl. modellezés) fontos előrelépést jelent. Az új és a korábbi eredmények térképi összevetését részleteiben KOROKNAI et al. (2020) munkája mutatja be.

Ugyancsak fontos előrelépés a jelentősebb prepannóniai mélyszerkezetek („gyökérzónák") együttes és országos ábrázolása a neotektonikus vetőkkel. Az előbbiek megjelenítése (a neotektonikus felújulástól függetlenül) a lokális és regionális szerkezeti kontextus, illetve a neotektonikus reaktiváció térbeliségének jobb áttekintését segíti elő.

A neotektonikus vetők és a mélyszerkezet kapcsolata

Az új térképen ábrázolt fiatal, felszín közeli vetők döntő többsége tektonikus eredetű, azaz „klasszikus" neotektoni-

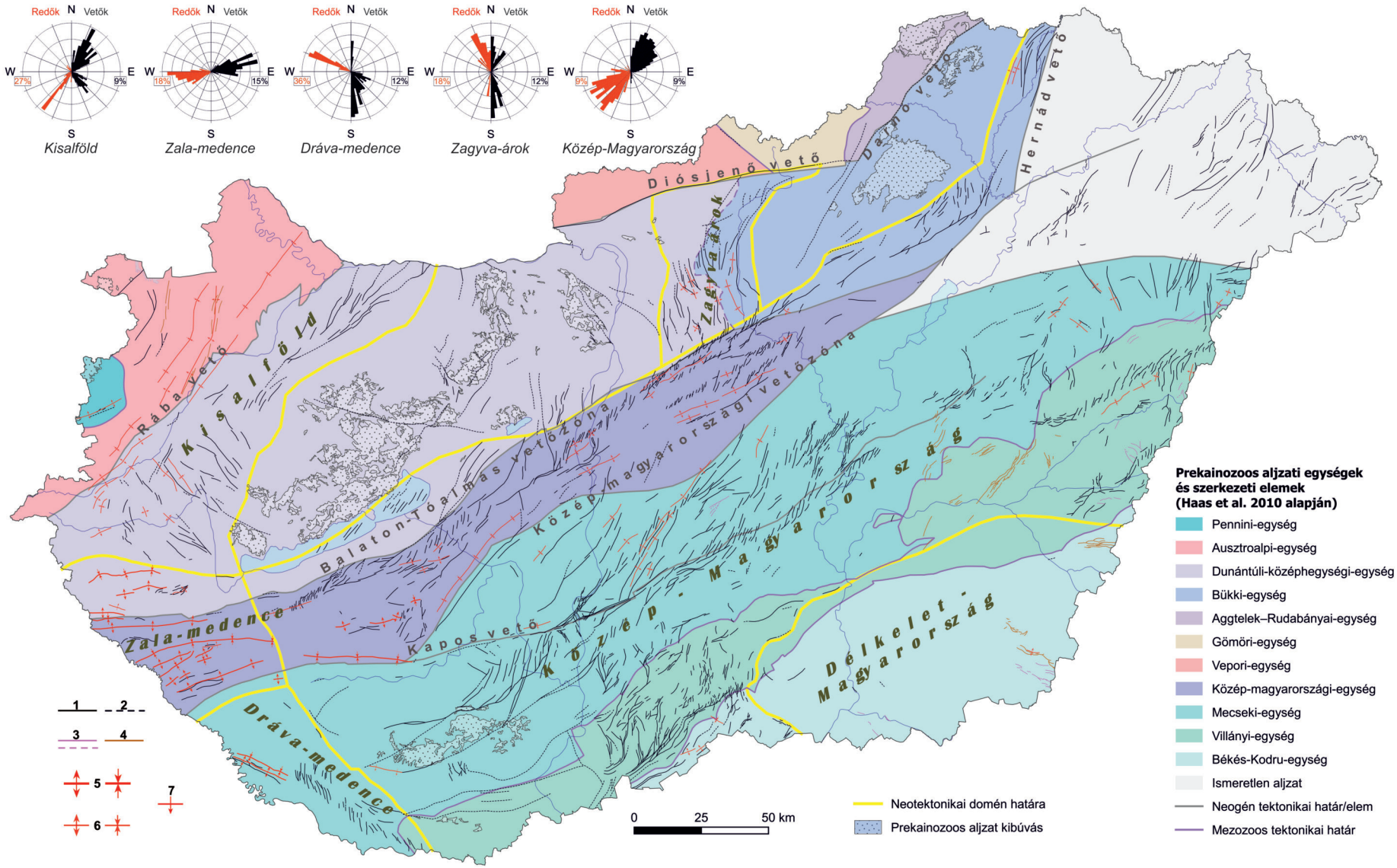


5. ábra. Differenciális függőleges kéregmozgáshoz kapcsolódó redő (DNy-Kisalföld, balra) és kompakciós redő (Algyői-magaslat, DK-Nagyalföld, jobbra) összehasonlítása (azonos függőleges és horizontális skála). Jól megfigyelhető az eltérő jellegű (konstans vs. felfelé csökkenő), függőleges irányú redőamplitúdó mintázat. Narancssárga és sárga vonalak: pannóniai markerhorizontok (Koroknai et al. 2020 alapján)

Figure 5. *Differential vertical motion-related fold from the SW Danube basin (left) compared to the drape-over anticline above the Algyő high (SE Great Hungarian Plain; right; identical horizontal and vertical scale). Note the strikingly different vertical pattern of fold amplitudes (constant vs. upward diminishing). Orange and yellow lines indicate arbitrary, Pannonian marker horizons (based on Koroknai et al. 2020)*

kus vetőnek tekinthető (a térképen fekete színnel jelölve). Megítélésünk szerint a bizonytalan/vitatott eredetű vetők (a térképen barna színnel jelölve) uralkodóan szintén tektonikus eredetűek. E neotektonikus vetők egyedileg és összességükben is igen szoros korrelációt mutatnak a mélyszerkezetek, azaz az ábrázolt „gyökérzónák" irányítottságával, amit a más, releváns munkákkal való összevetés is egyértelműen igazol (pl. Haas et al. 2010; *6. ábra*). Mindezek alapján – összhangban a korábbi véleményekkel (pl. Tari 1994; Fodor et al. 2005a, b) – megállapítható, hogy a neotektonikus vetők egyértelműen korábbi szerkezetek felújulásához kapcsolódnak. Más szavakkal a neotektonikus vetőképet egyértelműen a korábbi tektonikai események során létrejött prepannóniai vetők határozzák meg. Ebből adódóan a neotektonikus vetőképben jelentkező, markáns irányítottságbeli különbségek egyúttal a mélybeli kontrolláló vetőrendszerek („gyökérzónák") eltérő irányítottságát is jelzik (lásd pl. Zagyva-árok és környezete, Dráva-medence és környezete).

A mélyszerkezet és a neotektonikus vetők elválaszthatatlan kapcsolata mellett fontos rámutatni arra is, hogy a legmarkánsabb neotektonikus reaktivációt mutató zónák csak részben kapcsolódnak prekainozoos nagyszerkezeti határokhoz, amelyek első közelítésben reológiai szempontból fontos kéreggyengeségi zónáknak foghatók fel. Ilyen mar-


Redők N Vetők
W E
S
27%
9%
Kisalföld
18%
15%
Zala-medence
36%
12%
Dráva-medence
18%
12%
Zagyva-árok
9%
9%
Közép-Magyarország
Diósjenő vető
Darnó vető
Hernád vető
Rába vető
Kisalföld
Zagyva árok
Balaton-Tóalmás vetőzóna
Középmagyarországi vetőzóna
Kaposvető
Zala-medence
Közép-Magyarország
Délkelet-Magyarország
Dráva-medence
1
2
3
4
5
6
7
0
25
50 km
Neotektonikai domén határa
Prekainozoos aljzat kibúvás
Prekainozoos aljzati egységek
és szerkezeti elemek
(Haas et al. 2010 alapján)
Pennini-egység
Ausztroalpi-egység
Dunántúli-középhegységi-egység
Bükki-egység
Aggtelek–Rudabányai-egység
Gömöri-egység
Vepori-egység
Közép-magyarországi-egység
Mecseki-egység
Villányi-egység
Békés-Kodru-egység
Ismeretlen aljzat
Neogén tektonikai határ/elem
Mezozoos tektonikai határ

káns neotektonikus reaktivációt mutató, nagyszerkezeti szempontból is kiemelt jelentőségű vetőzóna a Balaton–Tóalmás-zóna. Ezzel szemben az országos viszonylatban kiemelkedő neotektonikus aktivitással jellemezhető Kelet-Kapos-vetőzóna (*sensu* Horváth et al. 2019) vagy a Derecskei-vetőzóna nem kapcsolódik nagyszerkezeti határhoz, azok a Tiszai-főegység Mecseki- és Villányi-alegységén belül helyezkednek el (*6. ábra*). Ezek a megfigyelések arra engednek következtetni, hogy a neotektonikai fázis során reaktiválódott vetőzónák jelentős része nem a Tiszai-főegység ma ismert szerkezeti elrendeződését létrehozó késő mezozoos szerkezetalakulás során, hanem annál fiatalabb szerkezeti események (jelentős részben a kora és középső miocén riftesedés) során jött létre új vetőként.

Neotektonikai domének

Az új térkép alapján az országban a neotektonikai szerkezeti irányítottságban és/vagy deformációs stílusban egymástól markánsan különböző területek különíthetők el, amelyeket neotektonikai doméneknek nevezünk. Ezeket a *6. ábra* mutatja be Magyarország nagyszerkezeti egységeire (Haas et al. 2010 alapján) vetítve. Az ábra az elkülönített domének (Kisalföld, Zala-medence, Dráva-medence, Zagyva-árok, Közép-Magyarország és Délkelet-Magyarország domének) neotektonikus vető és redő iránystatisztikáit is feltünteti, ami még jobban kiemeli az egyes domének közti eltéréseket, továbbá jól szemlélteti a neotektonikus vetők és a mélyszerkezetek kapcsolatára megelőzően tett megállapításokat is. A *6. ábrán* szereplő iránystatisztikák a szeizmikusan nem vagy csak gyengén lefedett, így viszonylag kisszámú adattal jellemezhető hegyvidéki területeket (Dunántúli-középhegység, Északi- középhegység) nem foglalják magukba.

Országos áttekintésben figyelemre méltó, hogy a kiemelkedően jó szeizmikus fedettséggel rendelkező délkelet-alföldi régió (Délkelet-Magyarország domén) neotektonikai aktivitás szempontjából lényegében inaktívnak tekinthető (a *6. ábra* iránystatisztikái között e domén épp ezért nem is jelenik meg). Az igen alárendelt neotektonikai aktivitás tektonikai-geodinamikai háttere jelenleg még nem kellően értett. Lehetséges magyarázatul szolgálhat az igen vastag (7 km-t is elérő) negyedidőszaki–neogén üledékes összlet jelenléte, amelyen a neotektonikus reaktiváció a prepannóniai gyökérzóna menti, viszonylag korlátozott mértékű elmozdulás (<0,7–1,8 km; vö. Hatem et al. 2017) következtében nem képes áthatolni. Más mélymedence-területek (pl. a már említett Derecskei-árok) ezt a magyarázatot annyiban árnyalják, hogy ott a neotektonikus reaktiváció szempontjából kedvező irányítottságú (lásd *A neotektonikus vetőkép kinematikai értelmezése*, és *10. ábra*), a prepannóniai gyökérzóna mentén mindenképp jelentősebb elmozdulásnak kellett történnie, hisz a fiatal pannóniai üledékekben markáns virágszerkezetek jelentkeznek.

Az igen vastag negyedidőszaki–neogén üledékes összlet mellett a Délkelet-Magyarország domén „inaktivitásához" ugyancsak hozzájárulhatott a neotektonikus reaktiváció szempontjából kedvezőtlen ÉNy–DK-i szerkezeti irányítottság, amely lényegében merőleges a meghatározott maximális horizontális főfeszültség irányára, valamint a feltételezhetően kisebb alakváltozási ráta is (Porkoláb et al. 2023a; Koroknai et al. 2023b).

A továbbiakban néhány reprezentatív példa bemutatásával a neotektonikai domének jelentősebb eredményeit tekintjük át röviden. Az egyes domének szerkezeti jellemzőinek részletes bemutatása és elemzése Koroknai et al. (2020) munkájában található.

A neotektonikus Közép-magyarországi szerkezeti öv

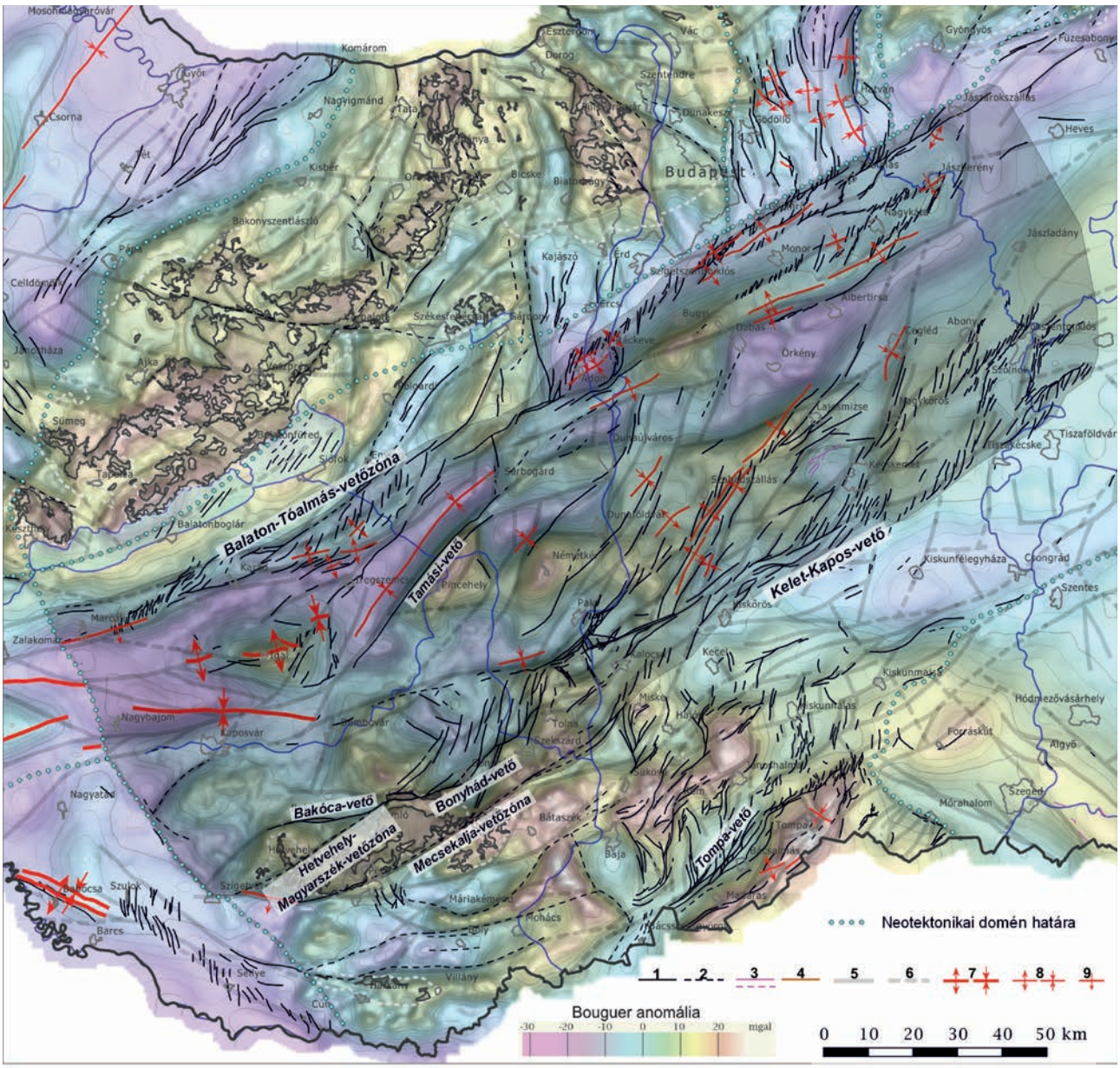
A legnagyobb területi kiterjedésű Közép-Magyarország domén (*6. ábra*) északi részén egy regionálisan is kiemelkedő jelentőségű, markáns neotektonikus szerkezeti reaktivációt mutató zóna (továbbiakban: neotektonikus Közép-magyarországi szerkezeti öv) helyezkedik el. Ez a neotektonikus szerkezeti öv prekainozoos aljzatban déli irányban jócskán túlterjed az intenzív késő paleogén – kora miocén nyírást (eltolódást) szenvedett (Balla 1984, 1988; Csontos et al. 1992; Csontos & Nagymarosy 1998; Fodor et al. 1998), ún. „Közép-dunántúli-egységen" (Haas et al. 2010; vö. *6.* és *7. ábrák*), és magába foglalja a Tiszai-főegység északi részét is (Közép-magyarországi mobil öv *sensu* Juhász et al. 2013). Ebben az ÉNy–DK-i irányban mintegy 60–80 km szélességű és (K)ÉK–(Ny)DNy-i csapás mentén mintegy 250 km hosszúságban követhető tektonikus övben a szeizmikus anyagban markánsan jelentkező neotektonikus oldalmozdulások történtek a KÉK–NyDNy-i csapású Kelet-Kapos és a Balaton–Tóalmás-vetőzóna között (az utóbbi legújabb eredményeiért lásd Visnovitz et al. 2021). Az öv korábbi részletes neotektonikai elemzései az Alföld területéről (Pogácsás et al. 1989, Detzky 1997, Detzky et al. 2002, Juhász et al. 2013), továbbá az öv északi részéről (Ruszkiczay-Rüdiger et al. 2007, 2009; Palotai & Csontos 2010) származnak. Térképezési eredményeink és a közelmúltban Paks-II tágabb környezetében elvégzett komplex geológiai-geofizikai kutatás eredményei (Horváth et al. 2019) alapján a zóna Ny–DNy-i irányú kiterjesztése indokolt lényegében a Mecsek hegység nyugati pereméig és északon kb. Marcali vonaláig (*7. ábra*).

← **6. ábra.** A neotektonikai domének (határaik: sárga vonal) áttekintése (Koroknai et al. 2020 alapján), háttér: Magyarország nagyszerkezeti egységei (Haas et al. 2010 alapján). A rózsadiagramok az egyes domének neotektonikus szerkezeteinek jellemző irányeloszlását mutatják

Fiatal (<6–8 Mév) tektonikus és atektonikus vetők [1–4]: 1 – neotektonikus vető, 2 – valószínűsített neotektonikus vető, 3 – csuszamlásos vagy kompakciós eredetű vető (bizonyított/feltételezett), 4 – bizonytalan/vitatott eredetű vető. Neotektonikus redők: [5–7]: 5 – kompressziós antiklinális/szinklinális, 6 – differenciális függőleges kéregmozgásokhoz kapcsolódó vagy vetőkapcsolt antiklinális/szinklinális, 7 – monoklinális redő (vak vetőhöz kapcsolt)

← ***Figure 6.*** *Overview of the defined neotectonic domains (yellow lines indicate domain boundaries; based on Koroknai et al. 2020) with the major tectonic units of the pre-Cenozoic basement (after Haas et al. 2010). Rose charts show the orientation distributions of various neotectonic structures within the domains*

Young (<6–8 Ma) tectonic and atectonic faults [1–4]: 1 – near-surface manifestation of the reactivation of pre-Pannonian fault, 2 – poorly constrained near-surface manifestation of the reactivation of pre-Pannonian fault, 3 – slump or compaction-related faults (proven/suspected), 4 – faults of uncertain/debated origin. Neotectonic folds [5–7]: 5 – compression-related anticline/syncline, 6 – uplift or fault-related anticline/syncline, 7 – blind faulting-related monoclinal fold



7. ábra. A neotektonikus Közép-magyarországi szerkezeti öv (szürke árnyékolású poligon) helyzete a főbb vetőkkel/vetőzónákkal (KOROKNAI et al. 2020 alapján). Fiatal (<6–8 Mév) tektonikus és atektonikus vetők [1–4]: 1 – neotektonikus vető, 2 – valószínűsített neotektonikus vető, 3 – csuszamlásos vagy kompakciós eredetű vető (bizonyított/feltételezett), 4 – bizonytalan/vitatott eredetű vető. Jelentősebb prepannóniai „gyökérzónák" [5–6]: 5 – prepannóniai vető, 6 – valószínűsített prepannóniai vető. Neotektonikus redők: [7–9]: 7 – kompressziós antiklinális/szinklinális, 8 – differenciális függőleges kéregmozgásokhoz kapcsolódó vagy vetőkapcsolt antiklinális/szinklinális, 9 – monoklinális redő (vak vetőhöz kapcsolt). Bouguer-anomália-háttér: KISS (2006) adatai alapján; szintvonalköz: 2 mgal

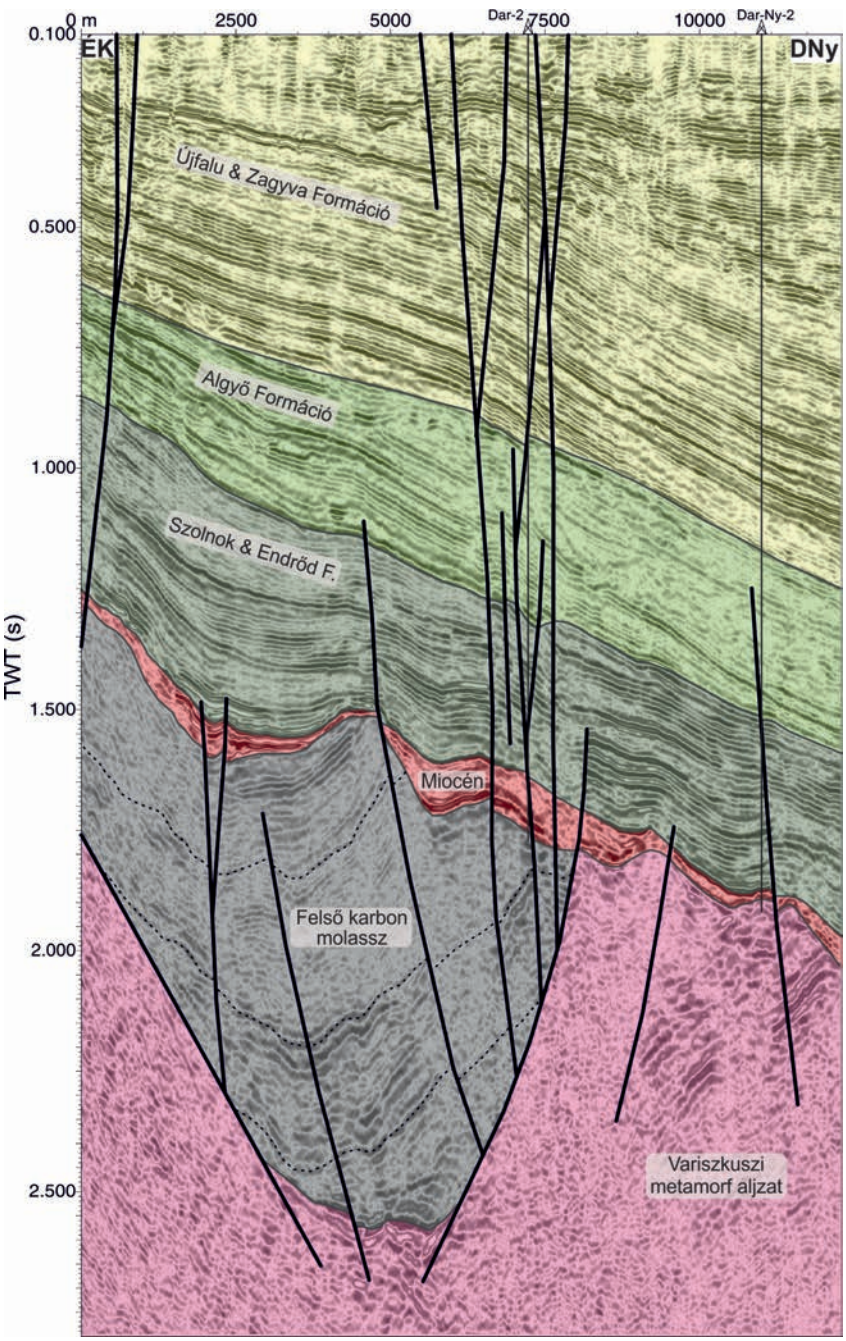
Figure 7. *The position of the neotectonic Mid-Hungarian belt (shaded gray polygon) indicating main faults/fault zones (based on KOROKNAI et al. 2020). Young (<6–8 Ma) tectonic and atectonic faults [1–4]: 1 – near-surface manifestation of the reactivation of pre-Pannonian fault, 2 – poorly constrained near-surface manifestation of the reactivation of pre-Pannonian fault, 3 – slump or compaction-related faults (proven/suspected), 4 – faults of uncertain/debated origin. Important pre-Pannonian „roots" [5–6]: 5 – Pre-pannonian fault, 6 – poorly constrained pre-Pannonian fault. Neotectonic folds [7–9]: 7 – compression-related anticline/syncline, 8 – uplift or fault-related anticline/syncline, 9 – blind faulting-related monoclinal fold. Bouguer-anomaly background using the data of KISS (2006); contour lines by 2 mgal*

Ennek értelmében szintén ehhez az övhöz tartozik Paks-tól délnyugatra az ún. Bonyhád-vetőzóna, amely a Mecsek Északi Pikkelyzónájába csatlakozik. Ugyancsak a neotektonikus szerkezeti öv részét képezi értelmezésünk szerint a Mecsekben a Bakóca- és a Hetvehely–Magyarszék-vetők, valamint az öv déli peremét képező Mecsekalja-zóna. A felsorolt vetőzónák neotektonikus aktivitását nagyszámú megfigyelés igazolja (TARI 1992, CSONTOS et al. 2002, WÓRUM & HÁMORI 2004, KONRÁD & SEBE 2010, KOVÁCS et al. 2018, HORVÁTH et al. 2019), a Kapos-vető nyugati szegmense viszont csak gyenge neotektonikus aktivitást mutat (HORVÁTH et al. 2019). Északon a szerkezeti öv részét képezi a Tamási-vető, továbbá a Balaton–Tóalmás-vetőzóna délnyugati folytatása (VÁRKONYI et al. 2013, VISNOVITZ et al. 2015) Marcali városáig. Marcalitól nyugatra a Balaton-zóna mentén csak alárendelten jelentkezik sekély mélységbe hatoló neotektonikus vetőaktivitás, e területen a neotektonikus deformációt főként gyűrődések uralják. A tektonikus övtől délre húzódó

a Tompa-vetőzóna és környezete csapásmenti folytatásában (K)ÉK, illetve (Ny)DNy irányban nem jelentkezik intenzív neotektonikus reaktiváció, ezért e területet nem tekintjük a neotektonikus Közép-magyarországi szerkezeti öv részének.

A miocén extenziónál idősebb szerkezetek neotektonikus reaktivációja

A neotektonikus fázis során reaktiválódott prepannóniai vetők jelentős részben a Pannon-medencét létrehozó kora/középső miocén extenzióhoz/transztenzióhoz (korábbi nomenklatúra szerint ún. szinrift fázis – Royden et al. 1983) kötődnek. Ugyanakkor a neotektonikus felújulás helyenként a miocén riftesedést megelőző szerkezeteket is érintett. Ilyen terület például a Közép-magyarországi szerkezeti öv, ahol a miocén extenziónál idősebb, késő paleogén – kora miocén szerkezetek reaktiválódtak (pl. Balla 1984, 1988; Csontos et al. 2005; Csontos & Nagymarosy 1998; Palotai & Csontos 2010; Palotai 2013). A térképezés során a Dráva-medence (domén) területén szintén egy idősebb, ÉNy–DK-i csapású szerkezet neotektonikus reaktivációját azonosítottuk (*8. ábra*; vö. Haas et al. 2010; Wórum et al. 2020).



8. ábra. A Dráva-medencéből ismert késő karbon molassz árok peremvetőinek neotektonikus szerkezeti reaktivációja (Koroknai et al. 2020 alapján)

Figure 8. *Neotectonic reactivation of the marginal faults of a Late Carboniferous molasse graben in the Dráva basin (based on Koroknai et al. 2020)*

Itt a felújulás értelmezésünk szerint egy késő variszkuszi (késő karbon) árokszerkezethez, mégpedig annak peremvetőihez kötődik (*8. ábra*). A fúrási adatok alapján a felső karbon képződmények előfordulási területén és azok közvetlen környezetében nem jelentkezik számottevő kivastagodás a középső miocén képződményekben (KŐRÖSSY 1989), így a középső miocén extenzióhoz kapcsolódó, jelentős (szinrift) vetőkkel itt nem lehet számolni. Ugyanakkor a neotektonikus kiújulás ÉNy–DK-i csapás mentén több 10 km hosszúságban követhető a karbon képződmények pereme mentén, ami a miocénnél idősebb, vetős szerkezet jelenlétére utal a vizsgált területen. Közvetve ugyancsak a miocénnél idősebb vetős szerkezetet támasztja alá a karbon képződmények igen jelentős, a vonulat tengelyében az 1 km-t is jócskán meghaladó vastagsága (*8. ábra*).

A Dráva doménben térképileg is markáns elemként jelentkező, az árok peremeihez kapcsolódó, ÉNy–DK-i csapású neotektonikus vetőzóna (Szulok és Cún közt) kulisszás belső szerkezete jobbos nyírást jelez (WÓRUM et al. 2020; *7. ábra*). A műszeresen regisztrált szeizmicitás e zóna jelenkori szeizmoaktív jellegére utal (CZECZE et al. 2023, GYŐRI et al. 2023, KOROKNAI et al. 2023b). A példa további szerkezeti érdekessége, hogy jól megfigyelhető az árokkitöltést alkotó felső karbon képződmények gyűrt belső szerkezete is. Ennek a gyűrődéses szerkezetalakulási fázisnak nincs nyoma a fiatal pannóniai üledékekben, tehát a késő karbon árokszerkezetet korábbi inverziós esemény(ek?) is érintette, amely a késő variszkuszi és/vagy eoalpi (kréta) kompressziós szerkezetalakulással hozható összefüggésbe.

Neotektonikus redők és a felszíni morfológia kapcsolata

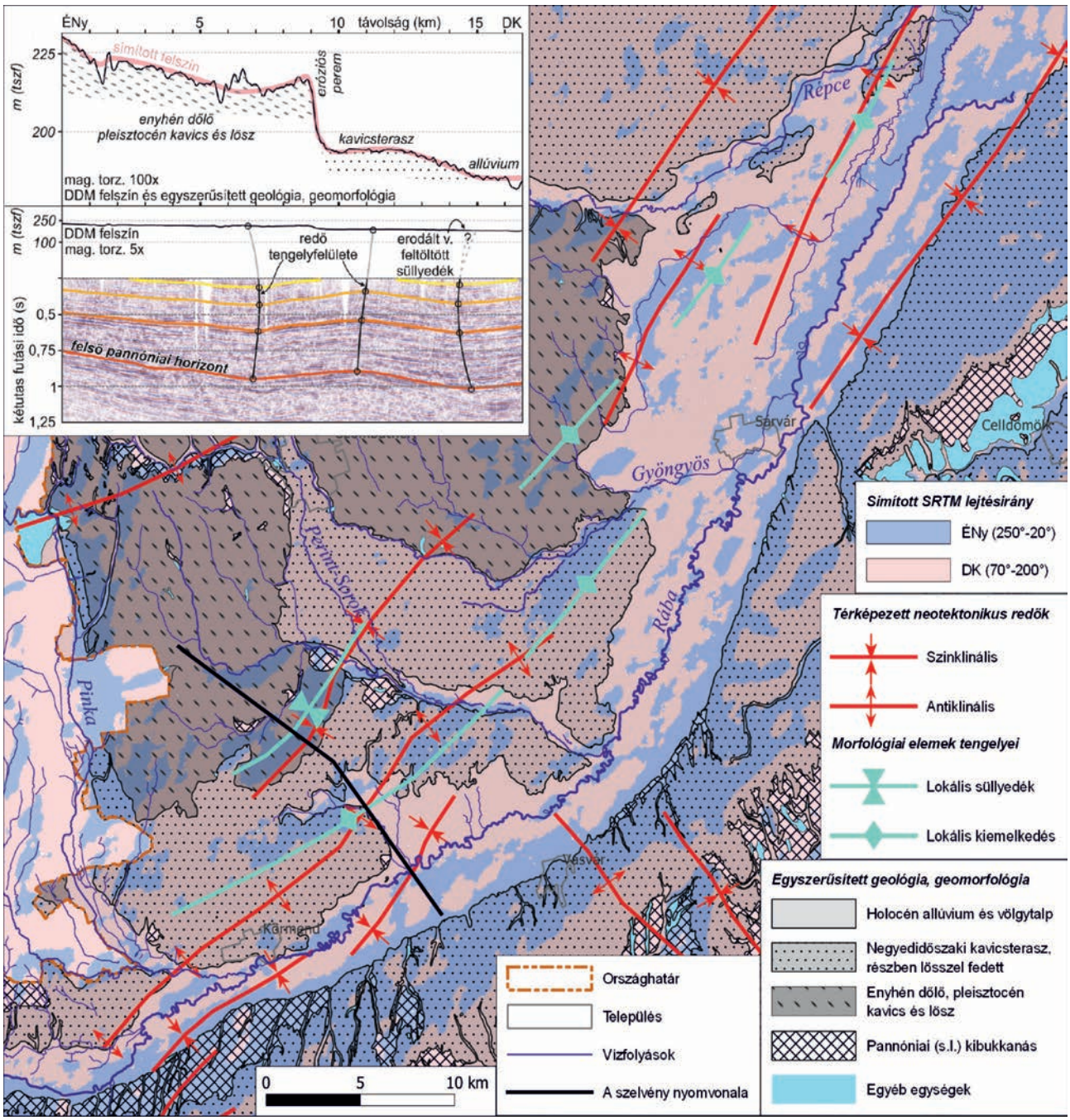
A Kisalföld területén figyelemre méltó kapcsolat mutatható ki a szeizmikus szelvényeken meghatározott, (É)ÉK–(D)DNy-i csapású redők és a felszíni morfológiai elemek közt. A Rába negyedidőszaki üledékeiben enyhe (pár méteres nagyságrendű) morfológiai mélyedések és relatív magaslatok mutathatók ki a felszín simított burkológörbéjében DTM-analízis segítségével (KOVÁCS et al. 2014). Ezek tengelyei feltűnő térbeli egyezést mutatnak az ezen a területen szeizmikus szelvényeken meghatározott antiklinálisok és szinklinálisok tengelyeivel a fiatal pannóniai üledékekben (*9. ábra*).

Az integrált szeizmikus és geomorfológiai értelmezés alapján a szeizmikus szelvényeken megfigyelt redőződés tektonikus eredetű, hiszen a szerkezeti hatás a rétegsorban felfelé haladva nem tűnik el, sőt az adatok szerint még a felszíni morfológiában is tetten érhető, mégha a felszíni amplitúdó igen kicsiny is. Ugyanakkor ez a redőződés bár tektonikus eredetű (a redőződés amplitúdója felfelé haladva nem tűnik el), de nem sorolható sem a kompressziós, sem a vetőkapcsolt redők kategóriájába. Figyelembe véve a tágabb környezetben dokumentált függőleges kéregmozgásokat (TARI 1994; HORVÁTH 1995; SACCHI et al. 1999; pl. a Dunántúli-középhegység kiemelkedése), e redőket differenciális függőleges kéregmozgásokhoz kapcsolódó redőkként értelmeztük (lásd még *Ábrázolt térképi elemek – Redők*). A megfigyelt függőleges kéregmozgások, amelyek különböző hullámhosszú gyűrődések kialakulását eredményezték a kéregben, feltételezhetően a neotektonikus fázis során végbement, litoszférikus léptékű deformációkhoz kapcsolódhatnak (HORVÁTH & CLOETINGH 1996, CLOETINGH et al. 1999, DOMBRÁDI et al. 2010, RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2020, PORKOLÁB et al. 2023b).

A neotektonikus vetőkép kinematikai értelmezése

Az elvégzett térképezés az egyes vetőzónák neotektonikus kinematikáját tekintve meglehetősen konzisztens képet mutat az egész ország területén (*10. ábra*). Ahogy az egyedi vetőzónák kulisszás (en echelon) belső szerkezete, illetve a vetőzónák általános térképi elrendeződése és geometriája is jelzi, a (K)ÉK–(Ny)DNy-i csapású vetőzónák (Balaton–Tóalmás-, Balatonfő-, Kelet-Kapos-, Bácsszentgyörgy–Tompa-, és Derecske-vetőzóna) balos, míg a (Ny)ÉNy–(K)DK-i csapású vetőzónák (pl. Szulok-Sellye-Cún vetőzóna és a Kisalföld délkeleti részének vetőzónái) jobbos oldaleltolódásként működtek. A kb. É–D-i irányú szerkezetek jellemzően normál vetős kinematikát tükröznek (pl. Zagyva-árok, ahol egyébként vetőkapcsolt redők is előfordulnak), illetve helyenként kb. ÉK–DNy-i irányú, kisebb *pull-apart* jellegű szerkezetek (pl. Bonyhádi-medence, Adonyi-medence) is megjelennek, amelyek balos eltolódáshoz kapcsolódó mintázatot (eltolódások és normálvetők kombinációját) jeleznek. Nyugat- és Délnyugat-Magyarországon jellemzően K–Ny-i tengelyű, kompressziós eredetű redők és hasonló irányítottságú fel/rátolódások jelentkeznek. Mindezen megfigyelések összességükben jól beleilleszthetők egy kb. É–D-i maximális horizontális főfeszültséggel (σ_1) jellemezhető, alapvetően eltolódásos jellegű paleo-feszültségmezőbe (*10. ábra*), ami egyúttal a legkisebb főfeszültség (σ_3) ugyancsak vízszintes helyzetét jelzi (vö. PORKOLÁB et al. 2023a, KOROKNAI et al. 2023b). A nyugat- és délnyugat-magyarországi feltolódásos és redős szerkezetek átmenetet jeleznek az eltolódásos rezsimből a transzpressziós/kompressziós rezsim felé. A maximális főfeszültség iránya kelet felé haladva egyre inkább ÉÉK-i irányúvá válik.

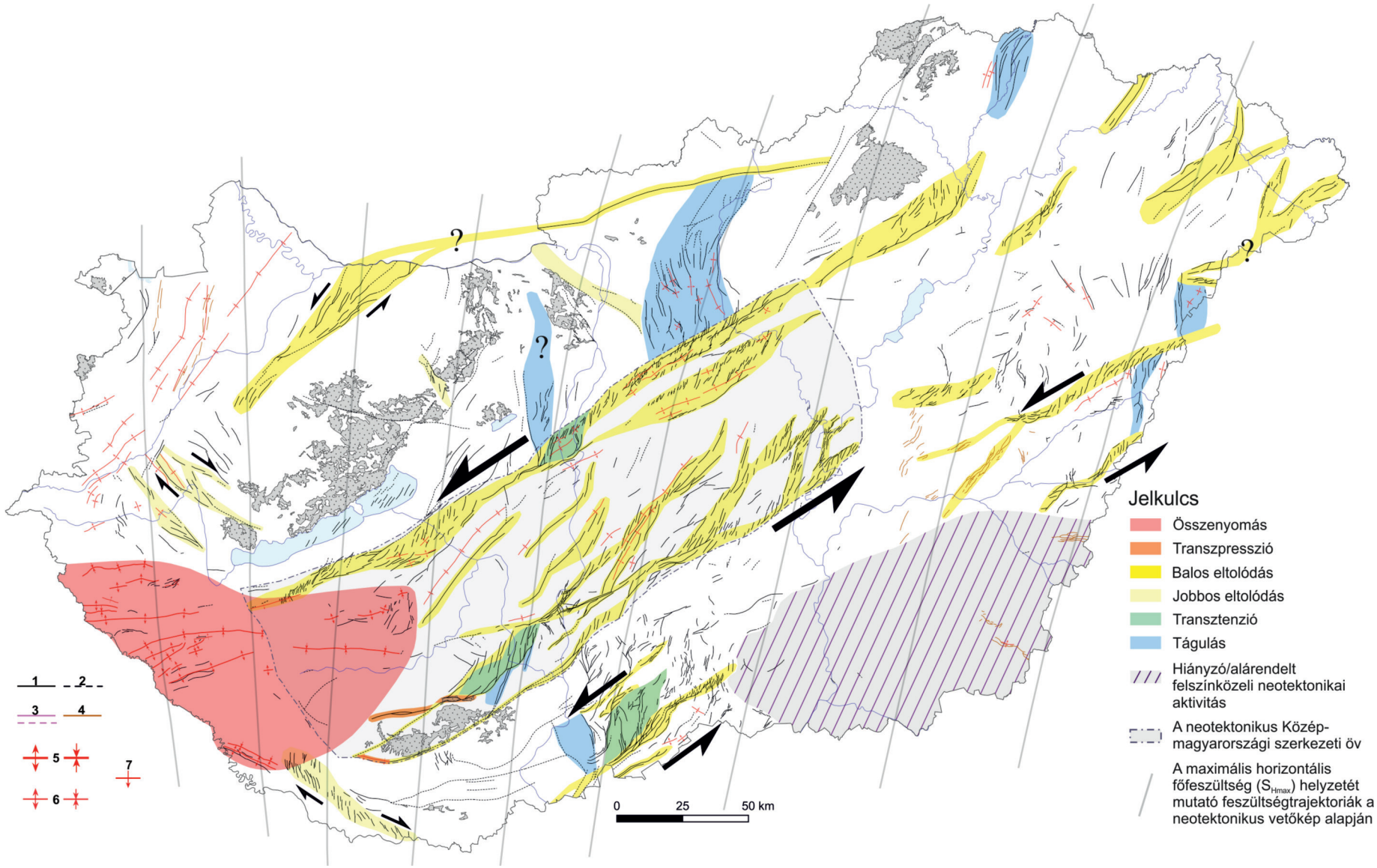
Ez a feszültségmező irányítottságát tekintve összességében nem tér el jelentősen a meghatározott jelenkori feszültségmezőtől (PORKOLÁB et al. 2023a, BÉKÉSI et al. 2023b, KOROKNAI et al. 2023b). A legnagyobb eltérés a Ny-Dunántúlon (a Kisalföld déli részén) jelentkezik, ahol a recens feszültségmező közel K–Ny-i irányú maximális horizontális főfeszültséggel (σ_1) jellemezhető. Ennek hátterében BADA et al. (2001) modellezési eredményei szerint lemezen belüli, lokális hatás áll: a Keleti-Alpok kiemelt topográfiai helyzetű tömege gravitációs eredetű nyomófeszültséget gyakorol a szomszédos kisalföldi területre, aminek eredményeként a regionálisan jellemző ÉÉK–DDNy-i maximális horizontális főfeszültség lokálisan K–Ny-i irányt vesz fel. Ugyancsak számottevő az eltérés az északkeleti országhatár közelében, ahol a recens maximális horizontális főfeszültség – a regionális trendet követve (PORKOLÁB et al. 2023a, KOROKNAI et



9. ábra. A Kisalföldön térképezett, a neotektonikus fázishoz kapcsolódó redők és a felszíni morfológiai elemek (relatív kiemelkedések és süllyedékek) korrelációja (Koroknai et al. 2020 alapján). A szeizmikus és topográfiai szelvényeken (bal oldalt felül) láthatók a térképezett redők és a kapcsolódó felszíni morfológiai elemek

Figure 9. *Correlation between neotectonic fold locations and surface morphological elements (relative highs and depressions) as revealed by independent analysis of digital elevation models (based on Koroknai et al. 2020). The seismic and topographic profiles (upper left) show the mapped folds and adjoining surface morphological elements*

al. 2023b) – közel K–Ny-i irányúvá válik. Máshol az eltérés a recens maximális horizontális főfeszültség trendszerű ÉK-i irányú, kismértékű elhajlásában jelentkezik. A feszültségmező jellegét illetően a legfontosabb eltérés, hogy a vetőkép alapján vázolható mezőben lokálisan (főként transzferzónákban) transztenzió/tágulás is előfordul (Koroknai et al. 2020), míg a jelenkori feszültségmezőben (Békési et al. 2023a,b, Porkoláb et al. 2023a) ilyen típusú deformáció nem jelenik meg. A neotektonikus vetőkép alapján felvázolt feszültségmező irányítottságának és jellegének kisebb-nagyobb eltéréseinek oka a recens feszültségmező helyzetétől/jellegétől jelen tudásunk alapján többnyire nem határozható meg egyértelműen. Ebben az eltérő módszertani háttér mellett (Porkoláb et al. 2023a) egyaránt szerepet játszhatnak a feszültségtengelyek irányítottságának lokális változásai a földtörténeti közelmúlt során, és standard geológiai-geofizikai módszerekkel csak nagyon nehezen nyomozható, litoszferikus léptékű deformációs folyamatok (Porkoláb et al. 2023b), valamint a feszültségmezőnek a vetők környezetében fellépő, kisebb-nagyobb, természetes eredetű anomáliái.



10. ábra. A térképezett neotektonikus deformációk kinematikai értelmezése (KOROKNAI et al. 2020 alapján). A térképen ábrázolt szerkezeti elemek jelkulcsi magyarázatát lásd a 6. ábránál

Figure 10. *Kinematic interpretation of the mapped neotectonic deformations. For the explanation of the mapped structures see Fig. 6.*

Összefoglalás

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 pályázata keretében elkészült a neotektonikus fázishoz (<6-8 Mév) kapcsolódó tektonikus és atektonikus deformációk új, 1: 500 000 léptékű országos térképe (Wórum et al. 2020). Az új térkép alapját 70 db 3D szeizmikus adattömb és mintegy 2900 db 2D szeizmikus szelvény értelmezése, továbbá a neotektonikai szakirodalom releváns eredményeinek kritikai értékelése és integrációja képezi. Az alkalmazott módszertan széles tudományos konszenzuson alapuló térkép megalkotását tette lehetővé.

A neotektonikus szerkezeti térképezés a projekt végcélját képező, új, országos szeizmotektonikai modellhez alapvető fontosságú adatokat szolgáltatott. A felszínközelbe hatoló neotektonikus és aktív vetők az új, országos szeizmotektonikai veszélyeztettségi térkép (Kovács et al. 2023, Koroknai et al. 2023a) meghatározó jelentőségű elemei, elősegítve a veszélyeztetettség minél adekvátabb minősítését. A prepannóniai vetők az új szeizmotektonikai térképnek (bemutatását l. Koroknai et al. 2023b) is alapvető elemei, hiszen az aktív vetők kijelölése ezek felhasználásával valósult meg figyelembe véve a projektben rendelkezésre álló szeizmológiai (Győri et al. 2023, Czecze et al. 2023) és szerkezeti adatrendszereket.

Az elvégzett neotektonikai térképezés legfontosabb eredményei a következők:

– A fiatal, felszínközelébe hatoló szerkezetek korábbiaknál részletesebb és pontosabb ábrázolása.

– A vetők és redők különböző típusainak elkülönítése, jellemzése és ábrázolása.

– A jelentősebb prepannóniai vetős mélyszerkezetek („gyökérzónák") pontos kijelölése és országos szintű ábrázolása a térképezett neotektonikus deformációk kontextusában a rendelkezésre álló szeizmikus adatrendszer és irodalmi adatok integrált felhasználásával. E térképi tartalom a korábbi országos és helyi jellegű vetőminták jelentős kiegészítésének, pontosításának és egységes módszertannal való leképezésének az eredménye.

– A mély és felszínközeli neotektonikus szerkezetek kapcsolata alapján megállapítható, hogy a neotektonikus szerkezetek kialakulása egyértelműen a megelőző (jellemzően az oligo-miocén extrúzióhoz vagy a miocén riftesedéshez kapcsolódó) szerkezetek reaktivációjához köthető, összhangban a korábbi releváns neotektonikus tanulmányok megállapításaival.

– Neotektonikai szerkezeti domének a korábbiaknál lényegesen pontosabb és országos szintű elkülönítése/jellemzése a deformációs mintázat alapján.

– A késő pannóniai/pliocén kinematika és feszültségmező interpretációja a vetőmintázat alapján.

Az elvégzett térképezés bővebb metodikai hátterét és további eredményeit (pl. a korábbi országos neotektonikai térképekkel való összevetést) Koroknai et al. (2020) munkája mutatja be részleteiben.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is köszönetüket fejezik ki a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a 2018-1.2.1-NKP-2018-00007 jelű pályázat támogatásáért, amely az itt bemutatott eredmények létrejöttében meghatározó szerepű volt. Dolgozatunkat néhai Prof. dr. Horváth Ferenc kollégánk emlékének ajánljuk, aki számára a Pannon-medence neotektonikai viszonyainak és fejlődésének megismerése mindig is kiemelten fontos kutatási témát jelentett. Köszönettel tartozunk dr. Csontos Lászlónak és dr. Palotai Mártonnak, továbbá dr. Fodor László szakszerkesztőnek az alapos lektori véleményekért és a konstruktív, minden szakmai részletre kiterjedő kritikai megjegyzésekért, amelyek számottevően járultak hozzá a kézirat minőségének javításához. Dr. Sztanó Orsolya főszerkesztő asszonynak ezúton is köszönjük a kézirat javítását elősegítő technikai megjegyzéseit.

Irodalom – References

Bada, G., Horváth, F., Fejes, I. & Gerner, P. 1999: Review of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: progress and problems. – *Journal of Geodynamics* **27,** 501–527. https://doi.org/10.1016/S0264-3707(98)00013-1

Bada, G., Horváth, F., Cloetingh, S., Coblentz, D. & Tóth, T. 2001: Role of topography induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. – *Tectonics* **20,** 343–363. https://doi.org/10.1029/2001TC900001

Bada, G., Fodor, L., Windhoffer, G., Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Sacchi, M., Dunai, T., Tóth, L., Cloetingh, S. & Horváth, F. 2003a: Lithosphere dynamics and present-day deformation pattern in the Pannonian basin. – *Geophysical Research. Abstract* **5,** 05772 (Nice, France).

Bada G., Mónus P., Szafián P., Szeidovitz Gy., Tóth L., Windhoffer G. & Zsíros T. 2003b: A létesítmény és környezete geofizikai, szeizmológiai és szeizmotektonikai jellemzői (Geophysical, seismological and seismotectonic characteristics of the facility and its surroundings). – In: Schweitzer F., Tiner T. & Bérczi K. (szerk.): *A püspökszilágyi RHFT környezet- és sugárbiztonsága*. – MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, 57–90.

Bada, G., Horváth, F., Tóth, L., Fodor, L., Timár, G. & Cloetingh, S. 2006: Societal aspects of ongoing deformation in the Pannonian region. – In: Pintér, N., Grenerczy, Gy., Weber, J., Medak, D. & Stein, S. (Eds): *The Adria microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*. – NATO ARW Series, Kluwer Academic Publishers, 385–402. https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_26

BADA, G., GRENERCZY, Gy., TÓTH, L., HORVÁTH, F., STEIN, S., CLOETINGH, S., WINDHOFFER, G., FODOR, L., PINTER, N. & FEJES, I. 2007a: Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian Basin: Seismicity, GPS velocities, and stress transfer. – *Special Papers Geological Society of America* **425,** 243–262. https://doi.org/10.1130/2007.2425(16)

BADA, G., HORVÁTH, F., DÖVÉNYI, P., SZAFIÁN, P., WINDHOFFER, G. & CLOETINGH, S. 2007b: Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. – *Global and Planetary Change* **58,** 165–180. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007

BADA G., SZAFIÁN P., VINCZE O., TÓTH T., FODOR L., VOLKHARD S. & HORVÁTH F. 2010: Neotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagy felbontású szeizmikus mérések alapján (The neotectonic habitat of the eastern part of Lake Balaton and its broader environs: inferences from high resolution seismic profiling). – *Földtani Közlöny* **140,** 367–390.

BALLA, Z. 1984: The Carpathian loop and the Pannonian basin: a kinematic analysis. – *Geophysiscal Transactions* **30,** 313–353.

BALLA, Z. 1988: On the origin of the structural pattern of Hungary. – *Acta Geologica Hungarica* **31,** 53–63.

BALLA Z. & DUDKO A. 1996: Törések pannóniai képződményekben. – *Földtani Közlöny* **126,** 209–262.

BALÁZS, A., MATENCO, L., MAGYAR, I., HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 2016: The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin. – *Tectonics* **35,** 1526–1559. https://doi.org/10.1002/2015TC004109

BALÁZS, A., MAGYAR, I., MATENCO, L., SZTANÓ, O., TŐKÉS, L. & HORVÁTH, F. 2018: Morphology of a large paleo-lake: Analysis of compaction in the Miocene-Quaternary Pannonian Basin. – *Global Planetary Change* **171,** 134–147. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.012

BÉKÉSI, E., PORKOLÁB, K. & WÉBER, Z. 2023a: Stress field of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4,** p. 309. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB

BÉKÉSI, E., PORKOLÁB, K., WESZTERGOM, V. & WÉBER, Z. 2023b: Updated stress dataset of the Circum-Pannonian region: Implications for regional tectonics and geo-energy applications. – *Tectonophysics* **856,** 229860. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229860

BODOR B. 2011: *A Hernád-árok szerkezetföldtani vizsgálata (Structural investigation of the Hernád graben).* – MSc tézis, Földtani Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 99 pp.

BREZSNYÁNSZKY, K. & SÍKHEGYI, F. 1987: Neotectonic interpretation of Hungarian lineaments in the light of satellite imagery. – *Journal of Geodynamics* **8,** 123–203.

BUDAI, T., CSÁSZÁR, G., CSILLAG, G., FODOR, L., GÁL, N., KERCSMÁR, Zs., KORDOS, L., PÁLFALVI, S. & SELMECZI, I. 2008: *Geology of the Vértes Hills. Explanatory book to the Geological Map of the Vértes Hills (1:50 000).* – Geological Institute of Hungary, Budapest, 368 pp.

CLOETINGH, S., BUROV, E. & POLIAKOV, A. 1999: Lithosphere folding: primary response to compression? (from Central Asia to Paris basin). – *Tectonics* **18,** 1064–1083. https://doi.org/10.1029/1999TC900040

CZAKÓ, T. & ZELENKA, T. 1981: New data about the neotectonics of Mátra Mountains, Northern Hungary. – *Advances in Space Research* **1,** 289–298. https://doi.org/10.1016/0273-1177(81)90406-3.

CZECZE B., GYŐRI E., TIMKÓ M., KISZELY M., SÜLE B. & WÉBER Z. 2023: A Kárpát–Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földrengés adatbázis. – *Földtani Közlöny* **153/4,** 279–296. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.279

CSERNY T. & CORRADA R. 1990: A Balaton aljzatának szedimentológiai térképe (Sedimentary maps of the basement of the Lake Balaton). – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1988*, 169–176.

CSONTOS, L. 1995: Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. – *Acta Vulcanologica* **7,** 1–13.

CSONTOS, L. & NAGYMAROSY, A. 1998: The Mid-Hungarian line: a zone of repeated tectonic inversions. – *Tectonophysics* **297,** 51–71. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00163-2

CSONTOS, L., NAGYMAROSY, A., HORVÁTH F. & KOVÁČ, M. 1992: Tertiary evolution of the Intra-Carpathian area: a model. – *Tectonophysics* **208,** 221–241.

CSONTOS, L., BENKOVICS, L., BERGERAT, F., MANSY, J. L. & WÓRUM, G. 2002: Tertiary deformation history from seismic section study and fault analysis in a former European Tethyan margin (the Mecsek–Villány area, SW Hungary). – *Tectonophysics* **357,** 81–102. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00363-3.

CSONTOS, L., MAGYARI, Á., VAN VLIET-LANOË, B. & MUSITZ, B. 2005: Neotectonics of the Somogy Hills (Part II): evidence from seismic sections. – *Tectonophysics* **410,** 63–80. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.049.

DANK V. & FÜLÖP J. (szerk.) 1990: Magyarország szerkezetföldtani térképe, 1:500 000 (Structural-geological map of Hungary, 1:500 000). – MÁFI, Budapest.

DETZKY L. K. 1997: Feszültségtér-történet meghatározása szeizmikus szelvényeken azonosított többfázisú tektonizmus alapján, a Szolnoki flis öv nyugati peremén (Determination of stress-field history on the basis of multiphase tectonism identified in the seismic profiles, in the western part of the Szolnok flysch belt). – *Magyar Geofizika* **37,** 228–246.

DETZKY, L. K., HORVÁTH, F. & DETZKY, G. 2002: Neotectonics and its relation to the Mid-Hungarian Mobile Belt. – In: CLOETINGH, S., HORVÁTH, F., BADA, G. & LANKREIJER, A. (Eds): Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system. – *EGU St. Mueller Special Publications Series* **3,** 247–266.

DOMBRÁDI, E., SOKOUTIS, D., BADA, G., CLOETINGH, S. & HORVÁTH, F. 2010: Modelling recent deformation of the Pannonian lithosphere: lithospheric folding and tectonic topography. *Tectonophysics* **484,** 103–118. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.014

DUDÁS Á. 2011: *Felső-miocén vetők és redők vizsgálata 2D szeizmikus vonalak alapján a Duna–Tisza köze északi és középső részén (Study of Late Miocene faults and folds in the northern and middle portion of the Danube–Tisza interfluve based on 2D seismic profiles).* – MSc tézis, Földtani Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 73 pp.

DUDKO, A. 1997: Neogene tectonics of the Mezőföld. – *Annual Report of the Geological Institute of Hungary 1996/II*, 213–223.

FODOR L. 2008: Szerkezetföldtan. In: BUDAI T., CSÁSZÁR G., CSILLAG G., FODOR L., GÁL N., KERCSMÁR ZS., KORDOS L., PÁLFALVI S. & SELMECZI I. 2008: *A Vértes hegység földtana*. – MÁFI, Budapest, 368 p.

Fodor, L. 2010: *Mesozoic–Cenozoic stress fields and fault patterns in the northwestern part of the Pannonian Basin – methodology and structural analysis*. – Unpublished DSc thesis. Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 129 pp.

Fodor L., Magyari Á., Fogarasi A. & Palotás K. 1994: Tercier szerkezetfejlődés és késő paleogén üledékképződés a Budai-hegységben. A Budai-vonal új értelmezése (Tertiary tectonics and late Palaeogene sedimentation in the Buda Hills, Hungary. A new interpretation of the Buda Line). – *Földtani Közlöny* **124,** 129–305.

Fodor, L., Jelen, B., Márton, E., Skaberne, D., Čar, J. & Vrabec, M. 1998: Miocene–Pliocene tectonic evolution of the Slovenian Periadriatic Fault: Implications for Alpine–Carpathian extrusion model. – *Tectonics* **17,** 690–709. https://doi.org/10.1029/98TC01605

Fodor, L., Csontos, L., Bada, G., Győrfi, I. & Benkovics, L., 1999: Tertiary tectonic evolution of the Pannonian basin system and neighbouring orogens: A new synthesis of paleostress data. – In: Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F. & Séranne, M. (Eds): The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. *Geological Society Special Publications, London* **156,** 295–334. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.156.01.15

Fodor, L., Bada, G., Csillag, G., Horváth, E., Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Palotás, K., Síkhegyi, F., Timár, G. & Cloetingh, S. 2005a: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. – *Tectonophysics* **410,** 15–41. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.06.008

Fodor, L., Bada, G., Csillag, G., Horváth, E., Ruszkiczay-Rüdiger, Zs. & Síkhegyi, F. 2005b: New data on neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. – In: Fodor, L. & Brezsnyánszky, K. (Eds): *Application of GPS in Plate Tectonics in Research on Fossil Energy Resources and in Earthquake Hazard Assessment*. – Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary **204,** 35–44.

Fodor, L., Radócz, Gy, Sztanó, O., Koroknai, B., Csontos, L. & Harangi, Sz. 2005c: Post-Conference Excursion: Tectonics, sedimentation and magmatism along the Darnó Zone. – *Geolines* **19,** 142–162.

Fodor L., Csillag G., Lantos Z., Budai T., Kercsmár Zs. & Selmeczi I. 2008: *A Vértes hegység földtani térképe, 1:50 000*. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

Fodor L., Uhrin A., Palotás K., Selmeczi I., Tóth-Makk Á., Riznar I., Trajanova, M., Rifelj H., Bogomir J., Budai T., Koroknai B., Mozetič, S., Nádor A. & Lapanje, A. 2013a: A Mura–Zala-medence vízföldtani elemzését szolgáló földtani-szerkezet modell (Geological and structural model of the Mura–Zala Basin and its rims as a basis for hydrogeological analysis). – *Annual Report of the Geological Institute of Hungary 2011*, 47–91.

Fodor, L., Sztanó, O. & Kövér, Sz. 2013b: Mesozoic deformation of the northern Transdanubian Range (Gerecse and Vértes Hills). – *Acta Mineralogica-Petrographica, Field Guide Series* **31,** 1–52.

Fülöp J. & Dank V. (szerk.) 1987: *Magyarország földtani térképe a kainozóikum elhagyásával, 1: 500 000* (Geological map of Hungary without Cenozoic, 1:500 000). – MÁFI, Budapest.

Gerner, P., Bada, G., Dövényi, P., Müller, B., Oncescu, M.C., Cloetingh, S. & Horváth, F. 1999: Recent tectonic stress and crustal deformation in and around the Pannonian basin: data and models. – In: Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F. & Séranne, M. (Eds): The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. *Geological Society Special Publications London* **156,** 269–294. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.14

Gyalog L. & Síkhegyi F. 2005: *Magyarország földtani térképe (1:100 000)*. – Magyar Állami Földtani Intézet. https://map.mbfsz.gov.hu/fdt100/

Győri, E., Czecze, B., Timkó, M., Bondár, I., Czanik, Cs., Czifra, T., Fodor, Cs., Gráczer, Z., Gribovszki, K., Gyarmati, A., Kalmár, D., Kiszely, M., Kovács, I. J., Mónus, P., Süle, B., Szanyi, Gy., Tóth, L., Varga, P., Zsíros, T. & Wéber, Z. 2023: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456-2020). – *Institute of Earth Physics and Space Science*, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4,** p. 297. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA

Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L. & Konrád Gy. (szerk.) 2010: *Magyarország prekainozoos földtani térképe 1:500 000* (Pre-Cenozoic geological map of Hungary, 1:500 000). – MÁFI, Budapest. https://map.mbfsz.gov.hu/preterc500/

Halouzka, R., Schäffer, G., Kaiser, M., Molnár, P., Scharek, P. & Pristas, J. 1998: *Neotectonic Map, 1:200000.* Danube Region Environmental Geology Programme, DANREG. – Geological Institute of Hungary, Budapest.

Hatem, A. E., Cooke, M. L. & Toeneboehn, K. 2017: Strain localization and evolving kinematic efficiency of initiating strike-slip faults within wet kaolin experiments. – *Journal of Structural Geology* **101,** 96–108. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.06.011

Hetényi R., Hámor G., Földi M., Nagy I., Nagy E. & Bilik I. 1982: *A Keleti-Mecsek földtani térképe* (Geological Map of the Eastern Mecsek), 1:25 000. – MÁFI, Budapest.

Héja, G., Kövér, Sz., Németh, A., Csillag, G. & Fodor, L. 2018: Evidences for pre-orogenic passive-margin extension in a Cretaceous fold-and-thrust belt on the basis of combined seismic and field data, (western Transdanubian Range, Hungary). – *International Journal of Earth Sciences* **107,** 2955–2973. https://doi.org/10.1007/s00531-018-1637-3.

Horváth, F. 1993: Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. – *Tectonophysics* **226,** 333–357. https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90126-5

Horváth, F. 1995: Phases of compression during the evolution of the Pannonian Basin and its bearing on hydrocarbon exploration. – *Marine and Petroleum Geology* **12,** 837–844. https://doi.org/10.1016/0264-8172(95)98851-u

Horváth, F. & Cloetingh, S. 1996: Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. – *Tectonophysics* **266,** 287–300. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00194-1

Horváth, F. & Rumpler, J. 1984: The Pannonian basement: extension and subsidence of an alpine orogene. – *Acta Geologica Hungarica* **27,** 229–235.

Horváth, F., Bada, G., Windhoffer, G., Csontos, L., Dombrádi, E., Dövényi, P., Fodor, L., Grenerczy, Gy., Síkhegyi, F., Szafián, P., Székely, B., Timár, G., Tóth, L. & Tóth, T. 2006: Atlas of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: Euroconform

maps with explanatory text (A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza: Eurokonform térképsorozat és magyarázó). – *Magyar Geofizika* **47,** 133–137. http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin_atlas.htm

Horváth, F., Dombrádi, E. & Tóth, L. 2009: Natural conditions, Geophysiscs. – In: Kocsis, K. & Schweitzer, F. (Eds): *Hungary in Maps*. – Geographical Research Institute. Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 29–33.

Horváth, F., Musitz, B., Balázs, A., Végh, A., Uhrin, A., Nádor, A., Koroknai, B., Pap, N., Tóth, T. & Wórum, G. 2015: Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. – *Geothermics* **53,** 328–352. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009

Horváth F., Koroknai B., Tóth T., Wórum G., Konrád Gy., Kádi Z., Kudó I., Hámori Z., Filipszki 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 (Structural geological and neotectonic features of the middle portion of the Kapos line based on the results of latest geophysical research). – *Földtani Közlöny* **149,** 327–350. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2019.149.4.327

Juhász Gy., Pogácsás Gy. & Magyar I. 2007: Óriáskanyon-rendszer szeli át a pannóniai üledékeket? [A giant canyon system incised into the Late-Neogene (Pannonian s.l.) sediments?]. – *Földtani Közlöny* **137,** 307–326.

Juhász, Gy., Pogácsás, Gy., Magyar, I. & Hatalyák, P. 2013: The Alpar canyon system in the Pannonian Basin, Hungary – its morphology, infill and development. – *Global Planetary Change* **103,** 174–192. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.003

Kiss J. 2006: Magyarország gravitációs Bouguer-anomália térképe, M=1:500 000 (Gravity Bouguer anomaly map of Hungary, 1:500 000). – *Geophysical Transactions* **45,** 99–104. https://map.mbfsz.gov.hu/gravitacios_anomalia/

Kiss J. & Gulyás Á. 2006: *Magyarország mágneses ΔZ-anomália térképe, M=1:500 000* (Magnetic ΔZ anomaly map of Hungary, 1:500 000). – Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, Budapest. https://map.mbfsz.gov.hu/magneses_anomalia/

Kiss, A., Gellért, B. & Fodor, L. 2001: Structural history of the Porva Basin in the Northern Bakony Mts. (Western Hungary): Implications for the Mesozoic and Tertiary tectonic evolution of the Transdanubian Range and Pannonian Basin. – *Geologica Carpathica* **52,** 183–190.

Kiszely M. 2008: Földrengések a Vértes környezetében. In: Budai T., Császár G., Csillag G., Fodor L., Gál N., Kercsmár Zs., Kordos L., Pálfalvi S. & Selmeczi I. 2008: *A Vértes hegység földtana*. – MÁFI, Budapest, 368 pp.

Konrád Gy. & Sebe K. 2010: Fiatal tektonikai jelenségek új észlelései a Nyugati-Mecsekben és környezetében (New details of young tectonic phenomena in the Western Mecsek Mts and their surroundings). – *Földtani Közlöny* **140,** 135–162.

Koroknai, B., Wórum, G., Tóth, T., Koroknai, Zs., Fekete-Németh, V. & Kovács, G. 2020: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. – *Earth-Science Reviews* **211,** 103411. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103411

Koroknai, B., Békési, E., Bondár, I., Czecze, B., Győri, E., Kovács, G., Porkoláb, K., Tóth, T., Wesztergom, V., Wéber, Z. & Wórum, G. 2023a: Seismotectonic map of Hungary. Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlöny* **153/4,** p. 353. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD

Koroknai B., Kovács G., Wórum G., Békési E., Győri E., Czecze B., Wéber Z., Porkoláb K., Bozsó I., Szárnya Cs., Szűcs E., Németh V., Balázs L., Szabó G. & Tóth T. 2023b: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. – *Földtani Közlöny* **153/4,** 335–352. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335

Korpás L., Fodor L., Magyari Á., Dénes G. & Oravecz J. 2002: A Gellért-hegy földtana, karszt- és szerkezetfejlődése (Geology, karst system and structural evolution of the Gellért Hill, Budapest, Hungary). – *Karszt és Barlang* **1998–1999/I–II,** 57–93.

Kováč, M., Bielik, M., Hók, J., Kováč, P., Kronome, B., Labák, P., Mozco, P., Plašienka, D., Šefara, J. & Šujan, M. 2002: Seismic activity and neotectonic evolution of the Western Carpathians (Slovakia). – *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* **3,** 167–184.

Kovács, Á., Sebe, K., Magyar, I., Szurominé Korecz, A. & Kovács, E., 2018: Upper Miocene sedimentation and tectonics in the Northern Imbricate Zone (Eastern Mecsek Mts, SW Hungary). – *Földtani Közlöny* **148,** 327–340. 10.23928/foldt.kozl.2018.148.4.327

Kovács, G., Telbisz, T., Székely, B. & Koma, Zs. 2014: Tectonic geomorphometric studies in the surroundings of Rechnitz tectonic window, Eastern Alps. – *Geologia Sudetica* **42,** 188–189.

Kovács, G., Fodor, L., Kövér, S., Molnár, G., Raáb, D., Telbisz, T. & Timár, G. 2015: Verification of late Miocene to Quaternary structural control on landforms: A case study with comprehensive methodology from a low hilly area (Western Pannonian basin). – *Austrian Journal of Earth Sciences* **108,** 82–104. https://doi.org/10.17738/AJES.2015.0015.

Kovács, G., Koroknai, B., Győri, E., Németh, V., Balázs, L., Czecze, B., Bondár, I., Wórum, G., Szabó, G., Kegyes-Brassai, O. & Tóth, T. 2023: Seismotectonic hazard map of Hungary. Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlöny* **153/4,** p. 355. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE

Kőrössy L. 1989: A Dráva-medencei kőolaj- és földgázkutatás földtani eredményei. – *Általános Földtani Szemle* **24,** 3–121.

Kövér Sz., Fodor L. & Haas J. 2018: A Kárpát–Pannon térség áttekintő szerkezetföldtani térképe. – In: Kocsis K. (főszerk.): *Magyarország Nemzeti Atlasza. Természeti környezet*. Budapest, 16–35.

Loisl, J., Tari, G., Draganits, E., Zámolyi, A. & Gjerazi, I. 2018: High-resolution seismic reflection data acquisition and interpretation, Lake Neusiedl, Austria, northwest Pannonian Basin. – *Interpretation* **6,** SB77–SB97. https://doi.org/10.1190/int-2017-0086.1

Lopes Cardozo, G., Bada, G., Lankreijer, A. & Nieuwland, D. 2002: Analogue modelling of a prograding strike-slip fault: Case study of the Balatonfő fault, western Hungary. – In: Cloetingh, S., Horváth, F., Bada, G. & Lankreijer, A. (Eds): Neotectonics and Surface Processes: The Pannonian Basin and Alpine/Carpathian System. *EGU St. Mueller Special Publication Series* **3,** 217–226.

Magyari Á., Musitz B., Csontos L., Van Vliet-Lanoë, B. & Unger Z. 2004: Késő-negyedidőszaki szerkezetfejlődés vizsgálata Külső-Somogyban terepi mikro- és morfotektonikai módszerekkel. – *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 2002*, 111–128.

Magyari, Á., Musitz, B., Csontos, L. & Van Vliet-Lanoë, B. 2005: Quaternary neotectonics of the Somogy Hills, Hungary (part I): Evidence from field observations. – *Tectonophysics* **410,** 43–62. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.044

Matura, A., Weselly, G., Kröll, A., Császár, G. & Vozár, J. 1998: *Map of the Pre-Tertiary Basement (Including Paleogene in the Australpine-Carpathian Belt), 1:200 000. Danube Region Environmental Geology Programme, DANREG.* – Geological Institute of Hungary, Budapest.

Nádor, A. & Sztanó, O. 2011: Lateral and vertical variability of channel belt stacking density as a function of subsidence and sediment supply: field evidence from the intramountaine Körős Basin, Hungary. – *SEPM Special Publications* **97,** 375–392. https://doi.org/10.2110/sepmsp.097.375

Nádor, A., Thamó-Bozsó, E., Magyari, Á. & Babinszki, E. 2007: Fluvial responses to tectonics and climate change during the late Weichselian in the eastern part of the Pannonian Basin (Hungary). – *Sedimentary Geology* **202,** 174–192. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.001

Nemčok, M., Pospíšil, L., Lexa, J. & Donelick, R. A. 1998: Tertiary subduction and break-off model of the Carpathian–Pannonian region. – *Tectonophysics* **295,** 307–340. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00092-4

Némedi Varga Z. 1977: A Kapos-vonal (The Kapos line). – *Földtani Közlöny* **107,** 313–328.

Oláh P., Fodor L., Tóth T., Deák A., Drijkoningen G. & Horváth F. 2014: A Szentendrei sziget környéki vízi szeizmikus szelvényezések eredményei (Geological results of the seismic surveys around Szentendre Island, Danube River, North Hungary). – *Földtani Közlöny* **144,** 359–380.

Palotai, M. 2013: *Oligocene–Miocene Tectonic Evolution of the Central Part of the Mid-Hungarian Shear Zone*. – Unpublished PhD thesis, Dept. General and Historical Geology. Eötvös University, Budapest, 147 pp.

Palotai, M. & Csontos, L. 2010: Strike-slip reactivation of a Paleogene to Miocene fold and thrust belt along the central part of the Mid-Hungarian Shear Zone. – *Geologica Carpathica* **61,** 483–493. https://doi.org/10.2478/v10096-010-0030-3

Palotai M., Mindszenty A., Kopecskó K. & Poros Zs. 2012: Az Ínség-kő geológiája (The Ínség-kő: Danube bedrock geology at Gellért Hill, Budapest). – *Földtani Közlöny* **142,** 243–250.

Petrik, A. B. 2016: *Structural evolution of the southern Bükk foreland*. – Unpublished PhD thesis, Dept. of Physical and Applied Geology, Eötvös University, Budapest, 208 pp.

Petrik, A., Fodor, L., Bereczki, L., Klembala, Zs, Lukács, R., Baranyi, V., Beke, B. & Harangi, Sz. 2018: Variation in style of magmatism and emplacement mechanism induced by changes in basin environments and stress fields (Pannonian Basin, Central Europe). – *Basin Research* **31,** 380–404. https://doi.org/10.1111/bre.12326.

Petrovszki, J., Székely, B. & Timár, G. 2012: A systematic overview of the coincidences of river sinuosity changes and tectonically active structures in the Pannonian Basin. – *Global and Planetary Change* **98–99,** 109–121. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.08.005.

Pogácsás Gy., Lakatos L., Barvitz A., Vakarcs G. & Farkas C. 1989: Pliocén–kvarter oldaleltolódások a Nagyalföldön (Pliocene–Quaternary strike-slip faults is the Great Hungarian Plain, Hungary). – *Általános Földtani Szemle* **24,** 149–169.

Porkoláb K., Békési E., Broerse T., Kenyeres A. & Wéber Z. 2023a: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében. – *Földtani Közlöny* **153/4,** 299–308. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.299

Porkoláb, K., Broerse, T., Kenyeres, A., Békési, E., Tóth, S., Magyar, B. & Wesztergom, V. 2023b: Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – *Acta Geodaetica et Geophysica.* https://doi.org/10.1007/s40328-023-00409-8

Royden, L. H. 1993: The tectonic expression of the slab pull at continental convergent boundaries. – *Tectonics* **12,** 303–325. https://doi.org/10.1029/92TC02248

Royden, L. H., Horváth, F., Nagymarosy, A. & Stegena, F. 1983: Evolution of the Pannonian Basin System: 2. Subsidence and thermal history. – *Tectonics* **2**, 91–137. https://doi.org/10.1029/TC002i001p00091

Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Fodor, L. I. & Horváth, E. 2007: Neotectonics and Quaternary landscape evolution of the Gödöllő Hills, Central Pannonian Basin, Hungary. – *Global Planetary Change* **58,** 181–196. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.010.

Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Fodor, L., Horváth, E. & Telbisz, T. 2009: Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. – *Geomorphology* **104,** 203–217. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014.

Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Balázs, A., Csillag, G., Drijkoningen, G. & Fodor, L. 2020: Uplift of the Transdanubian Range, Pannonian Basin: how fast and why? – *Global Planetary Change* 103263. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103263

Sacchi, M., Horváth, F. & Magyari, O. 1999: Role of unconformity-bounded units in the stratigraphy of the continental record: A case study from the late Miocene of the western Pannonian Basin, Hungary. – In: Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F. & Séranne, M. (Eds): *The Mediterranean Basins: Extension within the Alpine Orogen*. *Geological Society Special Publications,* London **156,** 357–390. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.17

Síkhegyi, F. 2002: Active structural evolution of the western and central part of the Pannonian basin: A geomorphologic approach. – In: Cloetingh, S., Horváth, F., Bada, G. & Lankreijer, A. (Eds): *Neotectonics and Surface Processes: The Pannonian Basin and Alpine/Carpathian System*. *– EGU St. Mueller Special Publication Series* **3,** 203–216.

Síkhegyi, F. 2008: *Neotectonics of the Somogy- and Zala Hills – morphostructural study*. –Unpublished PhD thesis. University of West Hungary, Sopron, 150 pp.

Soós B. 2017: *A Zagyva-árok extenziójának szerkezete és mértéke (Structure and quantification of extension in the Zagyva graben).* – MSc tézis, Földtani Tanszék. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 123 pp.

Sperner, B., Ratschbacher, L. & Nemcok, M. 2002: Interplay between subduction rollback and lateral extrusion, tectonics of the Western Carpathians. – *Tectonics* **21,** 1051. http://dx.doi.org/10.1029/2001TC901028

Székely, B., Zámolyi, A., Draganits, E. & Briese, C. 2009: Geomorphic expression of neotectonic activity in a low relief area in an Airborne Laser Scanning DTM: a case study of the Little Hungarian Plain (Pannonian Basin). – *Tectonophysics* **474,** 353–366. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.11.024

SZTANÓ, O., MAGYAR, I., SZÓNOKY, M., LANTOS, M., MÜLLER, P., LENKEY, L., KATONA, L. & CSILLAG, G. 2013a: Tihany Formation in the surroundings of Lake Balaton: Type locality, depositional setting and stratigraphy. – *Földtani Közlöny* **143,** 73–98.

SZTANÓ, O., SZAFIÁN, P., MAGYAR, I., HORÁNYI, A., BADA, G., HUGHES, D. W., HOYER, D. L. & WALLIS, R. J. 2013b: Aggradation and progradation controlled clinothems and Deepwater sand delivery model in the Neogene Lake Pannon, Makó Trough, Pannonian Basin, SE Hungary. – *Global Planetary Change* **103,** 149–167. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.05.026

SZTANÓ, O., KOVÁČ, M., MAGYAR, I., ŠUJAN, M., FODOR, L., UHRIN, A., RYBÁR, S., CSILLAG, G. & TŐKÉS, L. 2016: Late Miocene sedimentary record of the Danube/Kisalföld Basin: Interregional correlation of depositional systems, stratigraphy and structural evolution. – *Geologica Carpathica* **67,** 525–542. https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0033.

TARI, G. 1992: Late Neogene transpression in the Northern Thrust zone Mecsek Mts, Hungary. – *Annales of the Eötvös University Budapest, Section of Geology* **29,** 165–187.

TARI, G. 1994: *Alpine tectonics of the Pannonian Basin*. – Unpublished PhD thesis. Rice University, Houston, Texas, 501 pp.

TARI G. & HORVÁTH F. 2010: A Dunántúli-középhegység helyzete és eoalpi fejlődéstörténete a Keleti-Alpok takarós rendszerében: egy másfél évtizedes tektonikai modell időszerűsége (Eo-Alpine evolution of the Transdanubian Range in the nappe system of the Eastern Alps: revival of a 15 years tectonic model). – *Földtani Közlöny* **140,** 483–510.

TÓTH T. 2003: *Folyóvízi szeizmikus mérések (Seismic survey on rivers).* – PhD tézis, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai Tanszék, Budapest, 141 pp.

TÓTH T. & HORVÁTH F. 1997: Neotektonikus vizsgálatok nagy felbontású szeizmikus szelvényezéssel (Neotectonic investigations using high-resolution seismic profiling). – In: MAROSI S. & MESKÓ A. (szerk.): *A paksi atomerőmű földrengésbiztonsága.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 123–152.

TÖRŐ, B., SZTANÓ, O. & FODOR, L. 2012: Inherited and syndepositional structural control on the evolution of Lake Pannon's slope, Northern Somogy, Hungary. – *Földtani Közlöny* **142,** 339–356.

UHRIN, A., MAGYAR, I. & SZTANÓ, O. 2009: Effect of basement deformation on the Pannonian sedimentation of the Zala Basin, SW Hungary. – *Földtani Közlöny* **139,** 273–282.

VÁRKONYI, A. 2012: *Late Cenozoic deformation and sedimentation based on seismic and borehole data in North Somogy (south-western Hungary).* – Unpublished MSc thesis, Depts. Regional Geology, Physical and Applied Geology & MTA–ELTE Geological, Geophysical and Space Science Research Group. Eötvös University, Budapest, 97 pp.

VÁRKONYI, A., TÖRŐ, B., SZTANÓ, O. & FODOR, L. 2013: Late Cenozoic deformation and tectonically controlled sedimentation near the Balaton zone (central Pannonian basin, Hungary). – *Occasional Papers of the Geological and Geophysical Institute of Hungary*, 72–73.

VISNOVITZ, F., HORVÁTH, F., FEKETE, N. & SPIESS, V. 2015: Strike-slip tectonics in the Pannonian Basin based on seismic surveys at Lake Balaton. – *International Journal of Earth Sciences* **104,** 2273–2285. https://doi.org/10.1007/s00531-015-1179-x

VISNOVITZ, F., JAKAB, B., CZECZE, B., HÁMORI, Z., SZÉKELY, B., FODOR, L. & HORVÁTH, F. 2021: High resolution architecture of neotectonic fault zones and post-8-Ma deformations in western Hungary: Observations and neotectonic characteristics of the fault zone at the Eastern Lake Balaton. – *Global and Planetary Change* **203,** 103540. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103540

WÉBER Z., KOROKNAI B. & SZÁRNYA CS. (szerk.) 2023: *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*. *Zárótanulmány.* – Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron–Budapest, 174 pp.

WINDHOFFER, G., BADA, G., NIEUWLAND, D., WÓRUM, G., HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 2005: On the mechanics of basin formation in the Pannonian basin: inferences from analogue and numerical modelling. – *Tectonophysics* **410,** 389–415. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.10.019

WÓRUM G. 1999: *A Mecsek–Villányi térség szerkezete és fejlődéstörténeti eseményei szeizmikus szelvények alapján (The structure and evolutionary events of the Mecsek–Villány region based on the analysis of seismic profiles).* – MSc tézis, Geofizikai Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 117 pp.

WÓRUM G. & HÁMORI Z., 2004: *A BAF kutatás szempontjából releváns a MOL Rt. által készített archív szeizmikus szelvények újrafeldolgozása (The reprocessing of the archive seismic profiles of MOL Plc. relevant for the research of the BAF).* – Kutatási jelentés. Geomega Ltd., Budapest, 39 pp.

WÓRUM, G., KOROKNAI, B., KOROKNAI, ZS., FEKETE-NÉMETH, V., KOVÁCS, G. & TÓTH, T. 2020: *Young geological deformations in Hungary (1:500 000).* – Geomega Ltd., Budapest https://doi.org/10.17632/dnjt9cmj87.1

ZÁMOLYI, A., SZÉKELY, B., DRAGANITS, E. & TIMÁR, G. 2010: Neotectonic control on river sinuosity at the western margin of the Little Hungarian Plain. – *Geomorphology* **122,** 231–243. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.028

Kézirat beérkezett: 2023. 07. 14.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 335–352., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335

Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége

Koroknai Balázs[1], Kovács Gábor[1,3], Wórum Géza[1], Békési Eszter[2], Győri Erzsébet[2], Czecze Barbara[2], Wéber Zoltán[2], Porkoláb Kristóf[2], Bozsó István[2], Szárnya Csilla[2], Szűcs Eszter[2], Németh Viktor[1], Balázs László[1,4], Szabó Gergely[3], Tóth Tamás[1]

[1]Geomega Kft., 1095 Budapest, Mester u. 4.
[2]Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, 9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.
[3]ELTE BDPK Földrajzi Tanszék, 9700 Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4.
[4]Wigner Fizikai Kutatóközpont, Nagyenergiás Fizikai Osztály, Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33.

Seismotectonics and seismotectonic hazard in Hungary

Abstract

The ultimate goal of the research project 2018-2.2.1-NKP-2018-00007, funded by the National Research, Development and Innovation Office, was to create the seismotectonic model of Hungary. The completed seismotectonic model is represented directly by two new national maps at a scale of 1:500 000: the seismotectonic and the seismotectonic hazard map of Hungary. These are the first maps of this type for the country. The new maps will serve as effective tools for various academic research projects, local and national earthquake hazard and risk assessments, strategic analyses including the entire country, and energy/infrastructure preparation/planning tasks. The main objective of the present paper is to introduce the new maps constructed in the framework of the research project.

The new seismotectonic map synthesises the currently available seismological, tectonic and geodynamic knowledge in Hungary and provides also important input data (seismology, tectonics) for the seismotectonic hazard map. The latter one presents information for professionals and the society on the seismological characteristics and the potential for near-surface fault displacements of a given area. This information is complemented by the mapped elements of the Eurocode 8 soil classes, which show the potential for earthquake amplification effects due to the local geological nearsurface features. It should be emphasized, however, that the new national seismotectonic hazard map does not replace the need for carefully planned and executed local geophysical measurements and associated engineering geological investigations prior to a specific critical infrastructure or energetic project, which are essential to determine accurately the level of local seismotectonic hazard and to plan earthquake-proof buildings. The results of future seismological, tectonic and engineering geological studies will certainly refine and, where appropriate, modify our present knowledge of the hazard.

Keywords: seismicity, active stress field, crustal deformation, fault model, active fault, seismotectonics and seismotectonic hazard, Hungary

Összefoglalás

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt végső célját Magyarország szeizmotektonikai modelljének megalkotása jelentette. A megszületett új, országos szeizmotektonikai modell „kézzelfogható”, a szakmai gyakorlatban közvetlenül is felhasználható megjelenítését két új, 1:500 000 léptékű országos térkép – Magyarország szeizmotektonikai és szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe – testesíti meg. Ezek az első ilyen típusú térképek az országról. Hatékony segítséget nyújtanak különböző alapkutatási feladatokhoz, helyi és országos léptékű földrengés-veszélyeztetettségi számításokhoz, kockázatelemzésekhez, országos léptékű stratégiai jellegű elemzésekhez, és energetikai/infrastrukturális előkészítési/tervezési feladatok megoldásához. Jelen munka fő célja a kutatási projekt keretében megszerkesztett térképek bemutatása.

Az új szeizmotektonikai térkép szintetizálja a jelenleg elérhető szeizmológiai, tektonikai és geodinamikai ismeretanyagot, és egyben fontos bemeneti adatrendszert (szeizmológia, tektonika) is jelent a szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképhez. Az utóbbi közvetlen áttekintő információkat nyújt a szakemberek és a társadalom számára egy adott terület földrengés-érintettségéről, illetve a potenciális felszínközeli vetős elmozdulásokról. Ezen információkat egészítik ki az Eurocode 8 talajosztályok térképezett elemei, amelyek megmutatják, hogy földrengés bekövetkezése esetén hol és milyen mértékű rengéserősítő hatással kell számolni. Az új országos szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térkép azonban nem váltja ki egy-egy konkrét, kritikus infrastrukturális vagy energetikai beruházás előtt az alaposan átgondolt és gondosan kivitelezett, helyi geofizikai mérések és csatlakozó mérnökgeológiai vizsgálatok elvégzését, amelyek a helyi veszélyeztetettség pontos megállapításához és földrengésbiztos épületek tervezéséhez elengedhetetlenek. A jövő szeiz-

mológiai, tektonikai és mérnökgeológiai kutatási eredményei a veszélyeztetettségre vonatkozó jelen ismereteinket bizonyosan pontosítani, adott esetben módosítani is fogják.

Tárgyszavak: szeizmicitás, aktív feszültségmező, kéregdeformáció, országos vetőmodell, aktív vető, szeizmotektonika és szeizmotektonikai veszélyeztetettség, Magyarország

Bevezetés

A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, valamint a Geomega Kft. mint konzorciumi tagok részvételével 2019. január 1-jén indult el a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal Nemzeti Kiválóság Programjának keretében az a kutatási projekt (2018-2.2.1-NKP-2018-00007), amelynek végcélját „*Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*" jelentette. A projekt célja szerint az új térképnek országos skálán kell bemutatnia a fiatal és aktív törésvonalakat, a földrengések eloszlását és fészekmechanizmusát, az aktív feszültségmező jellegét és irányítottságát, valamint hazánk földrengés-veszélyeztetettség szempontjából legérzékenyebb területeit. A projekt résztvevői számos, egymással szoros kapcsolatban lévő és egymásra épülő kutatást végeztek el; az eredményeik lehetővé tették az új, országos szeizmotektonikai modell megalkotását. Ezen vizsgálatok közül a jelen munka szempontjából kiemelendők az alábbiak:

– A térség szeizmicitásának jobb megismerése érdekében az 1996 óta modern műszeresen (azaz digitálisan és a korábbiaknál több állomással) detektált földrengések hipocentrumainak a legmodernebb egy- és többeseményes helymeghatározó algoritmusokkal történő pontosítása, továbbá az antropogén szeizmikus események kiszűrése (CZECZE et al. 2023).

– A történelmi földrengés katalógus kritikus feldolgozása, kiegészítése, áttérés egységes momentum magnitúdó skálára, továbbá a historikus és a modern műszeresen detektált szeizmicitás térképi ábrázolása (CZECZE et al. 2023).

– Új földrengés fészekmechanizmus adatbázis kialakítása (integrálva a korábbi, megbízhatónak ítélt megoldásokat is), melynek segítségével – egyéb feszültségindikátorokkal kiegészítve – lehetővé vált a Pannon-régióban uralkodó kéregfeszültség-viszonyok meghatározása és térképi ábrázolása (PORKOLÁB et al. 2023a).

– Műholdas földmegfigyelések és felszíni GNSS-mérések adatainak felhasználásával a recens kéregmozgások és kéregdeformáció feltérképezése (PORKOLÁB et al. 2023a).

– A rendelkezésre álló 2D és3D szeizmikus adatrendszer, valamint releváns irodalmi adatok felhasználásával az új országos neotektonikai térkép megszerkesztése (KOROKNAI et al. 2023b), amely a neotektonikai fázis (utolsó 6–8 millió év) során aktív szerkezeti elemeket tünteti fel.

– A felső, laza rétegek nagyító hatásának becsléséhez – a projekt keretében végzett új V_{S30}-mérések eredményeinek felhasználásával – az új országos V_{S30}-térkép megalkotása, amely a felső, 30 méter vastag rétegösszlet átlagos S-hullám sebességének földrajzi eloszlását és a legveszélyeztetettebb talajosztályok potenciális elterjedését mutatja.

Az alábbiakban az új szeizmotektonikai (KOROKNAI et al. 2023a) és szeizmotektonikai veszélyeztetettségi (KOVÁCS et al. 2023a) térképeket ismertetjük az ábrázolt térképi tartalmak földtani-geofizikai és formai hátterének bemutatásán keresztül. Ennek során mindkét térkép esetében röviden összefoglaljuk egy-egy adott diszciplína területén elért legfontosabb új eredményeket. A térképek a hivatkozott DOI-k segítségével érhetőek el (doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD és doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE) minden érdeklődő és potenciális felhasználó számára, illetve letölthetők az alábbi helyről is: http://www.geomega.hu/letoltes/.

Az új szeizmotektonikai és szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképek elemei

Szeizmotektonika alatt szorosabb értelemben a valamely régióban előforduló földrengések és az ott ismert vetők közötti kapcsolat vizsgálatát értjük (SIEBERG 1923, UDÍAS & BUFORN 1994), különös tekintettel az aktív vetőkre. Tágabb értelemben fő célja a földkéreg dinamikájának és a tektonikai folyamatoknak a vizsgálata az adott régióban. A modern szeizmotektonikai vizsgálatokban a szeizmológiai és tektonikai eredményeken kívül ma már megkerülhetetlen szerepe van az űrgeodéziai vizsgálatokból származó adatrendszereknek is, aminek a 2023. február 6-án kipattant törökországi–szíriai pusztító földrengések adtak legutóbb szomorú aktualitást (GSI 2023, ESA 2023). E vizsgálatok segítségével egybehangzóan mintegy 2–3 méteres, balos eltolódást jelző, felszíni elmozdulást dokumentáltak a földrengésekhez kapcsolódóan. A nagy mélységű vizsgálatot lehetővé tevő további geofizikai adatrendszerek segítségével a szeizmotektonikai kutatás egyes vonatkozásokban litoszférikus skálára is kiterjeszthető (LIPTAI et al. 2022).

A megszerkesztett, új *szeizmotektonikai térkép* legfőbb ábrázolt elemei a következők:

– Szeizmicitás

– Fészekmechanizmus-megoldások és más feszültségmarkerek: az aktív feszültségmező jellege (feszültségrezsim) és irányítottsága (maximális horizontális főfeszültség [S_{Hmax}])

– Alakváltozási sebesség (strain rate), az alakváltozás jellege és irányítottsága

– Szerkezeti modell: vetők és aktív vetők

Az új *szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe*n ugyancsak alapvető elemeket jelentenek a szeizmicitás és a szerkezeti modell. Az utóbbi a veszélyeztetettség szempont-

jából fontos, sekély mélységbe felhatoló, neotektonikus vetőket (Koroknai et al. 2023b) és az aktív vetőket tartalmazza.

Ezek mellett ugyanakkor – a térkép elsődleges céljával összhangban – a térkép háttereként a gyakorlati szempontból fontos EUROCODE 8 talajosztályok (Eurocode 8 2004) szerepelnek, amelyek helyzete és eloszlása alapvető jelentőségű a veszélyeztetettség megítélése szempontjából. Ezek figyelembevételével jelölhető ki ugyanis, hogy földrengések esetén hol milyen mértékű rezgéserősítő hatással kell számolni. A gyakorlati szempontból kevésbé lényeges aktív feszültségrezsimet és kéregdeformáció-adatokat e térkép nem jeleníti meg.

A fentiek szerint megszerkesztett, új szeizmotektonikai veszélyeztetettség térkép legfőbb ábrázolt elemei:

– Szeizmicitás
– Szerkezeti modell: neotektonikus és aktív vetők
– EUROCODE 8 talajosztályok

A továbbiakban a felsorolt és a térképeken is ábrázolt elemeket ismertetjük, utalva a projekt e kötetben bemutatott további főbb eredményeire és háttérismereteire.

Szeizmicitás

A magyarországi, illetve a környező alp-kárpáti-dinári régióban előforduló földrengésekkel kapcsolatos legfontosabb eredményeket Czecze et al. (2023) összegzi. A Magyarországon és a környező régióban észlelt földrengéseket az új szeizmicitástérkép (Győri et al. 2023a) mutatja be. A régió földrengéstérképéhez képest kisebb eltérést jelent, hogy Magyarország szeizmotektonikai térképe (Koroknai et al. 2023a) az M<2 magnitúdójú eseményeket is tartalmazza, ezzel is elősegítve az aktív vetők (lásd később) minél megalapozottabb értelmezését. A szeizmotektonikai térképen eltérő színekkel tüntettük fel a modern műszeres (1996-tól) és a historikus (1996 előtt) rengésadatokat. Ezt az tette indokolttá, hogy az utóbbi csoport esetében az egyes regisztrált paraméterek bizonytalansága értelemszerűen nagyobb (ami az időben visszafelé haladva fokozottan érvényesül), mint a modern, műszeresen észlelt földrengéseké. Fontos rámutatni a megfigyelési időskála korlátozott jellegére is (az adatbázis közel 1600 évre – 456-ig – nyúlik vissza), ami a földrengéseket végső soron kiváltó tektonikai folyamatok jellemző időbeli nagyságrendjéhez (10^4–10^6 év) képest rendkívül rövid.

Az összképet tekintve megállapítható, hogy Magyarországot mérsékelt szeizmicitás jellemzi a környező alp-kárpáti-dinári régióval való összevetésben (Koroknai et al. 2023a; Győri et al. 2023a; Tóth et al. 2002, 2005). Igazán jelentős rengések (M≥6) meglehetősen ritkán fordulnak elő. A mai Magyarország területén ilyen magnitúdójú földrengéseket csak a historikus események között ismerünk (2 db; Komárom, 1763 és Szombathely környezete, 456). E kategóriában érdemes még kiemelni az érmelléki földrengést is (1834), amely ugyan a mai Románia területére esik, de az a mai országhatártól kis távolságra (~12 km) pattant ki. E historikus rengés fontos jellemzője, hogy egyrészt az egyik legfontosabb hazai neotektonikus eltolódási zóna – az ún. Derecskei-vetőzóna (Wórum et al. 2020) – közvetlen romániai folytatásába esik, másrészt e földrengés a felszínt is elérő töréssel párosulhatott a korabeli leírások alapján (Selley 1835). Ezek és a terület szeizmicitására vonatkozó adatok a Derecskei-vetőzóna aktív jellegét és számottevő szeizmotektonikai veszélyeztetettségét közvetlenül is alátámasztják.

Az ország területén M≥5 földrengés is csak kevés ismert (14 db), ezek szintén a historikus események kategóriájába tartoznak. Ezek közül az időbeli közelség és a jelentős magnitúdó alapján a leginkább ismert a kecskeméti (1911, M_w~5,6), a dunaharaszti (1956, M_w=5,6) és a berhidai földrengés (1985, M_w=5,1). A kecskeméti és a dunaharaszti rengésekhez talajfolyósodás, kisebb iszapvulkánok képződése is kapcsolódott. Mindkét helyszín jelentős neotektonikus aktivitást mutató, fontos szerkezeti zónához (Kelet-Kapos- [sensu Horváth et al. 2019] és Balaton–Tóalmás-vetőzóna) kapcsolódik. A szeizmicitás és a vetőkép kapcsolatát bővebben később (*Szerkezeti modell: vetők és aktív vetők*) tárgyaljuk.

A műszeresen regisztrált rengések döntő többsége viszonylag kis magnitúdójú (M<4), így ezek érdemi veszélyt nem jelentettek a társadalom számára a modern műszeres regisztráció kezdete óta eltelt közel három évtized során. A legnagyobb magnitúdójú, modern műszeresen regisztrált rengés Heves közeléből ismert (2013, M_w=4,6), a környéken kifejezetten gyakoriak a földrengések (Győri et al. 2023a). Szerkezeti szempontból Heves környéke két markáns neotektonikus aktivitást mutató vetőzóna – a Balaton–Tóalmás-vetőzóna (Palotai & Csontos 2010, Palotai 2013) és a Vatta–Maklári-árok vetőrendszere (Petrik 2016, Petrik et al. 2016) – közvetlen szomszédságában található. E vetőzónák szerkezetileg lényegében egymás folytatásának tekinthetők, ahogy azt a szeizmotektonikai térképen ábrázolt vetőrajzolat (ún. „gyökérzónák", lásd *Szerkezeti modell: vetők és aktív vetők,* illetve Wórum et al. 2020) is jelzi.

A jelenkori feszültségmező jellege és irányítottsága

Fészekmechanizmus-megoldások

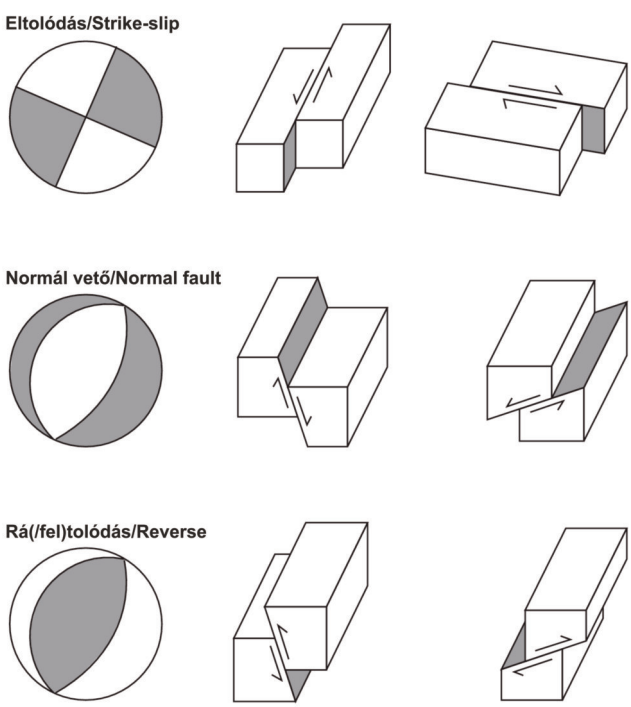
A jelenkori feszültségmező jellegére (tektonikai stílusára) mindenekelőtt a földrengések fészekmechanizmus-megoldásai alapján vonhatunk le nagy területre érvényes következtetéseket. Ennek módszertani hátterét és a legfontosabb eredményeket Porkoláb et al. (2023a) ismerteti a régióra vonatkozó jelenkori feszültségmező-térképpel együtt (Békési et al. 2023a). Az alkalmazott módszertan részleteit bővebben Békési et al. (2023b) mutatja be.

A projekt keretében összesen 50 földrengés fészekmechanizmusának kiszámítását végeztük el egységes módszertan alapján, ezek 3 kivételével mind az ország területén vagy annak nagyon szűk környezetében találhatók. A számítások egyrészt korábban publikált megoldások frissítését jelentették továbbfejlesztett algoritmusok segítségével,

másrészt 22 teljesen új fészekmechanizmus-meghatározás is történt. Az újraszámított, valamint a teljesen új fészekmechanizmus-megoldásokat a szeizmotektonikai térképen kék színnel tüntettük fel. A térkép a fentieken túl feltünteti azokat a korábban publikált fészekmechanizmus-megoldásokat is, amelyeket a projekt keretében elvégzett revízió során megbízhatónak (világoszöld színnel) ítéltünk (KOROKNAI et al. 2023a).

A fészekmechanizmus-megoldás a földrengés során aktív vetősíkot és az erre merőleges segédsíkot, továbbá a vetőmenti elmozdulás típusát jeleníti meg grafikusan. A földrengés hipocentruma köré képzelt, ún. fokális gömböt a vetősík és az erre merőleges segédsík négy negyedre osztja. Két szemközti térnegyedben a P-hullám első elmozdulása pozitív, a másik kettőben negatív. Szimmetriaokok miatt ez a mintázat nem változik meg, ha a vetősík és a segédsík szerepét felcseréljük. A fészekmechanizmus ábrázolása során elkészítjük a fokális gömb alulnézeti vetületét, amelyen jelöljük a vetősíkot a rá merőleges segédsíkkal, valamint különböző színekkel jelöljük azokat a részeket, ahol a P-hullám pozitív vagy negatív amplitúdóval távozik a hipocentrumból. Az így kapott ábrát a szeizmológiában strandlabdának nevezzük. Az egyes vetőtípusokhoz jellegzetes mintázatú strandlabda tartozik (*1. ábra*).

A maximális horizontális főfeszültség (S_{Hmax}) iránya is leolvasható a strandlabdáról: eltolódás vagy rá/feltolódás esetében az S_{Hmax} iránya megegyezik a negatív térnegyedek (fehér) közepén áthaladó, ún. P-tengely irányával. Normál vető esetén S_{Hmax}-ot a vetősík és a segédsík metszete által meghatározott, ún. N-tengely iránya adja meg.



1. ábra. A fő vetőtípusok és a hozzájuk tartozó strandlabdák (SHEARER 2009 után). Fehér szín jelöli a negatív, szürke a pozitív térnegyedeket. A jobboldalon látható sematikus blokkdiagramok a két lehetséges vetőgeometriát mutatják be

Figure 1. *Basic fault types and their corresponding beach ball representation (after SHEARER 2009). The positive quadrants are shaded. The schematic block diagrams on the right show the two possible fault geometries*

A szeizmotektonikai térképen ábrázolt fészekmechanizmus-megoldások alapján megállapítható, hogy hazánk területén uralkodóan eltolódásos, illetve kisebb részben rá- vagy feltolódásos jellegű elmozdulások fordulnak elő. Normál vetős kinematika sehol sem jelentkezett. Ebből következően a maximális főfeszültség (σ_1) mindenhol horizontális helyzetű, míg a legkisebb főfeszültség (σ_3) a hely függvényében többnyire horizontális (eltolódás), illetve kisebb részben függőleges helyzetű (rá/feltolódás). Ez utóbbi típusba tartozó fészekmechanizmus-megoldások kifejezetten jellemzőek az ország délnyugati részén (dél-Zala), de máshol is előfordulnak (például Vértes hegység, Móri-árok, Északi-középhegység tágabb környezete).

Figyelembe véve az ország környezetében a nemzetközi szeizmológiai szervezetek által közreadott megoldásokat és a korábban publikált adatrendszereket, a mérési eredmények matematikai interpolációjával meghatározhatóvá és térképezhetővé váltak a vizsgált alp-kárpáti-dinári régió egyes részterületeire jellemző mechanikai feszültségrezsimek (PORKOLÁB et al. 2023a; BÉKÉSI et al. 2023b; lásd még BADA et al. 2007b,c). A számított feszültségrezsimeket folytonos színskála segítségével jelenítettük meg az új szeizmotektonikai térképen, így ez az elem képezi a térkép hátterét. A fehér-lila színárnyalatok az extenziós/transztenziós, a (sötét)kék-zöld az eltolódásos, míg a sárga-barna színek a transzpressziós-kompressziós feszültségrezsimet jelenítik meg (*2. ábra*).

Az egyik legfontosabb eredmény, hogy Magyarországon eltolódásos, valamint transzpresszív jellegű feszültségrezsim uralkodik, sehol sem jelentkezik extenzió vagy transztenzió. A vizsgált, alapvetően eltolódásos fészekmechanizmus-megoldások közül mindössze két esetben jelentkezett gyenge normál komponens is (azaz minimális transztenziós jelleg). Ugyanakkor ezen megoldások környezetében minden más megoldás eltolódást vagy rátolódásos jelleget mutatott, így a területileg is számottevő transztenzió jelenléte kizárható. Extenziós és transztenziós rezsimek az egész vizsgált alp-kárpáti-dinári régióban is alárendelt szerepűek (lásd a szeizmotektonikai térkép melléktérképét), csak a Déli-Kárpátokban és a lengyel/szlovák határvidéken (Nyugati-Kárpátok) jelennek meg. Az utóbbi esetben a meghatározott rezsim mindössze egyetlen fészekmechanizmus-megoldásra támaszkodik. A fészekmechanizmus-megoldásokból származó kinematikai adatok összességükben tehát – összhangban a korábbi releváns tanulmányok megállapításaival (BADA et al. 2007a,b) – a kora és középső miocén extenzió során létrejött Pannon-medence jelenkori inverzióját jelzik. Az inverzió korábbi, GPS-en alapuló mérések szerint (GRENERCZY et al. 2000, 2005) az egész belső-kárpáti térség északkeleti irányba történő összenyomódásával jár együtt (lásd „*Alakváltozási sebesség*”).

Feszültségtrajektóriák

A jelenkori feszültségmező irányítottságára a földrengések fészekmechanizmus-megoldásai mellett további geofizikai-geológiai adatrendszerek (fúrólyukfal-kirepedések, ráfúrásos mérések, negyedkori kőzeteken végzett vetőanalízis) is szolgáltatnak fontos adatokat (Porkoláb et al. 2023a: 2. ábra; Békési et al. 2023b: 4. ábra és I. táblázat). A maximális horizontális főfeszültség (S_{Hmax}) indikátorok értékeit a vizsgált területre úgy interpoláltuk egy szabályos rácshálóba, hogy a regionális orientációk mellett a helyi feszültséganomáliák is tükröződjenek az interpolált feszültségmezőn. A feszültségirányok jobb áttekintése érdekében az interpolált S_{Hmax} mező alapján az ún. feszültségtrajektóriákat is kiszámoltuk, és ezeket a szeizmotektonikai térképen is megjelenítettük. Az elvégzett számítások alapján a maximális horizontális főfeszültség Magyarország területén döntően (É)ÉK–(D)DNy irányú. Kivételt képez a Kisalföld déli része, valamint az Alföld legkeletibb és északkeleti része, ahol a maximális horizontális főfeszültség kb. K–Ny-i orientációjú. A Kisalföld déli részét illetően Bada et al. (2001) numerikus modellezési eredményei szerint a térség regionális feszültségterére a topográfia lokális, gravitációs eredetű hatást gyakorol: a magasabban fekvő kelet-alpi területek K/KÉK-i irányú nyomóerőt fejtenek ki a velük határos, alacsonyabban fekvő medenceterületekre. Ezen értelmezés adatainkal összeegyeztethető (például a Stájer-medence Ausztria DK-i részén, valamint a Kisalföld tágabb környezete). Az Alföld északkeleti részén a maximális horizontális főfeszültség kb. K–Ny-i irányú befordulása regionális trendbe illeszkedik a tágabb kárpáti környezetet is figyelembe véve (Porkoláb et al. 2023a). Mindazonáltal a K–Ny-i irányú S_{Hmax} tekintetében mindkét említett részterületen még további részletes elemzések szükségesek.

Alakváltozási sebesség (strain rate)

A Pannon-medence geodinamikájának jellemzéséhez fontos adat a jelenkori kéregdeformáció jellege (rövidülés, nyúlás vagy ezek átmenetéből adódó nyírás, transzpresszió és transztenzió) és mértéke. Ezeket a paramétereket a GNSS-mérések felhasználásával határoztuk meg (Porkoláb et al. 2023a, 4. ábra; és Porkoláb et al. 2023b, 2. ábra; a módszer részleteihez lásd Porkoláb et al. 2023b), és ábrázoltuk a teljes Pannon-medence területén (Porkoláb et al. 2023c). Magyarország új szeizmotektonikai térképén szintén feltüntettük az alakváltozás jellegét és a számított alakváltozási sebességet, amely így a jelenkori feszültségmező és alakváltozás főbb jellegzetességeinek közvetlen összevetését nagymértékben elősegíti (Koroknai et al. 2023a).

Magyarország tágabb környezetében a GNSS-mérésekkel meghatározott horizontális sebességek alapján a Dinaridák max. 3 mm/év-ig terjedő sebességgel mozognak ÉÉK-i irányban, míg a romániai Kárpátok DDNy-i irányban 1,5 mm/év-ig terjedő sebességgel mozdulnak el a referenciának tekintett stabil eurázsiai lemezhez viszonyítva. A Pannon-medencét és a szlovákiai Nyugati-Kárpátokat nagyon kis (0,1–0,5 mm/év) horizontális sebesség jellemzi a Pannon-medence délnyugati részén némileg nagyobb értékekkel.

A szeizmotektonikai térképen a számított alakváltozási rátákat (strain rate) szintvonalak (fehér színnel) mutatják. A GNSS-mérések alapján meghatározott alakváltozási sebesség a horvát Dinaridák területén a legnagyobb (20 nanostrain/év), míg a vizsgált alp-kárpáti-dinári régió többi részén az alakváltozási ráta lényegesen kisebb, jellemzően 1–10 nanostrain/év tartományban változik (Grenerczy et al. 2005). Magyarországot tekintve az Északi-középhegység és környezete mutatja a legalacsonyabb alakváltozási sebességet 1 nanostrain/év körüli értékekkel. A legnagyobb alakváltozási ráták a délnyugati országrészen (a szlovén–magyar és a horvát–magyar határ mentén) jelentkeznek elérve a 6–10 nanostrain/év értéket. E résztertület tehát átmenetet képez a viszonylag gyorsan deformálódó Dinaridák, valamint az igen lassan deformálódó középső és északi országrész (és a csatlakozó nyugat-kárpáti területek) között. Mindazonáltal még a viszonylag nagyobb alakváltozási rátát mutató délnyugati országrész is abszolút értelemben meglehetősen lassú alakváltozással jellemezhető. Az összességében megfigyelt kis alakváltozási ráták lassú feszültségfelhalmozódást okoznak a földkéregben, ami összhangban van az ország területén tapasztalható mérsékelt szeizmicitással.

A szeizmotektonikai térképen az alakváltozás jellegét a rövidülés (fekete színnel) és a nyúlás (fehér színnel) irányainak feltüntetésével jelenítettük meg úgy, hogy az alkalmazott szimbólumok hossza a meghatározott alakváltozási rátával arányos. Az alakváltozás jellegét Magyarországon alapvetően rövidülés (helyenként kétirányú rövidülés – ez a térképen két, egymásra merőleges fekete vonalként jelentkezik) és transzpresszió jellemzi. A rövidülés iránya a nyugati területeken ÉÉK–DDNy-i, míg kelet felé haladva fokozatosan ÉK–DNy-ivá, majd KÉK–NyDNy-ivá, sőt északkeleten K–Ny-ivá válik. Az uralkodó rövidülés és transzpresszió az Északi-középhegység felé egyre inkább transztenziós jellegű alakváltozásra változik, hasonlóan a környező Nyugati-Kárpátokhoz (elvétve kétirányú nyúlás – ez a térképen két, egymásra merőleges fehér vonalként látható). Az alakváltozási jelleg megváltozása gyakorlatilag egybeesik a legkisebb alakváltozási ráta területi előfordulásával, ami egyben azt is jelenti, hogy a deformációs jelleg formális meghatározása számottevő bizonytalansággal rendelkezik ezen a területen.

A keleti országhatárnál egy kisebb területen (az eltolódásos jellegű Derecskei-vetőzóna környezetében) nyírásos deformáció jellemző, ahol a nyúlásos és rövidülési komponensek nagyjából egyenlőek. Kelet felé továbbhaladva az Erdélyi-medencében és a romániai Kárpátokban döntően nyúlásos, illetve transztenziós alakváltozás figyelhető meg.

A meghatározott fő rövidülési irányokat és a maximális főfeszültség-trajektóriákat összevetve összességükben jó egyezés tapasztalható, azaz az említett megfelelő horizontális alakváltozási és feszültségi tengelyek közel megegyező irányítottságúak. Ez arra utal, hogy a felsőkéregben uralkodó feszültségmező és a felszínen észlelt horizontális alak-

változás ugyanazon mechanizmusokkal áll kapcsolatban. A fentiek alól egyrészt a Kisalföld déli része, másrészt az Alföld délkeleti és keleti része jelent kivételt, amely területeken a fő rövidülés irányok (ÉÉK–DDNy és kb. KÉK–NyDNy) számottevően eltérnek a maximális horizontális főfeszültség irányától (kb. K–Ny és ÉK–DNy). E részterületeken a két irány közti eltérések elsősorban a mintázás módjának és lokációjának különbségeiből (mélybeli kéregfeszültség adatok és GNSS-alapú felszíndeformáció), valamint esetleg az elasztikus feszültségek rátafüggetlen jellegéből adódhatnak. E kérdéskör bővebb kifejtése PORKOLÁB et al. munkájában (2023a) található.

A feszültségrezsim és kéregdeformációs eredmények együttesen megerősítik, hogy a vizsgált alp-kárpáti-dinári régió geodinamikáját meghatározó két fő lemeztektonikai tényező a következő:

– Az ún. „Adria-push" (BADA et al. 2007a,b), azaz az Adria-mikrolemez folyamatos ÉÉK-i irányú mozgása és rotációja (MÁRTON et al. 2002a,b, 2003, 2006; WEBER et al. 2010; LE BRETON 2017), ami lemeztektonikai skálán Afrika és Eurázsia általános konvergenciájának a következménye. E hatás intenzitása É–ÉK felé haladva fokozatosan csökken (GRENERCZY et al. 2005), és az Északi-középhegység környezetében az alakváltozási ráta közel zérussá válik.

– A Pannon-medence mikrolemezeinek a környező kárpáti keretben blokkolt helyzete, ami nem tesz lehetővé számottevő további elmozdulást („kiszökést"). Így a medence az őt érő elsődleges tektonikai hatásra („Adria-push") jellemzően rövidüléses jellegű deformációval reagál (HORVÁTH 1995, TOMLJENOVIĆ & CSONTOS 2001, HORVÁTH et al. 2006, VRABEC & FODOR 2006). E folyamat végeredménye a medence neotektonikus inverziója, amely – a medence DNy-i részének kivételével – zömében az utolsó 5–6 millió év során ment végbe.

Szerkezeti modell

Vetők és aktív vetők

A szeizmotektonikai térképen ábrázolt vetőmodell forrását a neotektonikai térképen ábrázolt, ún. prepannóniai vetők jelentették (KOROKNAI et al. 2023b). Ezek a sekély mélységbe felhatoló neotektonikus vetők szerkezeti alapjainak („gyökérzónáinak") tekinthetők, amelyeket az új neotektonikai térkép (WÓRUM et al. 2020) mutat be (halványszürke színnel). Hangsúlyozni kell, hogy az ábrázolt prepannóniai vetők nem mindegyike mentén jelentkezett neotektonikai felújulás, ugyanakkor e vetők ábrázolása a lokális és regionális szerkezeti kontextus áttekintése szempontjából alapvető fontosságú. A prepannóniai vetők tehát országos léptékű vetőmodellként szolgáltak az új szeizmotektonikai térképhez. Az aktív vetők kijelölését a prepannóniai vetők felhasználásával végeztük el tekintettel arra, hogy az egyes vetők, vetőszegmensek aktivitásának megállapítása szempontjából kiemelt jelentőségű szeizmicitás jellemzően e prepannóniai „gyökerekhez" köthető.

Aktív vetők alatt azon vetőket/vetőszegmenseket értjük, amelyek a jelenlegi szeizmotektonikai rezsimben aktivitást mutatnak/mutattak (azaz a vető mentén elmozdulás történt), és a jövőbeli (ismételt) felújulásuk is valószínűsíthető. Aktív vetők közé értendők azon vetők is, amelyek neotektonikai aktivást (azaz sekély szerkezeti manifesztációt) ugyan nem mutattak (illetve ez földtani vagy egyéb adathiány miatt nem megállapítható), de a szeizmicitás és a szerkezeti adatok korrelációja alapján megalapozottan tekinthetők aktív szerkezeti elemnek (ún. szeizmogén vak vetők). Követve az ezirányú nemzetközi gyakorlatot (GARCÍA-MAYORDOMO et al. 2012, GANAS et al. 2013, EMRE et al. 2018, U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2020, ATANACKOV et al. 2021) az új szeizmotektonikai térképen a negyedidőszak során (≤2,6 millió év) aktivitást mutató vetőket tekintettük aktívnak. Mivel a neotektonikai térképen az elmúlt 6–8 millió év során aktív vetők felszín közeli manifesztációja került térképezésre, ez a meghatározás értelemszerűen a neotektonikus vetők (és reaktivált prepannóniai gyökerük) egy szűkebb részhalmazát jelenti csak, amelyek mentén a negyedidőszaki aktivitás közvetlen vagy közvetett adatok alapján igazolható/valószínűsíthető.

A szeizmotektonikai térképen az aktív vetőket három kategóriába (önálló jelkulccsal megjelenítve) soroltuk, figyelembe véve ATANACKOV et al. (2021) Szlovéniában végzett munkáját:

Aktív vető: közvetlen adattal igazolt aktivitás (például felszíni tektonikai/paleoszeizmológiai vizsgálattal igazolt aktivitás, geofizikai módszerrel igazolt aktivitás, vetővel korrelálható szeizmicitás, negyedidőszaki geomorfológiai indikátorok elvetése).

Valószínűleg aktív vető: közvetett adat(ok) alapján valószínűsített aktivitás (például vetővel szerkezeti kapcsolatban lévő negyedidőszaki süllyedék, negyedidőszaki geomorfológiai indikátorok, negyedidőszaki üledékek vastagságviszonyai és ismert vető közötti pozitív korreláció).

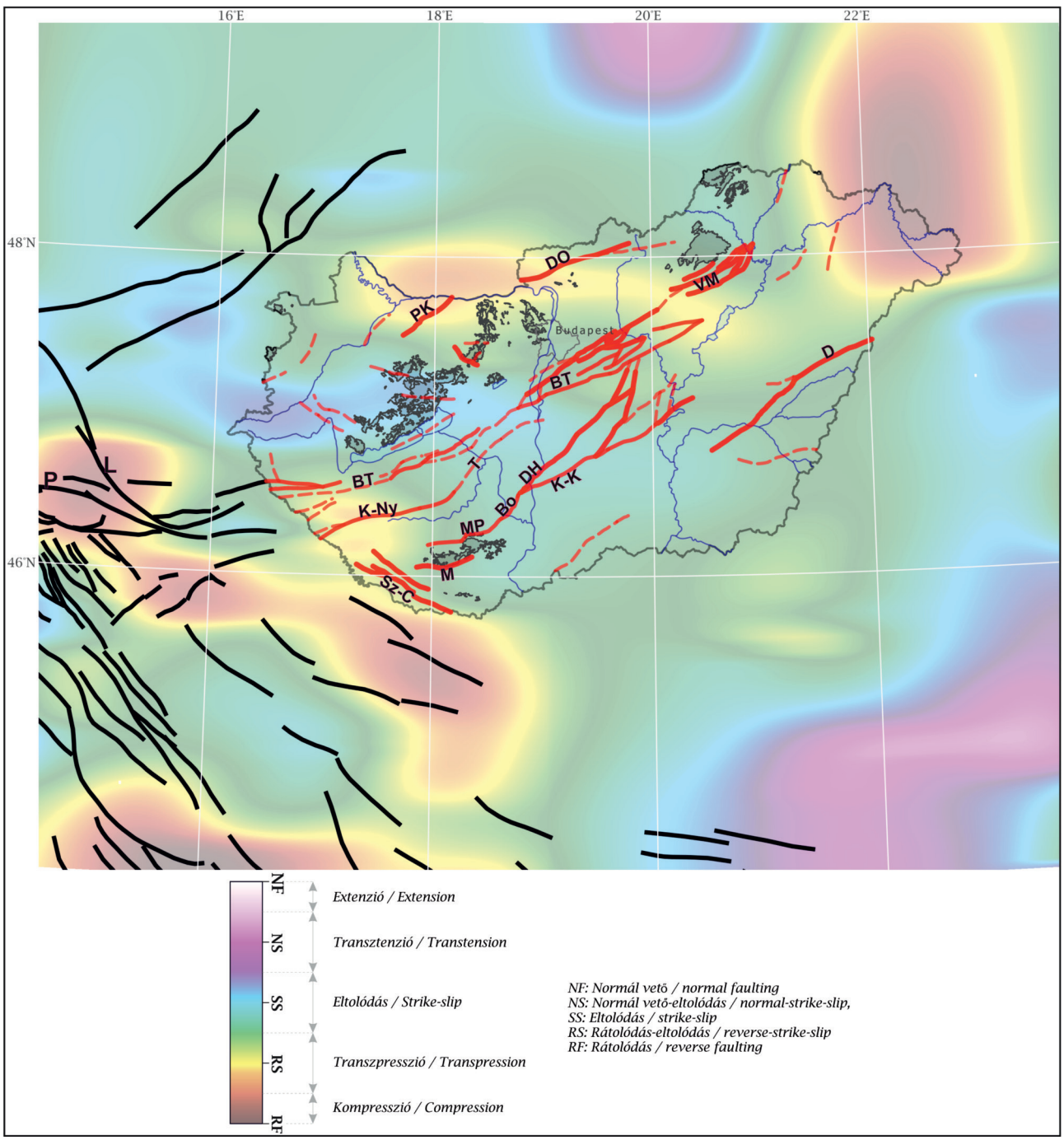
Potenciálisan aktív vető: bizonyított aktív vetővel fennálló szerkezeti kapcsolat úgy, hogy a bizonyított aktív vető mozgása előidézheti a potenciálisan aktív vető aktivitását, illetve a vetőorientáció és a feszültségmező kedvező viszonya alapján feltételezhető aktivitás. Ide soroltuk továbbá azon vetőket is, amelyek esetében a rendelkezésre álló adatok minősége/mennyisége sem az „aktív", sem a „valószínűleg aktív" minősítést megítélésünk szerint nem tette kellően megalapozottá.

Aktív vetők Magyarországon és az ország környezetében

Az aktív vetők kijelölése során figyelembe vettük a vonatkozó, elsősorban szeizmikus, illetve kisebbrészt geomorfológiai vizsgálatokból származó szakirodalmi eredményeket (POGÁCSÁS et al. 1989; DETZKY 1997; TÓTH & HORVÁTH 1997; DETZKY et al. 2002; SÍKHEGYI 2002; TÓTH 2003; FODOR et al. 2005; MAGYARI et al. 2005; FODOR 2008; SÍKHEGYI 2008; BADA et al. 2010; RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2007, 2018; HORVÁTH et al. 2019; VISNOVITZ et al. 2021). A

csak korlátozott mennyiségben rendelkezésre álló szakirodalmi adatok mellett az aktív vetők kijelölése során meghatározó jelentőségű volt a historikus és a modern műszeresen regisztrált szeizmicitás értékelése.

Az integrált értékelés során azonosított aktív vagy potenciálisan aktív vetők döntően markáns neotektonikus reaktivációt mutató vetők, illetve vetőzónákban kijelölt, uralkodóan KÉK–NyDNy-i és ÉK–DNy-i csapású vetők (*2. ábra*). Ide tartoznak a Balaton–Tóalmás-vetőzónában, a Kelet-Kapos-vetőzónában, a Derecskei- és a Vatta–Maklári-árok



2. ábra. A Magyarországon meghatározott aktív vetők (piros) kapcsolatrendszere a környező alp-kárpát-dinári régióból ismert aktív vetőkkel (fekete) Danciu et al. (2021) alapján. A színes háttér a számított aktív feszültségrezsimek jellegét mutatja. Fontosabb vetők/vetőzónák: Bo – Bonyhád, BT – Balaton-Tóalmás, D – Derecske, DH – Dunaszentgyörgy-Harta, DO – Diósjenő-Ógyalla, K-Ny – Nyugat-Kapos, K-K – Kelet-Kapos, L – Labot, P – Periadriai, M – Mecsekalja, MP – Mecsek északi pikkelyzóna, PK – Pápa-Komárom, Sz-C – Szulok-Cún, T – Tamási, VM – Vatta-Maklár

Figure 2. *The tectonic relationship between the active faults identified in Hungary (red) and in the surrounding Alp-Carpathian-Dinaric region (black) based on Danciu et al. (2021). Background colors indicate the type of active stress regimes. Important fault/fault zones: Bo – Bonyhád, BT – Balaton-Tóalmás, D – Derecske, DH – Dunaszentgyörgy-Harta, DO – Diósjenő-Ógyalla, K-Ny – Nyugat-Kapos, K-K – Kelet-Kapos, L – Labot, P – Periadriai, M – Mecsekalja, MP – Mecsek Northen imbricates, PK – Pápa-Komárom, Sz-C – Szulok-Cún, T – Tamási, VM – Vatta-Maklár*

területén és tágabb környezetében, továbbá a Bonyhádi-medencében és a Mecsek északi pikkelyzónájában értelmezett aktív vetők. Ugyancsak ide sorolható a Mecsekalja-öv, a Tamási-vető, a Dráva-medencében található ÉNy–DK-i csapású Szulok–Sellye–Cún-vetőzóna, vagy a Komárom és Pápa közt húzódó ÉK–DNy-i csapású vetőzóna a Kisalföldön. Az elsősorban szeizmicitás alapján értelmezett aktív vetőre a Diósjenő–Ógyalla-vető jelent példát. A recens szeizmicitás (lásd 2023. augusztus–szeptemberi földrengések) alapján a Szarvas közelében húzódó, ÉK–DNy-i csapású vető (amely ÉK felé a Derecskei-árok aktív vetőjével áll szerkezeti kapcsolatban) ugyancsak aktívnak minősíthető. A kijelölt aktív vetők/vetőzónák, továbbá az e vetőkhöz/vetőzónákhoz közvetlenül csatlakozó vagy szűkebb környezetükben található vetők aktivitásának részletes geofizikai, szerkezetföldtani és paleoszeizmológiai vizsgálata a jövő egyik fontos kutatási feladatát képezi a szeizmotektonikai veszélyeztetettség pontosabb meghatározása szempontjából.

Az értelmezett aktív vetők jól illeszkednek a környező alp-kárpát-dinári régióból ismert aktív vetőképbe (*2. ábra*), amely az európai szeizmogén vetőforrás modell (EFSM20 – **E**uropean **F**ault **S**ource **M**odel, BASILI et al. 2020; DANCIU et al. 2021) alapján tünteti fel a régió aktív vetőit. Az összevetés alapján jól látszik, hogy a magyarországi aktív vetők jelentős része az ún. közép-magyarországi szerkezeti övhöz sorolható, amely nyugat felé Szlovéniában és Horvátországban követhető. Ennek északi határát a Balaton–Tóalmás-vetőzóna (a Periadriai vetőzóna keleti folytatása) képezi, míg a déli peremét a Kapos-vető nyugati szegmense, illetve a Tamási-vető képezik. E regionális léptékben a Vatta–Maklári-árok területén értelmezett aktív vetők egy átlépő szerkezettel a Tóalmási-vetőzóna ÉK-i folytatásaként értelmezhetők.

A Dráva-medencében található, ÉNy–DK-i csapású Szulok–Sellye–Cún-vetőzóna egyértelműen „dinári" irányítottságot tükröz, ahogy azt a horvátországi aktív vetők helyzete is jelzi. Ezek élesen elválnak a neotektonikus közép-magyarországi mobil öv (KOROKNAI et al. 2023b) déli részéhez tartozó vetők/vetőzónák (K)ÉK–(Ny)DNy-i irányítottságától (Mecsekalja-öv, Mecsek északi pikkelyzóna, Bonyhádi-vető, Dunaszentgyörgy–Harta-vető, Kelet-Kapos-vetőzóna és csatlakozó aktív vetők).

A szomszédos Szlovénia területén azonosított aktív vetőkről ATANACKOV et al. (2021) munkája (ATANACKOV et al. 2021, fig. 4) nyújt részletes áttekintést, feltüntetve az azonosított aktív vetők kinematikáját is. Északkelet-Szlovéniában meghatározó elem az összességében kb. K–Ny-i csapású, jobbos eltolódásos Periadriai-vetőzóna (*2. ábra*), amely a markánsan eltérő szerkezeti irányítottságot tükröző alpi (északon) és dinári (délen) szerkezeti doméneket választja el.

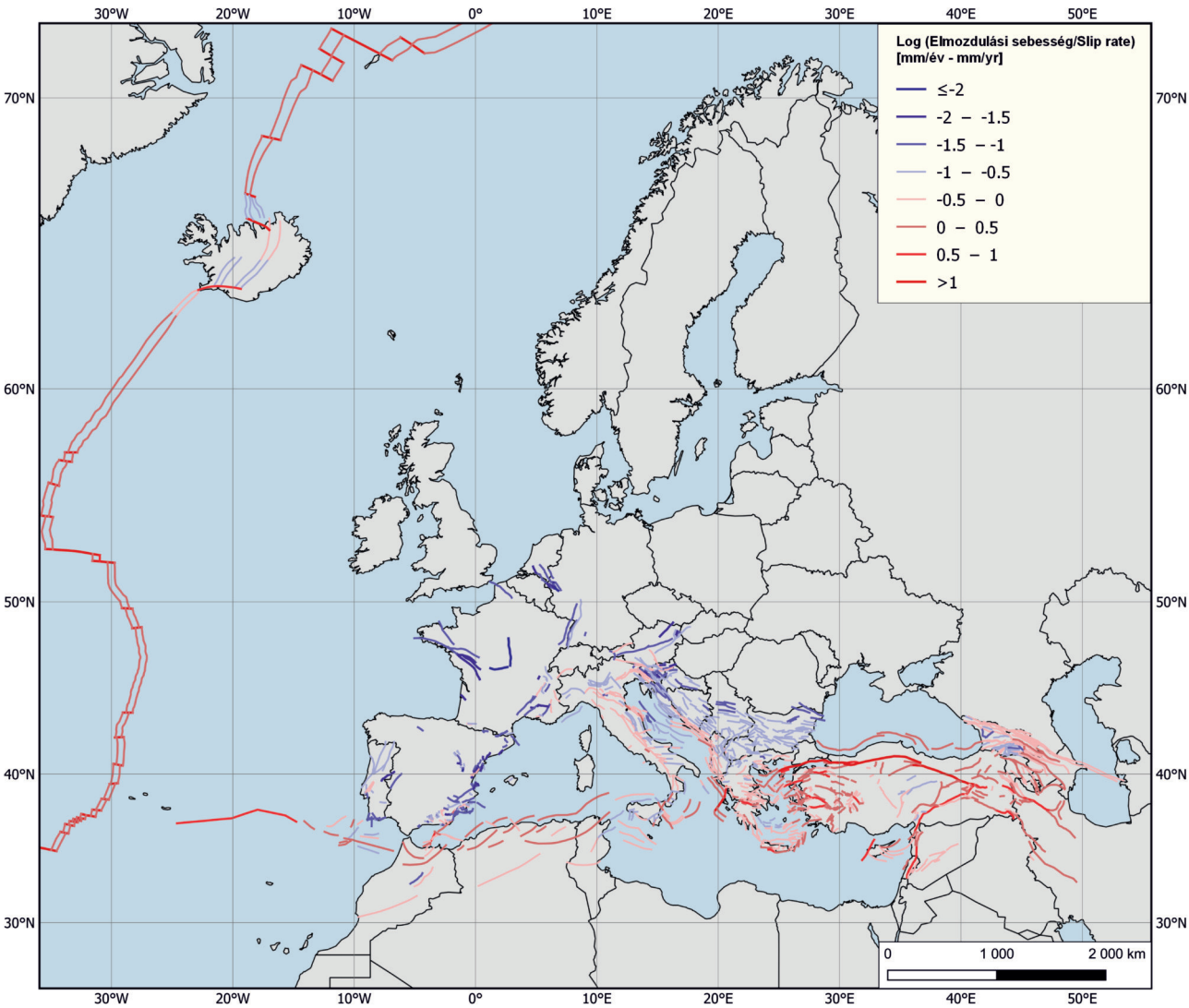
Magyarország területén az említett Periadriai-vető keleti folytatását a Balaton-vető(zóna) képezi. A kb. K–Ny-i csapású periadriai-vetőzónához észak felől csatlakozik a térképileg igen markáns, ÉNy–DK-i csapású Labot-vető (*2. ábra*), amely a „klasszikus" (miocén) Periadriai-vetőt el is veti. A Labot-vetőhöz kelet felől jellemzően KÉK–NyDNy-i csapású, rátolódásos, illetve eltolódásos kinematikájú aktív vetők csatlakoznak. Ezek közül az egyik – a lovászi antiklinális vak rátolódása – közvetlenül is csatlakozik a magyar oldalon értelmezett aktív vetőhöz (*2. ábra*; FODOR et al. 2005). A szomszédos szlovén területet is fedő Petišovci–Lovászi 3D szeizmikus adattömb szerkezeti elemzése alapján további, a szlovén térképen nem feltüntetett (vagy nem a határig érő) aktív vetők (például a budafai antiklinális vak rátolódása) jelenlétét is valószínűsítjük a szlovén és horvát oldalon. A szomszédos horvátországi aktív vetőkről TOMLJENOVIĆ & CSONTOS (2001) és TOMLJENOVIĆ et al. (2009) munkái adnak áttekintést.

Aktív vetők jellemzése: elmozdulási sebesség (slip rate)

Magyarország és környezetének geodinamikai értékelése szempontjából igen fontos paraméter az aktív vetők menti elmozdulási sebesség (*slip rate*) is. Ebben a vonatkozásban érdemes egy gyors kitekintést tenni a teljes európai és mediterrán térségre (*3. ábra*).

A térképen azonnal szembeötlik, hogy a legnagyobb vető menti elmozdulási sebességek (≥1 cm/év) egyértelműen az aktív lemezhatárokhoz (atlanti rift, égei szubdukció környezete, anatóliai lemez, Nyugat-Mediterrán térség) kötődnek, míg a lemezperemektől távolodva a vető menti elmozdulási sebességek drasztikusan csökkennek. Ezzel összhangban Magyarország környezetében az aktív vetők menti elmozdulási sebesség jellemzően kis érték (≤0,3–0,1 mm/év; a térképen halványkék színekkel), és csak elvétve éri el az 1 mm/év értéket (halvány rózsaszín). A térkép alapján hazánkban is a kék színek dominánciája valószínűsíthető, azaz a vető menti csúszási sebességek alapvetően a tized–század milliméter/év tartományban várhatók.

Ez összhangban van a projekt keretében elvégzett InSAR-feldolgozás (InSAR – Szintetikus Apertúrájú Radarfelvételek interferometrikus feldolgozása) eredményeivel (SZŰCS et al. 2023), amelyek szerint Magyarországon sehol sem volt kimutatható számottevő vetőmenti, horizontális összetevőjű elmozdulás (BÁNYAI et al. 2022). Az InSAR-feldolgozás során elsősorban olyan területeken sikerült meghatározni felszíni elmozdulásokat, ahol jelen volt valamilyen infrastruktúra (település, út, vasút, távvezeték). A legtöbb esetben ezek a területek nem estek egybe vetők környezetével, így az említett területeken detektált felszíni elmozdulás eredete nagy valószínűséggel emberi tevékenységhez köthető. Figyelembe véve a módszer érzékenységét is, a fenti eredmény mindenképpen 1 mm/évnél kisebb vető menti elmozdulási sebességet (hozzávetőlegesen ≤0,1mm/év) jelent a magyarországi aktív vetőkre. Fontos hangsúlyozni, hogy az a tény, hogy az InSAR-felvételeken nem voltak kimutathatók vető menti horizontális elmozdulások, nem jelenti az aktív tektonikai folyamatok hiányát Magyarország területén, csupán azt, hogy e folyamatok intenzitása a módszer érzékenységi küszöbe alatt marad. A valószínűsíthetően ≤0,1mm/év vető menti elmozdulási sebesség a földrengés-veszélyeztetettség szempontjából kedvező körülmény, hiszen így a vető menti feszültségfelhalmozódás Magyarország teljes területén lassú folyamat, azaz adott ve-



3. ábra. Vető menti elmozdulási sebességek (slip rate) áttekintése az európai aktív vetőkre (Danciu et al. 2021 és Basili et al. 2020 alapján). A skála logaritmikusan ábrázolja az elmozdulási sebességeket; a rózsaszín–piros színek a jelentősebb (mm–cm/év) skálájú csúszási sebességeket, míg a kék árnyalatok a lassú (tizedmilliméter/év és annál kisebb) csúszási sebességeket mutatják

Figure 3. *Overview of the slip rates along seismogenic active faults (based on Danciu et al. 2021 and Basili et al. 2020) in Europe. Note the applied logarithmic scale showing by pink to red colors the considerable slip rates (i.e. in the range of mm to cm/year) and by bluish colors the moderate to very slow slip rates (i.e. below 1 mm/year)*

tő mentén viszonylag ritkán várhatók jelentős (M_w≥5) rengések. Ám fontos újfent hangsúlyozni, hogy a kis elmozdulási sebesség az aktivitás tényét magát nem érinti, csupán az ún. visszatérési időt (adott vető mentén bekövetkező földrengések közt eltelt idő) növeli meg a viszonylag lassú feszültségfelhalmozódás következtében. Ilyen jellegű, (igen) kis vető menti elmozdulási sebesség jellemez számos nyugat-európai régiót is (pl. Rajna- és Roer-árok egyes területei, ÉNy-Franciaország; *3. ábra*), ahol a részletes paleoszeizmológiai tanulmányok azonban jelentős földrengéseket mutattak ki a földtörténeti közelmúltban, a negyedidőszak során (Camelbeeck & Meghraoui 1998, Vanneste et al. 2001, Camelbeeck et al. 2007). Ezen események integrálása a szeizmicitás adatrendszerébe rendkívül fontos, hiszen így válik lehetővé egy jól megalapozott földrengésveszélyeztetettség-elemzés elkészítése. Hazánkban eddig csak kevés paleoszeizmológiai tanulmány született, ám ezek a munkák egyértelműen igazolták a vizsgált vetők aktív jellegét (Bada et al. 2005, Magyari 2016, Horváth et al. 2019, Konrád et al. 2021).

Összegzésként megállapítható, hogy jelentős földrengések (M_w≥5) Magyarország területén is előfordulhatnak, azonban adott vetőre vonatkoztatva ezek visszatérési ideje is jelentős, nagyságrendileg néhány száz évtől néhány ezer évig terjed (Slemmons & McKinney 1977). Az értelmezett aktív vetők mentén – megfelelő sekélygeofizikai előtanulmányok után – végzett részletes paleoszeizmológiai tanulmányokkal a paleoszeizmicitás különböző paraméterei (paleoföldrengések becsült magnitúdója, visszatérési ideje) meghatározhatók, ezáltal a földrengés-veszélyeztetettség mértéke is számottevően pontosítható. A földrengés-veszélyeztetettség értékeléséhez a historikus földrengések nyomait kutató archeoszeizmológiai vizsgálatok (pl. Kázmér et al. 2020, 2021) ugyancsak értékes segítséget nyújthatnak.

EUROCODE 8 talajosztályok

Talajosztályok definíciója

A szeizmotektonikai veszélyeztetettség térkép mindenekelőtt abban tér el a szeizmotektonikai térképtől, hogy azokat az elemeket ábrázolja, amelyek legfontosabb közvetlen információkat nyújtják a társadalom és a szakemberek számára a veszélyeztetettségről.

A felszínen várható mozgások – leginkább talajgyorsulások – meghatározására irányuló veszélyeztetettségi számítások első lépése a földrengés-forrászónák kijelölése, amihez elengedhetetlenül fontos a szeizmicitás és az aktív vetők ismerete. A Magyarországon is alkalmazott valószínűségi számítások (PSHA) során a várható talajgyorsulást egy keményebb referenciatalajra adják meg. Az így kapott gyorsulási értékeket jelentősen felerősítheti a vizsgált hely geológiai felépítése és a felszíni laza üledékek jelenléte. Ezért a szeizmicitás és az aktív vetők mellett gyakorlati szempontból kiemelt jelentőségűek a talajosztályok térképezett elemei, amelyek azt mutatják meg, hogy földrengés esetén hol milyen mértékű rengéserősítő hatás jelenhet meg a helyi geológiai felépítésbeli sajátosságok következtében.

Hazánkban az épületek földrengésbiztos tervezésénél az európai sztenderd szabvány van érvényben (EUROCODE 8 2004), amiben 7 altalajosztályt különböztetnek meg a helyi hatás figyelembevételére. Közülük öthöz szorzótényezőket (A–E) rendeltek a módosító hatás jellemzésére, míg a két speciális osztályhoz tartozó talajokat egyedileg kell megvizsgálni. Az elkülönített A–B–C–D altalajosztályokhoz hozzárendelték a legfelső 30 m üledékének átlagos nyíróhullám-sebességének (V_{S30}) határértékeit (*I. táblázat*), amely paraméter egy adott helyszínen roncsolásmentesen megmérhető, és a szabványban megadott egyéb paraméterekhez képest könnyebben és hatékonyabban térképezhető.

A hullámok terjedési sebessége azért kiemelt jelentőségű a helyi hatás vizsgálata során, mert annak csökkenésével arányosan növekszik a hullám amplitúdója, ami a felszínre érve a rázás erősségében nyilvánul meg. Ezen belül is kiemelt fontosságú a nyíróhullám (S-hullám), mivel egyrészt az építményekben keletkező károkat főként a később beérkező, nagyobb amplitúdójú S-hullámok okozzák, másrészt azok terjedési sebessége sokkal kevésbé érzékeny a felszínközeli képződmények pórusainak víztelítettségére vagy a talajvízszintre. Mivel a laza üledékben lecsökken a nyíróhullámok sebessége, ugyanazon földrengés általában nagyobb földfelszíni rázkódást okoz laza üledékkel (kis V_{S30}) fedett területen, mint nagy szilárdságú (nagy V_{S30}) kőzet esetében (CIPTA et al. 2016) az epicentrumtól való távolságot megegyezőnek tekintve. (A veszélyeztetettségi számítások során referenciának a legnagyobb szilárdságú, 800 m/s V_{S30} értékkel jellemezhető A altalajosztályt tekintik, és ehhez képest határozzák meg a nagyítást.). Hazánk területének jelentős részét igen fiatal, nem vagy csak (igen) gyengén konszolidált medenceüledékek borítják, ezért a helyi hatás vizsgálata kiemelt jelentőségű a veszélyeztetettség megítélése szempontjából.

A szabványban megadott V_{S30} értékekkel jellemezhető A–D Eurocode 8 kategóriáktól kissé eltér a csak szövegesen definiált E talajosztály. Ide olyan, két réteggel jellemezhető területek tartoznak, ahol az alsó réteg nyíróhullám-sebessége nagyobb, mint 800 m/s (azaz A kategória), míg az azt fedő 5–20 m vastag üledék az S-hullám terjedési sebessége alapján C vagy D kategóriába tartozik. Az E talajosztály elkülönítésére azért van szükség, mert a két réteg határáról többszörösen visszavert hullámok egymással rezonanciába kerülnek, jelentősen felnagyítva a felszínen tapasztalható rengés erősségét.

A fentiek értelmében az Eurocode 8 szabványban elkülönített talajosztályok közül nyilvánvalóan a legkisebb sebességgel rendelkező D kategória, valamint a rezonanciaerősítés miatt az E kategória jelentik a legveszélyeztetettebb területeket. Ezek minél pontosabb lehatárolására különös gondot fordítottunk az új, országos V_{S30}-térkép készítése során. Jelen cikknek ugyan nem képezi tárgyát, de megemlítendő, hogy a nagy méretű mérnöki objektumok (például hidak, toronyházak) esetében szükséges a mélyebb üledékek által okozott, alacsony frekvenciás erősítő hatás vizsgálata is (GYŐRI et al. 2023b).

I. táblázat. Az Eurocode 8 szabvány talajosztályai és azok kőzetfizikai paraméterei. Jelen projekt csak az A–E osztályokat érintette. V_{S30}: a felszín alatti 30 m vastag kőzetanyag átlagos nyíróhullám-sebessége

Table I. *Soil classes of the Eurocode 8 and their rock physical parameters. The project involved only classes A–E. V_{S30}: average velocity of the S-wave of the rocks/sediments within the uppermost 30 meters below the surface*

Altalaj-típus	Leírás	$V_{S,30}$ (m/s)
A	Olyan kőzet, vagy egyéb képződmény, amelynek legfeljebb 5 m vastagságú lazább fedője van.	> 800
B	Olyan nagy tömörségű homokból, kavicsból vagy erősen konszolidált agyagból álló szilárd üledék, amely néhányszor 10 m vastag, a mélységgel fokozatosan egyre kedvezőbb mechanikai paraméterekkel jellemezhető.	360-800
C	Vastag, tömör, közepesen tömör homokból, kavicsból, vagy közepesen szilárd agyagból álló üledék, amelynek vastagsága néhányszor 10 m-től több száz méterig terjedhet.	180-360
D	Közepes és laza állapotú kohézió nélküli anyagból álló (esetleg néhány gyengén kötött réteget tartalmazó) üledék, vagy döntően lágy, illetve közepesen szilárd, kötött talajokból álló üledékek.	< 180
E	Olyan rétegsor, amely 5-20 m közötti vastagságú C vagy D típusba tartozóhoz hasonló V_s sebességgel jellemezhető fedőből és az A kategóriába tartozó feküből áll	-
S_1	Legalább 10 m vastag nagy plaszticitású (PI>40), agyag/iszap réteget tartalmazó, vagy teljesen abból álló nagy víztartalmú üledékek	< 100
S_2	Folyásra hajlamos talajok, érzékeny agyagok, és bármely a fentiekbe nem sorolható egyéb rétegsor	

Az új országos V_{S30}-térkép elkészítésének folyamata

A talajosztályok országos térképezése az alábbi főbb munkafolyamatokat foglalta magába:

– Új V_{S30}-mérések végzése a Geomega Kft. által újonnan fejlesztett LandStreamer eszközével előzetes szűrés alapján kiválasztott geomorfológiai

egységeken és a geomorfológai jellegek pontos meghatározása.

– Szakirodalmi V_{S30}-adatok összegyűjtése és geomorfológiai paraméterek hozzárendelése.

– Domborzatmodell(ek) és lejtésraszter létrehozása.

– V_{S30} – lejtőszög összefüggés meghatározása az országra.

– Országos V_{S30}-térkép szerkesztése az új V_{S30}-mérési és szakirodalmi adatok, valamint a projekt során nyert V_{S30} – lejtőszög összefüggés alkalmazásával.

– A legveszélyeztetettebb talajosztályok geomorfológiai térképezése fúrási adatok és publikált releváns geomorfológiai és geológiai térképek (Kocsis 2018, Gyalog et al. 2005) felhasználásával. A geomorfológiai egységek elkülönítéséhez Matsuoka et al. (2006) osztályozási rendszerét használtuk.

Terjedelmi korlátok miatt ezen kutatási fázisok előzményeit és módszertani hátterét az alábbiakban csak röviden tekintjük át, az alkalmazott módszerek részletes ismertetését Kovács et al. (2023b) munkája tartalmazza.

Országos V_{S30}-adatbázis kialakítása: új, saját mérések és szakirodalmi adatok gyűjtése

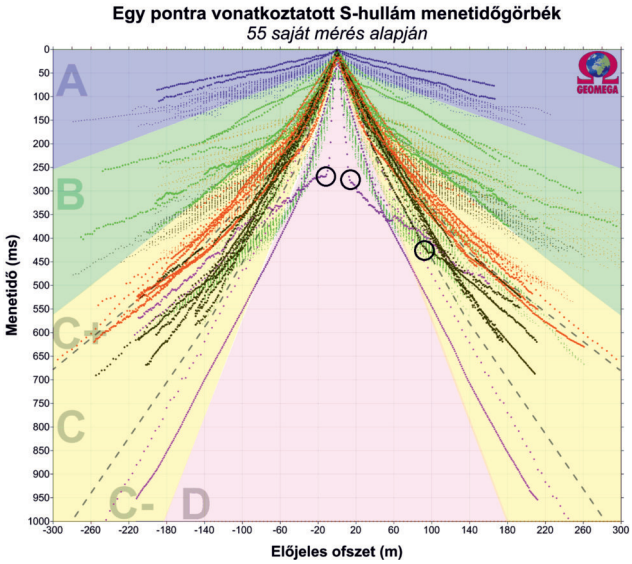
A projekt során az ország teljes területén 10 különböző geomorfológia besorolású helyszínen végeztünk méréseket, amelyek összesen 67 új V_{S30}-meghatározást eredményeztek. A méréseket a Geomega Kft. újonnan fejlesztett LandStreamer eszközével hajtottuk végre. Az S-hullám sebességértékeit nyíróhullám-tomográfia segítségével nyertük ki a mért szelvény mentén, jellegzetes pontokban meghatározva a legfelső 30 m sebességértékeit, amelyeket aztán átlagoltunk. Ez a módszer azonban csak az A–D szilárdságalapú talajosztályok közvetlen elkülönítésére alkalmas (*4. ábra*). Az E talajosztály azonosítását a 30 méter vastag földtani egységben mért sebességtrend további részletes analízise (*4. ábra*) és az adott helyszín földtani felépítéséről rendelkezésre álló információk együttes értékelése tette lehetővé. Az új mérési adatokkal így megfelelő minőségű általános képet kaptunk az országban előforduló geomorfológia egységek jellemző V_{S30}-viszonyairól.

Saját V_{S30}-mérési eredményeinket a szakirodalomból szisztematikusan gyűjtött, további 103 adattal egészítettük ki, amivel megalapoztuk az új országos V_{S30}-adatbázist.

Térképszerkesztés

A kialakított V_{S30}-adatbázis önmagában nem lenne elegendő új, országos V_{S30}-térkép megszerkesztéséhez. A V_{S30}-adatok országos kiterjesztésére a lejtőszög és a geomorfológiai/geológiai adottságok egyidejű, gondos figyelembevételével mégis lehetőség nyílik. A kiterjesztés elsődleges alapját az képezi, hogy a digitális domborzatmodellekből generált lejtőszög általánosságban megfelelő korrelációt mutat az adott területre jellemző V_{S30}-értékkel (Allen & Wald 2007, 2009), azaz nagyobb V_{S30}-értékhez nagyobb lejtőszög (és egyúttal kisebb erősítés) társul. A térképszerkesztés során alapvetően ezt, a lejtőszöget figyelembe vevő megközelítést alkalmaztuk.

Azonban a csak a lejtőszöget használó megközelítés nem



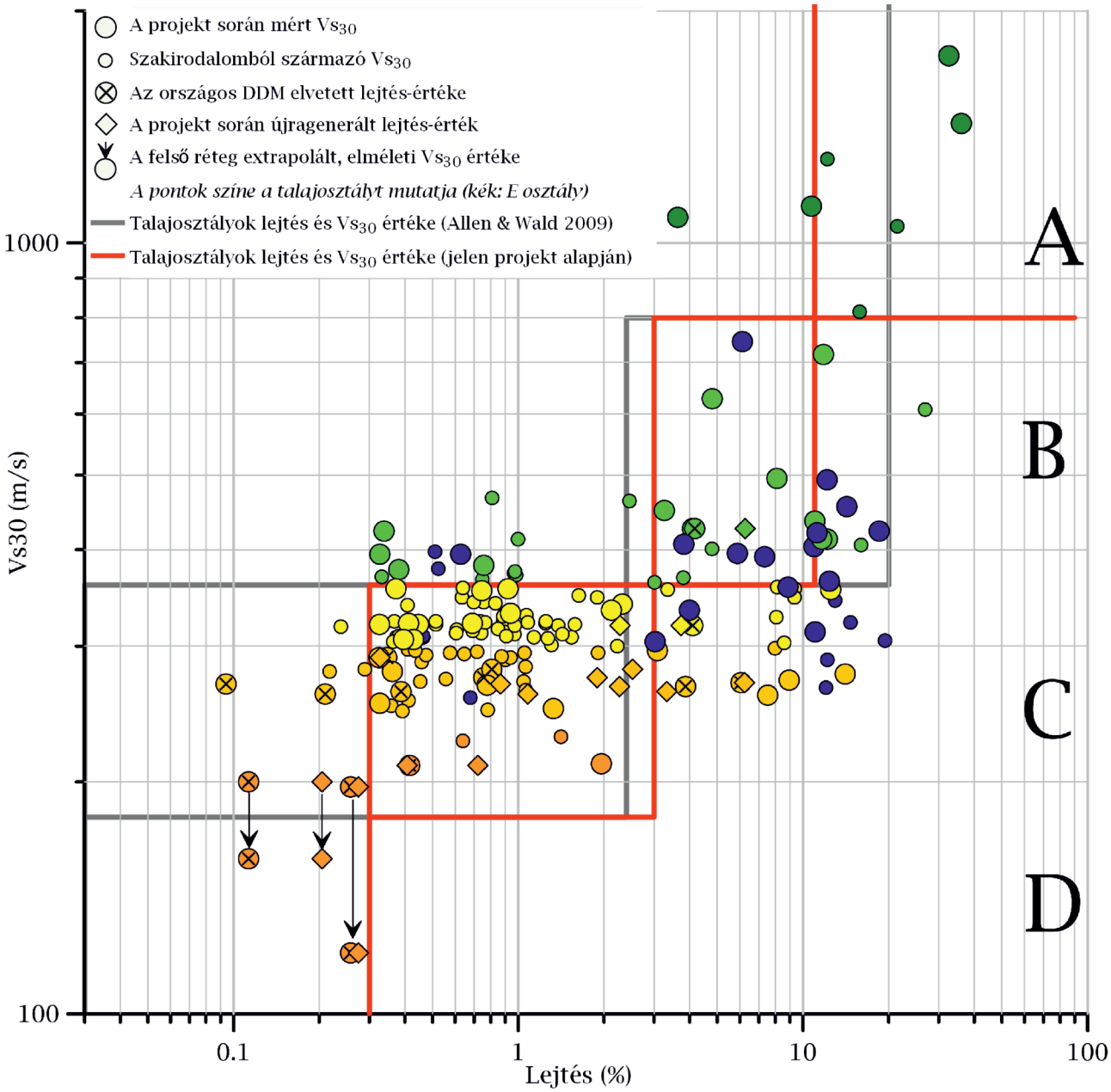
4. ábra. Egy pontra vonatkoztatott S-hullám menetidőgörbék 55 saját mérés alapján, amelyek a mérési helyszíneken az Eurocode 8 talajosztály besorolását lehetővé tették. A nagybetűk és a színezett tartományok az egyes Eurocode 8 talajosztályok tartományát jelölik. Egyes görbéken néhány jellegzetes törési pontot is jelöltünk (fekete körök), amelyek két jelentősen eltérő sebességű réteg jelenlétét jelzik az adott mérési helyszínen. Ilyen esetben további vizsgálat volt szükséges a talajosztály meghatározásához

Figure 4. *Single point S-wave travel time curves based on 55 own measurements, which allowed the Eurocode 8 soil class classification at each measurement location. Capital letters and coloured ranges indicate the range of each Eurocode 8 soil class. Some curves also show characteristic breakpoints (black circles), indicating the presence of two layers with significantly different velocities at the measurement site. In such cases, further investigation was necessary to determine the soil class*

minden esetben – például kavicsteraszok, löszplatók, hegygerincek stb. – vezet megfelelő eredményre a veszélyeztetettség besorolása szempontjából, továbbá nem is minden kategória határozható meg pusztán a lejtőszög figyelembevételével. Az említett, (közel) vízszintes helyzetű területekhez ugyanis a kicsiny lejtőszögükhöz tartozó elméleti értéknél a valóságban nagyobb V_{S30} kapcsolódik, és ebből fakadóan a helyi hatás szempontjából kisebb veszélyeztetettségűek. E példa is jól megvilágítja, hogy a lejtőszög mellett miért volt szükség az adott terület geomorfológiai és geológiai adottságainak egyidejű figyelembevételére is a térképszerkesztés során. Az integrált megközelítés alkalmazásával a saját mérésű és irodalmi V_{S30}-adatok már kellő megalapozottsággal terjeszthetők ki országos skálára.

A mérési helyszínek jellemző lejtőszögét az ország 1:10 000 méretarányú topográfiai térképeinek szintvonalaiból generált, 30 m felbontású, szükség szerint simított, raszteres domborzatmodell segítségével határoztuk meg. Nagyon kis lejtés esetén saját domborzatmodellt hoztunk létre az ingyenesen elérhető, régi topográfiai térképek felhasználásával. A felhasznált domborzatmodellekből százalékos lejtésrasztert generáltunk, és azok átlagértékeit használtuk fel a mérési helyszínek jellemzéséhez a 300 m-es sugarú környezet és az identikus geomorfológiai/geológiai egység egyidejű figyelembevételével.

A mérési helyszínek jellemző lejtőszögének ismeretében lehetővé vált az új, országos V_{S30} – lejtőszög összefüggés meghatározása (*5. ábra*: piros vonal), amely kismérték-



5. ábra. A mérési helyszínek környezetében mért átlagos lejtőszög és a mért V_{S30} összefüggése az irodalmi (ALLEN & WALD 2009: szürke) és az általunk javasolt (piros) kategóriahatárok feltüntetésével. A pontok színe a V_{S30} és a V_S trend által meghatározott talajosztályt mutatja (sötétzöld: A, világoszöld: B, sárga árnyalatai: C, kék: E osztály). A lejtést a vonatkozó szakirodalomnak megfelelően %-ban adtuk meg. 1% lejtés 100 m vízszintes távolságon 1 m emelkedés

Figure 5. *Correlation between the average slope angle and the measured V_{S30} in the vicinity of the measurement sites, with the literature (ALLEN & WALD 2009: gray) and proposed (red) category boundaries. The color of the points indicates the soil class defined by V_{S30} and V_S trend (dark green: A, light green: B, shades of yellow: C, blue: E class). Slope is given as a percentage according to the relevant literature. 1% slope at 100 m horizontal distance means 1 m rise*

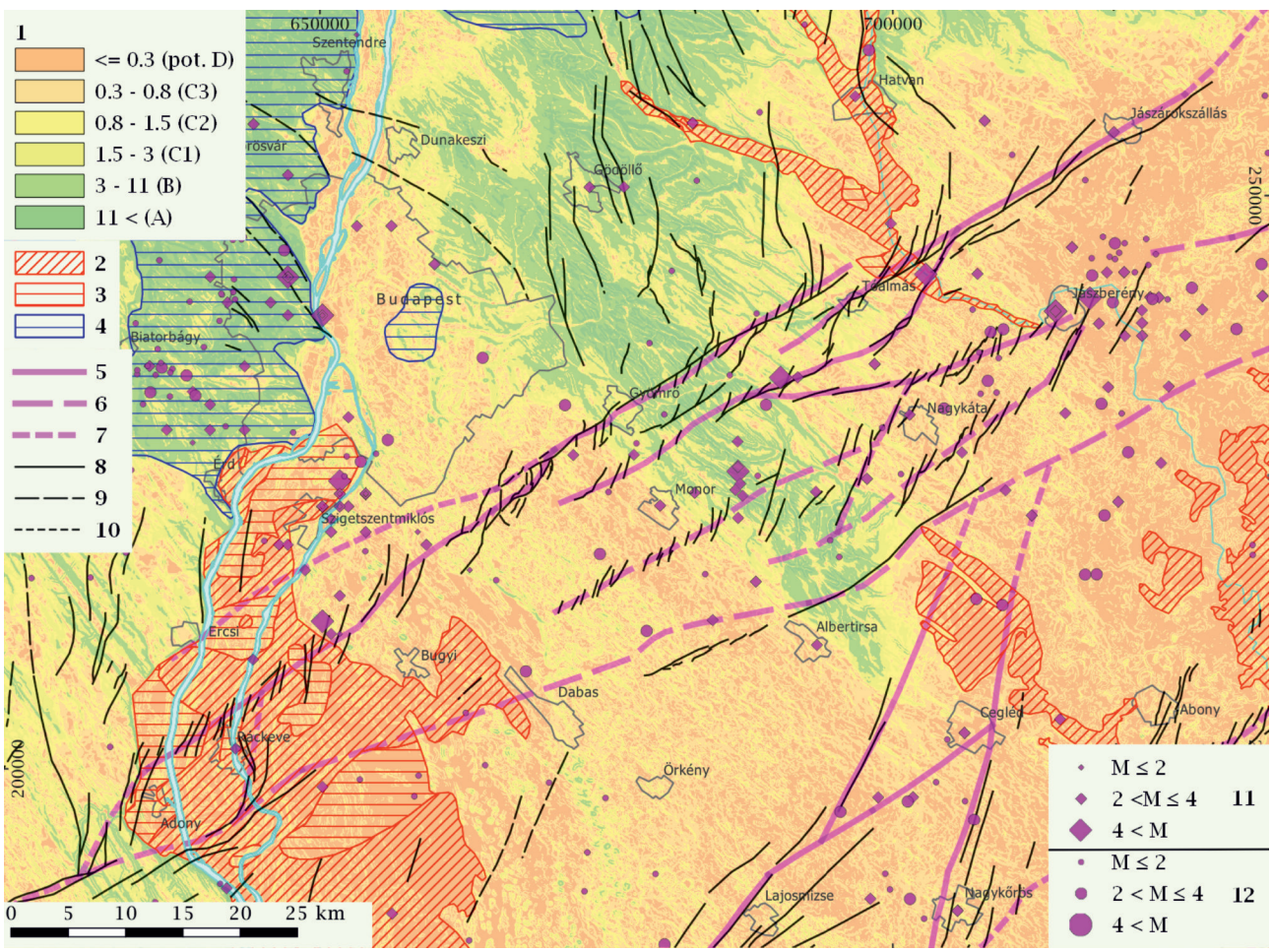
ben tér el az ALLEN & WALD (2009) globális vizsgálatai és kis felbontású domborzatmodell alapján javasolt értékeitől. Térképünk szerkesztése során a kapott lejtésértékeket használtuk fel az egyes talajosztályok színekkel történő ábrázolásához az alábbiak szerint: A: >11%, B: 3–11%, C: 0,3–3%, D: < 0,3%. Az eredmények alapján a C kategórián belül további három alosztályt (C1: 1,5–3%, C2: 0,8–1,5%, C3: 0,3–0,8%) is elkülönítettünk, és ezeket önálló jelkulcsi elemmel jelenítettük meg a térképen. Ezt az is indokolttá tette, hogy az ország területének meghatározó része a C talajosztályba (V_{S30}: 180–360 m/s) sorolható a medencejellegből fakadóan. A lejtőszög alapján becsült talajosztályokat a térkép hátterének színezése mutatja, ahol a zöld árnyalatok a kevésbé, a vörös árnyalatai a jobban veszélyeztetett területeket ábrázolják.

Az új, országos V_{S30}-térkép elkészítésében a lejtőszög meghatározása mellett elvégzett geomorfológiai besorolás két szempontból is kiemelkedően fontos volt:

(i) Egyrészt a V_{S30}-térkép közvetlen szerkesztésében, hogy az adott 300 m sugarú környezetben a lejtőszög meghatározása minden esetben csak identikus geomorfológiai besorolású területrészek figyelembevételével történjen.

(ii) Másrészt a V_{S30}-mérésekkel közvetlenül nem kimutatott D kategória – ide a legfiatalabb és legalacsonyabb morfológiai helyzetben levő folyóvízi ártéri és tavi üledékek tartoznak megfelelő vastagság (≥25 m) esetén – azonosítása tekintetében. A D kategória meghatározása a domborzatmodellből generált lejtésraszter használatával is problematikus helyenként a (nagyon) kis lejtések esetén fellépő interpolációs hibák következtében.

Az eddig elmondottakból következően a kiemelt veszélyeztetettségű geomorfológiai egységek – (i) a fiatal, alacsony morfológiai helyzetű folyóvízi ártéri és tavi üledékek (ún. „potenciális D talajosztály") és (ii) a nagy sebességű, „aljzati" kibukkanások vékony (5–20 m), laza üledékkel fedett szűkebb környezete („potenciális E talajosztály") – közvetlen meghatározása a V_{S30}-mérések és/vagy lejtőszög alapján jellemzően nem volt megvalósítható. Ezeket ezért egyedileg azonosítottuk a rendelkezésre álló geomorfológiai-geológiai jellemzők (Kocsis 2018, Gyalog et al. 2005) és fúrási adatbázisunk integrált felhasználásával. Az elnevezésben a „potenciális" mindkét esetben a fennálló bizonytalanságokra utal: a laza, konszolidálatlan (kis sebességű) ártéri folyóvízi üledékek esetében a viszonylag nagyobb szilárdságú üledékek (és ezzel a nagyobb V_{S30}) előrejelezhetetlen megjelenésére, míg az E kategória esetében a kijelölt zónán belül fellépő esetleges kimélyülésekre (azaz 20 m-nél vastagabb laza üledék jelenléte). Előfordul továbbá, hogy egy terület bár geomorfológai paraméterei alapján a potenciális D kategóriába esik, de az üledékvastagság a fúrási adatok alapján kisebb 25 méternél. A tapasztalatok szerint ilyenkor a tényleges talajosztály többnyire már nem esik a D



6. ábra. Budapest déli-délkeleti szomszédságának szeizmotektonikai veszélyeztetettsége: a területen aktív vetők húzódnak (a Balaton–Tóalmás-vetőzóna elemei), földrengésgócok figyelhetők meg, és nagy területet fednek potenciális D és potenciális E talajosztályba tartozó területek

Jelkulcs: 1 – Lejtőszög % (zárójelben az Eurocode 8 talajosztályai). Eurocode 8 talajosztályai a geomorfológiai és földtani adottságok térképezése alapján [2-4]: 2 – Potenciális D osztály (fiatal, laza üledékek vastagsága > 25 m) 3 – Pszeudo-D osztály (fiatal, laza üledékek vastagsága < 25 m) 4 – Potenciális E osztály. Prepannóniai vető negyedidőszaki aktivitása [5-7]: 5 – aktív; 6 – valószínűleg aktív; 7 – potenciálisan aktív. Késői posztrift és negyedidőszaki, felszínközeli tektonikus és atektonikus vetők [8-10]: 8 – neotektonikus vető; 9 – valószínű neotektonikus vető; 10 – bizonytalan/vitatott eredetű vető. Földrengések [11-12]: 11 – 456-1995 közti rengések helye és magnitúdója 12 – 1996-2021 közti rengések helye és magnitúdója

Figure 6. *Seismotectonic hazard south and south-east of Budapest: note active faults (elements of the Balaton–Tóalmás fault zone of regional importance), numerous detected earthquakes and large areas of potential D and potential E soil classes*

Legend: 1 – Topographic slope given in % (in brackets: the Eurocode 8 soil classes). Eurocode 8 soil classes mapped by geomorphology and geology [2-4]: 2 – Potentially class D (young loose sediment is thicker than 25 m); 3 – Class D based on geomorphology (young, loose sediment is thinner than 25 m); 4 – Mapped extent of soil class potentially E. Inferred Quaternary structural activity of pre-Pannonian faults [5-7]: 5 – Active fault; 6 – Probably active fault; 7 – Potentially active fault. Late post-rift to Quaternary tectonic and atectonic faults [8-10]: 8 – Near-surface manifestation of reactivation of pre-Pannonian fault; 9 – Poorly constrained near-surface manifestation of reactivation of pre-Pannonian fault; 10 – Faults of uncertain/debated origin. Earthquakes [11-12]: 11 – Location and magnitude of earthquakes detected between 456–1995; 12 – Location and magnitude of earthquakes detected between 1996–2021

kategóriába, ezért ezeket a területeket is önálló térképi szimbólummal ábrázoltuk. A legveszélyeztetettebb, potenciálisan D, illetve E kategóriába sorolható területeket az új veszélyeztetettségi térképen önálló jelkulccsal (piros/kék csíkozás) emeltük ki.

Szeizmotektonikai veszélyeztetettség

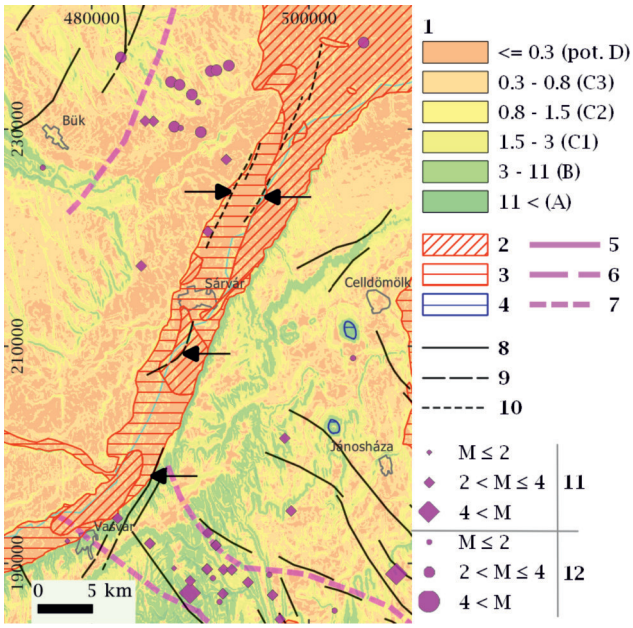
Az új, országos térképen azokat a területeket tekinthetjük a legveszélyeztetettebbnek, ahol nagyobb számú földrengést vagy ilyen területhez kapcsolódó aktív vetőt láthatunk, továbbá potenciális D vagy E talajosztály fordul elő. Ilyen területek például Délnyugat-Magyarországon Csurgó–Nagykanizsa és Zalaszentgrót környéke, Nyugat-Magyarországon Répcelak környezete (Bük–Mihályi–Sárvár háromszög). A Dunától-középhegységben és annak környezetében Várpalota–Mór, Komárom, a Bakony keleti fele, a Vértes, a Dunazug-hegység déli fele és a Csepel-sziget környéke. Ez utóbbi terület a neotektonikus fázisban és a szeizmológiai adatok alapján jelenleg is aktív Balaton–Tóalmás-vetőzónába esik számos egyedi vetőszegmenssel (*6. ábra*). E tektonikai zóna északkeleti folytatását képviseli Hatvan–Jászberény és Heves környezete (*6. ábra*), továbbá tágabb értelemben a Bükk déli fele és előtere (Vatta–Maklári-árok vetőrendszere), és Miskolc környéke. Ugyancsak a legveszélyeztetettebb területekhez tartozik Pincehely, Szabadszállás környezete és a Zempléni-hegység délnyugati oldala. Hasonlóképp veszélyeztetett az északi országrészben (Nógrádban) a Diósjenői-vonal környezete, amely az egyik legjelentősebb szeizmológiai aktivitást mutatja.

A térképezés során helyenként a negyedidőszaki folyóvízi rétegek vastagságában (lásd *6–7. ábrák* 2 és 3 jelkulcsi elemei) fúrási adatok alapján hirtelen változásokat is azonosítottunk, illetve néhol a negyedidőszaki teraszperemek feltűnően jó térbeli egybeesést mutattak a térképezett neotektonikus vetőkkel. Mindkét típusú észlelés kapcsolódhat fiatal vetőaktivitáshoz. Ilyen területek a Rába völgye (*7. ábra*), a Kisalföld délnyugati része, a Duna-völgy Budapest és Paks közt, továbbá a Hernád-, a Kapos-, a Sió-, a Kerka-völgy és a Dráva-medence is.

Végezetül fontos hangsúlyozni, hogy a térkép országos áttekintő jellegű, így az semmi esetre sem helyettesíti egy-egy kritikus energetikai/infrastrukturális beruházásnál a konkrét helyszín részletes geológiai-geofizikai vizsgálatát, amely alapján a veszélyeztetettség pontos mértéke megállapítható.

Összefoglalás

A munkánkban bemutatott térképi elemek integrált ábrázolásával készült el az ország új, 1:500 000 léptékű szeizmotektonikai és szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe. Az előbbi szintetizálja az országra és környezetére jelenleg elérhető szeizmológiai, tektonikai és geodinamikai ismeretanyagot, míg az utóbbi azon elemeket emeli ki, amelyek a legfontosabb közvetlen információkat nyújtják a társadalom és a szakemberek számára a veszélyeztetettségről. Gyakorlati szempontból kiemelt jelentőségű a szeizmicitás, az aktív és neotektonikus vetők és az EUROCODE 8 szerint meghatározott altalajosztályok ábrázolása. Ez utóbbiak azt mutatják meg, hogy földrengés kipattanása esetén hol és milyen mértékű rengéserősítő hatással kell számolnunk a helyi geológiai adottságok következtében. Mindkét térkép az első ilyen típusú áttekintés az országról.



7. ábra. Eltérő vastagságú negyedidőszaki folyóvízi rétegek (lásd 2 és 3 jelkulcsi elemek) a Rába-völgyben, amelyek aktív vető jelenlétére utalhatnak. Ezt az értelmezést erősítik a térképezett neotektonikus vetők és a regisztrált földrengések is. A fekete nyílak a neotektonikus vetőkkel feltűnően jó térbeli egybeesést mutató, eltérő vastagságú negyedidőszaki rétegek határát és teraszperemeket mutatják. A jelkulcs megegyezik a 6. ábrán feltüntetettel

Figure 7. *Irregular changes in the thickness of alluvial deposits (see elements 2 and 3 in the legend) in the Rába Valley that might indicate the presence of active faults. This interpretation is also supported by the presence of neotectonic faults and detected earthquakes. Black arrows indicate the boundary of fluvial Quaternary beds of different thickness, or Quaternary terrace-margins, both of which displaying a remarkably good spatial coincidence with mapped neotectonics faults. For legend see Fig. 6.*

A szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térkép méretaránya miatt tájékoztató jellegű, így átnézetes képet nyújt hazánk veszélyeztetettségi viszonyairól, kijelölve a kisebb vagy nagyobb veszélynek kitett területeket. A jövőbeli szeizmológiai, tektonikai és mérnökgeológiai/geofizikai kutatások e területek elhelyezkedését és kiterjedését az újabb eredmények alapján módosíthatják. Hangsúlyozzuk, hogy egy-egy stratégiai/tervezési feladat vagy konkrét energetikai/infrastrukturális beruházás esetén a térkép nem váltja ki a kellően átgondolt és precízen kivitelezett helyi geofizikai méréseket és csatlakozó mérnökgeológiai vizsgálatokat, amelyek a veszélyeztetettség mértékének pontos megállapításához szükségesek.

A szerkezeti és szeizmológiai, valamint a szakirodalmi eredmények együttes figyelembevételével értelmezett aktív vetők mentén az elmozdulási sebesség (*slip rate*) – összhangban az InSAR-elemzéséből származó megállapítások-

kal – viszonylag kis érték, jellemzően tized-század milliméter/év nagyságrendűre tehető. Ez a jelentős magnitúdójú (Mw≥5) földrengésekre néhány száztól néhány ezer évig terjedő visszatérési időt jelent adott vetőre vonatkozóan a lassú feszültségfelhalmozódás következményeként. Jelentős földrengések előfordulása tehát lehetséges, ezek kutatása a jövő egyik fontos feladatát jelenti. Ehhez fontos segítséget nyújthatnak a hazánkban eddig kevéssé elterjedt paleoszeizmológiai vizsgálatok.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is köszönetüket fejezik ki a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a 2018-1.2.1-NKP-2018-00007 jelű pályázat támogatásáért, amely a jelen kötetben bemutatott eredmények létrejöttében meghatározó szerepű volt. Munkánkat néhai prof. dr. Horváth Ferenc kollégánk emlékének ajánljuk, akinek kulcsszerepe volt a projekt megszületésében és a sikeres pályázat tudományos hátterének részletes kidolgozásában. Köszönettel tartozunk dr. Csontos Lászlónak és egy ismeretlen lektornak, továbbá dr. Fodor László szakszerkesztőnek az alapos lektori véleményekért, illetve a konstruktív, minden szakmai részletre kiterjedő kritikai megjegyzésekért, amelyek számottevően járultak hozzá a kézirat minőségének javításához. Dr. Sztanó Orsolya főszerkesztő asszonynak ezúton is köszönjük a kézirat és a térképek javítását/szerkesztését elősegítő hasznos tanácsait és technikai megjegyzéseit.

Elektronikus mellékletek

Koroknai, B., Békési, E., Bondár, I., Czecze, B., Győri, E., Kovács, G., Porkoláb K., Tóth, T., Wesztergom, V., Wéber, Z. & Wórum, G.: Seismotectonic map of Hungary https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD

Kovács, G., Koroknai, B., Győri, E., Németh, V., Balázs, L., Czecze, B., Bondár, I., Wórum, G., Szabó, G., Kegyes-Brassai, O. & Tóth, T.: Seismotectonic hazard map of Hungary https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE

Irodalom – References

Allen, T. I. & Wald, D. J. 2007: *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (V_{S30}) and Amplification Around the Globe* – Open-File Report No. 2007-1357, US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr20071357

Allen, T. I. & Wald, D. J. 2009: On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30). – *Bulletin of Seismological Society of America* **99**, 935–943. https://doi.org/10.1785/0120080255

Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Celarc, B., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A., Bavec, M. & Kastelic, V. 2021: Database of Active Faults in Slovenia: Compiling a New Active Fault Database at the Junction Between the Alps, the Dinarides and the Pannonian Basin Tectonic Domains. – *Frontier in Earth Science* **9**, 604388. https://doi.org/10.3389/feart.2021.604388

Bada, G., Horváth, F., Cloetingh, S., Coblentz, D. & Tóth, T. 2001: Role of topography induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. – *Tectonics* **20**, 343–363. https://doi.org/10.1029/2001TC900001

Bada G., Bus Z., Gribovszki K., Horváth F., Magyari Á., Mónus P., Szeidovitz Gy., Tímár G., Tóth T., Wéber Z. & Wórum G. 2005: *A tíz éve folyó mikroszeizmikus monitorozás eredményeinek szeizmológiai értékelése és a neotektonikai modell megújítása. A Paksi Atomerőmű tervezett üzemidő-hosszabbítására vonatkozó Részletes Környezeti Hatástanulmányt (RKHT) előkészítő földtani, szeizmotektonikai és geotechnikai értékelés. II. kötet: A tíz éve folyó mikroszeizmikus monitorozás eredményeinek szeizmológiai értékelése és a neotektonikai modell megújítása* – Kutatási jelentés az ETV-ERŐTERV Rt. részére, Georisk Kft. és Geomega Kft., Budapest, 219 pp.

Bada, G., Grenerczy, G., Tóth, L., Horváth, F., Stein, S., Cloetingh, S., Windhoffer, G., Fodor, L., Pinter, N. & Fejes, I. 2007a: Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian Basin: Seismicity, GPS velocities, and stress transfer. – *Special Papers Geological Society of America* **425**, 243–262. https://doi.org/10.1130/2007.2425(16)

Bada, G., Horváth, F., Dövényi, P., Szafián, P., Windhoffer, G. & Cloetingh, S. 2007b: Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. – *Global and Planetary Change* **58**, 165–180. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007

Bada G., Dövényi P., Horváth F., Szafián P. & Windhoffer G. 2007c: Jelenkori feszültségtér a Pannon-medencében és alpi–dinári–kárpáti környezetében. – *Földtani Közlöny* **137**, 327–359.

Bada G., Szafián P., Vincze O., Tóth T., Fodor L., Volkhard S. & Horváth F. 2010: Neotektonikai viszonyok a Balaton keleti medencéjében és tágabb környezetében nagyfelbontású szeizmikus mérések alapján (The neotectonic habitat of the eastern part of Lake Balaton and its broader environs: inferences from high resolution seismic profiling). – *Földtani Közlöny* **140**, 367–390.

Basili, R., Danciu, L., Carafa, M. M. C., Kastelic, V., Maesano, F. E., Tiberti, M. M., Vallone, R., Gracia, E., Sesetyan, K., Atanackov, J., Sket-Motnikar, B., Zupančič, P., Vanneste, K. & Vilanova, S. 2020: *Insights on the European Fault-Source Model (EFSM20) as input to the 2020 update of the European Seismic Hazard Model (ESHM20)*. – EGU General Assembly 2020, Online, 4–8. May 2020, EGU2020-7008. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7008

Bányai, L., Bozsó, I., Szárnya, Cs., Szűcs, E. & Weszterǵom, V. 2023: Surface displacement velocities based on PS-InSAR. Map N° 7. (1:1 500 000). – In: Wéber Z., Koroknai B. & Szárnya Cs. (szerk.): *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*. *Zárótanulmány.* – Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron–Budapest, 174 p.

Békési, E., Porkoláb, K. & Wéber, Z. 2023a: Stress field of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 309. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB

Békési, E., Porkoláb, K., Wesztergom, V. & Wéber, Z. 2023b: Updated stress dataset of the Circum-Pannonian region: Implications for regional tectonics and geo-energy applications. – *Tectonophysics* **856**, 229860. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229860

Camelbeeck, T. & Meghraoui, M. 1998: Geological and geophysical evidence for large palaeo-earthquakes with surface faulting in the Roer Graben (Northwest Europe). – *Geophysical Journal International* **132**, 347–362. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00428.x

Camelbeeck, T., Vanneste, K., Alexandre, P., Verbeeck, K., Petermans, T., Rosset, P., Everaerts, M., Warnant, R. & Van Camp, M. 2007: Relevance of active faulting and seismicity studies to assessments of long-term earthquake activity and maximum magnitude in intraplate northwest Europe, between the Lower Rhine Embayment and the North Sea. – In: Stein, S. & Mazzotti, S. (eds): *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard and Policy Issues*. Special Paper of the Geological Society of America **425**, 193–224. https://doi.org/10.1130/2007.2425(14)

Cipta, A., Robiana, R., Griffin, J. D., Horspool, N., Hidayati, S. & Cummins, P. R. 2016: A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi, Indonesia. – *Geological Society, London, Special Publications* **441**, 133–152. https://doi.org/10.1144/sp441.6

Czecze B., Győri E., Timkó M., Kiszely M., Süle B. & Wéber Z. 2023: A Kárpát-Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földrengés adatbázis. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 279–296. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.279

Danciu, L., Nandan, S., Reyes, C., Basili, R., Weatherill, G., Beauval, C., Rovida, A., Vilanova, S., Sesetyan, K., Bard, P. Y., Cotton, F., Wiemer, S. & Giardini, D. 2021: *The 2020 update of the European Seismic Hazard Model – ESHM20: Model Overview*. – EFEHR Technical Report 001 v1.0.0, ETH Zurich, December 16th, 2021. https://doi.org/10.12686/a15

Detzky L. K. 1997: Feszültségtér történet meghatározása szeizmikus szelvényeken azonosított többfázisú tektonizmus alapján, a Szolnoki flis öv nyugati peremén (Determination of stress-field history on the basis of multiphase tectonism identified in the seismic profiles, in the western part of the Szolnok flysch belt). – *Magyar Geofizika* **37**, 228–246.

Detzky, L. K., Horváth, F. & Detzky, G. 2002: Neotectonics and its relation to the Mid-Hungarian Mobile Belt. – In: Cloetingh, S., Horváth, F., Bada, G. & Lankreijer, A. (eds): *Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system*. – EGU St. Mueller Special Publication Series **3**, 247–266. https://doi.org/10.5194/smsps-3-247-2002

Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaro lu, F., Olgun, S., Elmaci, H. & Tolga, Ç. 2018: Active fault database of Turkey. – *Bulletin of Earthquake Engineering* **16**, 3229–3275. https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2

Eurocode 8. EN 1998-1 (2004): *Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. – European Committee for Standardization (CEN).

European Space Agency (ESA) 2023: *Satellites support impact assessment after Türkiye–Syria earthquakes*. 13/02/2023. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Satellites_support_impact_assessment_after_Tuerkiye_Syria_earthquakes

Fodor, L., Bada, G., Csillag, G., Horváth, E., Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Palotás, K., Síkhegyi, F., Timár, G., Cloetingh, S. & Horváth, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian basin. – *Tectonophysics* **410**, 15–41. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.06.008

Fodor L. 2008: Szerkezetföldtan. – In: Budai T., Császár G., Csillag G., Fodor L., Gál N., Kercsmár Zs., Kordos L., Pálfalvi S. & Selmeczi I. 2008: *A Vértes hegység földtana. Magyarország tájegységi térképsorozata (1:50 000).* Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 368 pp.

Ganas, A., Oikonomou, I. A. & Tsimi, C. 2013: NOA faults: a digital database for active faults in Greece. – *Bulletin of Geological Society of Greece* **47**, 518–530. https://doi.org/10.12681/bgsg.11079

García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J. M., Martínez-Díaz, J. J., Jiménez-Díaz, A., Martín-Banda, R., Martín-Alfageme, S., Álvarez-Gómez, J., Rodríguez-Peces, M., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M., Masana, E., Perea, H., Martín-González, F., Giner-Robles, J., Nemser, E. & Cabral, J. 2012: The Quaternary faults database of Iberia (QAFI v.2.0). – *Journal of Iberian Geology* **38**, 285–302. http://dx.doi.org/10.5209/rev_JIGE.2012.v38.n1.39219

Grenerczy, Gy., Kenyeres, A. & Fejes, I., 2000: Present crustal movement and strain distribution in Central Europe inferred from GPS measurements. – *Journal of Geophysical Research* **105**, 21835–21846. https://doi.org/10.1029/2000JB900127

Grenerczy, Gy., Sella, G., Stein, S. & Kenyeres, A. 2005: Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. – *Geophysical Research Letters* **32**, L16311. https://doi.org/10.1029/2005GL022947

Gyalog L. & Síkhegyi F. (szerk.) 2005: *Magyarország földtani térképe (1:100 000)*. – Magyar Állami Földtani Intézet. https://map.mbfsz.gov.hu/fdt100/

Győri, E., Czecze, B., Timkó, M., Bondár, I., Czanik, Cs., Czifra, T., Fodor, Cs., Gráczer, Z., Gribovszki, K., Gyarmati, A., Kalmár, D., Kiszely, M., Kovács, I. J., Mónus, P., Süle, B., Szanyi, Gy., Tóth, L., Varga, P., Zsíros, T. & Wéber, Z. 2023a: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020). Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 297. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA

Győri E., Kovács G. & Kádi Z. 2023b: Mély üledékek módosító hatásának vizsgálata. – In: Wéber Z., Koroknai B. & Szárnya Cs. (szerk.): *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése. Zárótanulmány.* Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron–Budapest, 174 p.

Geospatial Information Authority of Japan (GSI) 2023: *The 2023 Turkey Earthquake: Crustal deformation detected by ALOS-2 data*. 9/02/2023. https://www.gsi.go.jp/cais/topic20230206-e_Turkey.html

Horváth, F. 1995: Phases of compression during the evolution of the Pannonian basin and its bearing on hydrocarbon exploration. – *Marine and Petroleum Geology* **12**, 837–844. https://doi.org/10.1016/0264-8172(95)98851-U

Horváth, F., Bada, G., Szafián, P., Tari, G., Ádám, A. & Cloething, S. 2006: Formation and deformation of the Pannonian basin:

Constraints from observational data. – In: Gee, D. G. & Stephenson, R. A. (eds): European Lithosphere Dynamics. *Geological Society, London, Memoirs* **32**, 191–206. https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.11

Horváth F., Koroknai B., Tóth T., Wórum G., Konrád, Gy., Kádi Z., Kudó I., Hámori Z., Filipszki 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 (Structural geological and neotectonic features of the middle portion of the Kapos line based on the results of latest geophysical research). – *Földtani Közlöny* **149**, 327–350. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2019.149.4.327

Kázmér, M., Roy, A. & Prizomwala, S. 2020: Archaeoseismological potential of the Indian subcontinent. – *Current Science* **119**, 1767–1773. https://doi.org/10.18520/cs/v119/i11/1767-1773

Kázmér, M., Al-Tawalbeh, M., Győri, E., Laszlovszky, J. & Gaidzik, K. 2021: Destruction of the Royal Town at Visegrád, Hungary: Historical Evidence and Archaeoseismology of the A.D. 1541 Earthquake at the Proposed Danube Dam Site. – *Seismological Research Letters* **92**, 3202–3214. doi: https://doi.org/10.1785/0220210058

Kocsis K. 2018: *Magyarország Nemzeti Atlasza 2: Természeti környezet.* – Magyar Tudományos Akadémia, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földrajztudományi Intézet.

Konrád Gy., Sebe K. & Halász A. 2021: Késő negyedidőszaki szeizmikus aktivitás nyomai futóhomokban, a Dunaszentgyörgy–Harta vetőzónában. – *Földtani Közlöny* **151**, 179–200. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.2.179

Koroknai, B., Békési, E., Bondár, I., Czecze, B., Győri, E., Kovács, G., Porkoláb K., Tóth, T., Weszterǵom, V., Wéber, Z. & Wórum, G. 2023a: Seismotectonic map of Hungary, Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 353. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD

Koroknai B., Wórum G., Tóth T., Koroknai Zs., Fekete-Németh V. & Kovács G. 2023b: A neotektonikus fázis deformációi Magyarországon. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 313–334. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.313

Kovács, G., Koroknai, B., Győri, E., Németh, V., Balázs, L., Czecze, B., Bondár, I., Wórum, G., Szabó, G., Kegyes-Brassai, O. & Tóth, T. 2023a: Seismotectonic hazard map of Hungary. Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 355. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE

Kovács G., Koroknai B., Győri E., Németh V., Balázs L., Czecze B., Bondár I., Wórum G., Szabó G. & Tóth T. 2023b: Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettsége. – In: Wéber Z., Koroknai B. & Szárnya Cs. (szerk.): *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*. *Zárótanulmány.* Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron–Budapest, 174 pp.

Le Breton, E., Handy, M. R., Molli, G. & Ustaszewski, K. 2017: Post-20 Ma Motion of the Adriatic Plate: New Constraints From Surrounding Orogens and Implications for Crust-Mantle Decoupling. – *Tectonics* **36**, 3135–3154. https://doi.org/10.1002/2016TC004443

Liptai, N., Gráczer, Z., Szanyi, Gy., Cloetingh, S., Süle, B., Aradi, L. E., Falus, Gy., Bokelmann, G., Timkó, M., Timár, G., Szabó, Cs. & Kovács, I. J. 2022: Seismic anisotropy in the mantle of a tectonically inverted extensional basin: A shear-wave splitting and mantle xenolith study on the western Carpathian-Pannonian region. – *Tectonophysics* **845**, 229643. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229643

Magyari Á. 2016: *Késő-pleisztocén üledékföldtani, neotektonikai és paleoszeizmológai megfigyelések a tervezett PAE-II telephely tágabb környezetében.* – Kézirat, Mecsekérc, 34 p.

Magyari, Á., Musitz, B., Csontos, L. & Van Vliet-Lanoë, B. 2005: Quaternary neotectonics of the Somogy Hills, Hungary (part I): Evidence from field observations. – *Tectonophysics* **410**, 43–62. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.044

Matsuoka, M., Wakamatsu, K., Fujimoto, K. & Midorikawa, S. 2006: Average shear-wave velocity mapping using Japan engineering geomorphologic classification map. – *Structural Earthquake Engineering* **23**, 57s–68s. https://doi.org/10.2208/jsceseee.23.57s

Márton, E., Fodor, L., Jelen, B., Márton, P., Rifelj, H. & Kevrić, R. 2002a: Miocene to Quaternary deformation in NE Slovenia: complex paleomagnetic and structural study. – *Journal of Geodynamics* **34**, 627–651. https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00036-4

Márton, E., Pavelić, D., Tomljenović, B., Avanić, R., Pamić, J. & Márton, P. 2002b: In the wake of a counterclockwise rotating Adriatic microplate: Neogene paleomagnetic results from northern Croatia. – *International Journal of Earth Sciences* **91**, 514–523. https://doi.org/10.1007/s00531-001-0249-4

Márton, E., Drobne, K., Ćosović, V. & Moro, A. 2003: Palaeomagnetic evidence for Tertiary counterclockwise rotation of Adria. – *Tectonophysics* **377**, 143–156. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.08.022

Márton, E., Jelen, B., Tomljenović, B., Pavelić, D., Poljak, M., Márton, P., Avanić, R. & Pamić, J. 2006: Late Neogene counterclockwise rotation in the SW part of the Pannonian Basin. – *Geologica Carpathica* **57**, 41–46.

Palotai, M. 2013: *Oligocene–Miocene Tectonic Evolution of the Central Part of the Mid-Hungarian Shear Zone*. – PhD thesis, Department of General and Historical Geology, Eötvös University, Budapest, 147 pp.

Palotai, M. & Csontos, L. 2010: Strike-slip reactivation of a Paleogene to Miocene fold and thrust belt along the central part of the Mid-Hungarian Shear Zone. – *Geologica Carpathica* **61**, 483–493. https://doi.org/10.2478/v10096-010-0030-3.

Petrik, A. B. 2016: *Structural evolution of the southern Bükk foreland*. – PhD thesis, Department of Physcial and Applied Geology, Eötvös University, Budapest, 208 pp.

Petrik, A., Beke, B., Fodor, L. & Lukács, R. 2016: Cenozoic structural evolution of the southwestern Bükk Mts. and the southern part of the Darnó Deformation Belt (NE Hungary). – *Geologica Carpathica* **67**, 83–104. https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0005

Pogácsás Gy., Lakatos L., Barvitz A., Vakarcs G. & Farkas C. 1989: Pliocén–kvarter oldaleltolódások a Nagyalföldön (Pliocene–Quaternary strike-slip faults is the Great Hungarian Plain, Hungary). – *Általános Földtani Szemle* **24**, 149–169.

Porkoláb K., Békési E., Broerse T., Kenyeres A. & Wéber Z. 2023a: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 299–308. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.299

PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023b: Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – *Acta Geodaetica et Geophysica.* https://doi.org/10.1007/s40328-023-00409-8

PORKOLÁB K., BROERSE T., KENYERES A., BÉKÉSI E., TÓTH S., MAGYAR B. & WESZTERGOM V. 2023c: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 311. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC

RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., FODOR, L. I. & HORVÁTH, E. 2007: Neotectonics and Quaternary landscape evolution of the Gödöllő Hills, Central Pannonian Basin, Hungary. – *Global Planetary Change* **58**, 181–196. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.010

RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., CSILLAG, G., FODOR, L., BRAUCHER, R., NOVOTHNY, Á., THAMÓ-BOZSÓ, E., VIRÁG, A., PAZONYI, P. & TÍMÁR, G. 2018: Integration of new and revised chronological data to constrain the terrace evolution of the Danube River (Gerecse Hills, Pannonian Basin). – *Quaternary Geochronology* **48**, 148–170. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2018.08.003

SELLEY J. 1835: Folyvást tartó földrengések hazánkban. – *Társalkodó*, 1835. jan. 17.

SHEARER, P. M. 2009: *Introduction to Seismology*. – Cambridge University Press, Cambridge, 396 pp.

SIEBERG, A. 1932: Erdbebengeographie. – In: GUTENBERG, B. (ed.): *Erdbeben. Handbuch der Geophysik 4*, Borntraeger, Berlin, 45–97.

SÍKHEGYI, F. 2002: Active structural evolution of the western and central part of the Pannonian basin: A geomorphologic approach. – In: CLOETINGH, S., HORVÁTH, F., BADA, G. & LANKREIJER, A. (eds): *Neotectonics and Surface Processes: The Pannonian Basin and Alpine/Carpathian System*. EGU St. Mueller Special Publication Series **3**, 203–216. https://doi.org/10.5194/smsps-3-203-2002

SÍKHEGYI, F. 2008: *Neotectonics of Somogy and Zala Hills – morphostructural studies*. – PhD thesis. University of West Hungary, Sopron, 150 pp.

SLEMMONS, D. B. & MCKINNEY, R. 1977: *Definition of 'active fault'*. – Final report, US Army Engineer Waterways Experiment Station, 22 pp.

SZŰCS E., BOZSÓ I., SZÁRNYA CS., BÁNYAI L. & WESZTERGOM V. 2023: Magyarország műholdradar-interferometriás mozgásvizsgálata. – In: WÉBER Z., KOROKNAI B. & SZÁRNYA CS. (szerk.): *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*. *Zárótanulmány.* Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron-Budapest, 174 p.

TOMLJENOVIĆ, B. & CSONTOS, L. 2001: Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac basin, Croatia). – *International Journal of Earth Sciences* **90**, 560–578. https://doi.org/10.1007/s005310000176

TOMLJENOVIĆ, B., HERAK, M., HERAK, D., KRALJ, K., PRELOGOVIĆ, E., BOSTJANČIĆ, I. & MATOŠ, B. 2009: Active tectonics, seismicity and seismogenic sources of the Adriatic coastal and offshore region of Croatia. – In: SLEJKO, A. & REBEZ, D. (eds): *28 Convegno Nazionale "Riassunti Estesi delle Comunicazioni"*; Stella Arti Grafice, Trieste, Italy, 133–136.

TÓTH L., MÓNUS P., ZSÍROS T. & KISZELY M. 2002: A Pannon-medence szeizmicitása. – *Földtani Közlöny* **132**, 327–337.

TÓTH, L., GYŐRI, E., MÓNUS, P. & ZSÍROS, T. 2005: Seismicity and seismic hazard in and around Hungary. – In: *NATO Advanced Research Workshop: Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries*, 169–172.

TÓTH T. 2003: *Folyóvízi szeizmikus mérések (Seismic survey on rivers).* – PhD thesis, ELTE, Geofizikai Tanszék, Budapest, 141 pp.

TÓTH T. & HORVÁTH F. 1997: Neotektonikus vizsgálatok nagyfelbontású szeizmikus szelvényezéssel (Neotectonic investigations using high-resolution seismic profiling). – In: MAROSI S. & MESKÓ A. (szerk.): *A paksi atomerőmű földrengésbiztonsága.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 123–152.

UDÍAS, A. & BUFORN, E. 1994: Seismotectonics of the Mediterranean Region. – *Advances in Geophysics* **36**, 121–209. https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60538-5

U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2020: *Quaternary fault and fold database for the United States*. https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/faults

VANNESTE, K., CAMELBEECK, T. A., VERBEECK, K. & MEGHRAOUI, M. 2001: 150-kyr. record of sur-face faulting from new trench site across the Bree fault escarpment, Roer Valley Graben. Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe. – *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* **18**, 1–5.

VISNOVITZ, F., JAKAB, B., CZECZE, B., HÁMORI, Z., SZÉKELY, B., FODOR, L. & HORVÁTH, F. 2021: High resolution architecture of neotectonic fault zones and post-8-Ma deformations in western Hungary: Observations and neotectonic characteristics of the fault zone at the Eastern Lake Balaton. – *Global and Planetary Change* **203**, 103540. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103540

VRABEC, M. & FODOR, L. 2006: Late Cenozoic tectonics of Slovenia: structural styles at the Northeastern corner of the Adriatic microplate. – In: PINTER, N., GRENERCZY, Gy., WEBER, J., STEIN, S. & MEDAK, D. (eds): The Adria microplate: GNSS geodesy, tectonics and hazards. *NATO science series IV, Earth and environmental Sciences* **61**, Dordrecht, Netherlands: Springer, 151–168.

WEBER, J., VRABEC, M., PAVLOVČIČ-PREŠEREN, P., DIXON, T., JIANG, Y. & STOPAR, B. 2010: GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. – *Tectonophysics* **483**, 214–222. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.001

WÓRUM, G., KOROKNAI, B., KOROKNAI, ZS., FEKETE-NÉMETH, V., KOVÁCS, G. & TÓTH, T. 2020: *Young geological deformations in Hungary*. – Geomega Ltd., Budapest https://doi.org/10.17632/dnjt9cmj87.1

Kézirat beérkezett: 2023. 06. 29.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 353., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD

Seismotectonic map of Hungary

Koroknai, Balázs[1], Békési, Eszter[2], Bondár, István[3], Czecze, Barbara[2,4], Győri, Erzsébet[2], Kovács, Gábor[1,5], Porkoláb, Kristóf[2], Tóth, Tamás[1], Wesztergom, Viktor[2], Wéber, Zoltán[2], Wórum, Géza[1]

[1]Geomega Kft.
[2]Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
[3]Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet
[4]ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
[5]ELTE BDPK Földrajzi Tanszék

Magyarország szeizmotektonikai térképe

Összefoglalás

Magyarország új szeizmotektonikai térképe a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, a 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt keretében készült el 1:500 000 léptékben. Az új szeizmotektonikai térkép szintetizálja az országra jelenleg elérhető szeizmológiai, tektonikai és geodinamikai ismeretanyagot, áttekintést nyújtva a historikus és modern műszeresen regisztrált szeizmicitásról, a jelenkori feszültségrezsimről és kéregdeformációról, továbbá a jelentősebb prepannóniai és aktív vetőkről. A szeizmotektonikai térkép és az ugyancsak megszerkesztett szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térkép a projekt keretében elkészült térképsorozat záró tagjai, amelyek a projekt legfőbb eredményeit összesítve mutatják be.

Kulcsszavak: szeizmotektonika, Magyarország, térkép

Abstract

The new seismotectonic map of Hungary has been constructed at a scale of 1:500 000 in the framework of the research project 2018-2.2.1-NKP-2018-00007, funded by the National Research, Development and Innovation Fund. The new seismotectonic map synthesizes the seismological, tectonic and geodynamic knowledge currently available for the country, providing an overview of historical and instrumentally precisely recorded, recent seismicity, present-day stress regime and crustal deformation, as well as important pre-Pannonian and active faults. The new seismotectonic map, futhermore the new seismotectonic hazard map also prepared in the project, are the final part of a series of maps produced as essential project-products, which summarize the main results of the project.

Keywords: seismotectonic, Hungary, map

Creating and analyzing the seismotectonic model of Hungary

SEISMOTECTONIC MAP OF HUNGARY

by

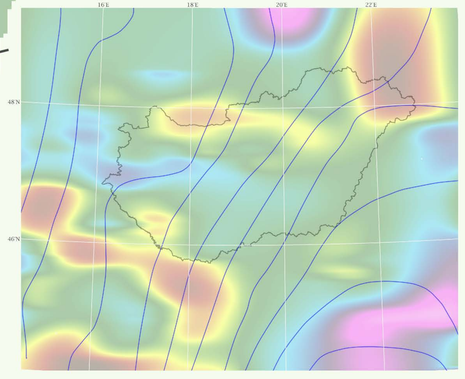
Institute of Earth Physics and Space Science
Geomega Ltd.

1:500 000

PROJECT FINANCED FROM THE NRDI FUND

2018-1.2.1-NKP-2018-00007

Stress regime of the broader region



Legend

Seismology

- M≤2
- 2<M≤4
- 4<M≤5

Location and magnitude of earthquakes detected between 1996-2021

- M≤2
- 2<M≤4
- 4<M≤6
- M>6

Location and magnitude of earthquakes detected between 456-1995

Earthquake with focal mechanism solution

New or recalculated focal mechanism solution

Confirmed existing focal mechanism solution

Current stress and strain

Maximum horizontal stress (S_{Hmax}) trajectories inferred from focal mechanism solutions and borehole breakouts

Principal strain rate tensor
Direction of shortening (black) and extension (white)
(length of symbols is proportional to the strain rate magnitude)

Strain rate magnitude contour (nanostrain/yr)

Stress type inferred from focal mechanism solutions



NF: normal faulting, NS: normal/strike-slip, SS: strike-slip, RS: reverse/strike-slip, RF: reverse faulting

Structural elements

Pre-Pannonian root zones of important faults
(with or without neotectonic reactivation)

- Faults constrained by seismic, borehole or surface geological data
- Poorly constrained, suspected or model-driven fault interpretation

Inferred Quaternary structural activity of pre-Pannonian faults

- Active fault/fault segment (constrained by direct data)
- Probably active fault/fault segment (constrained by indirect data)
- Potentially active fault/fault segment (constrained by structural considerations)

Other symbols

Geology and geography

- Rivers and lakes
- Outcrops of the pre-Cenozoic basement

0 10 20 30 40 50 km

Map projection: Hungarian National Grid (EOV, EPSG: 23700)
Cultural data source: OpenStreetMap contributors
Map compiled by Geomega Ltd.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD

Reference:

Koroknai, B., Békési, E., Bondár, I., Czecze, B., Győri, E., Kovács, G., Porkoláb K., Tóth, T., Wesztergom, V., Wéber, Z., Wórum, G. 2023: Seismotectonic map of Hungary. Földtani Közlöny 153/4, 353.

For explanation of the map see:

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335

Koroknai B., Kovács G., Wórum G., Békési E., Győri E., Czecze B., Wéber Z., Porkoláb K., Bozsó I., Szárnya Cs., Szűcs E., Németh V., Balázs L., Szabó G., Tóth T. 2023: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. Földtani Közlöny 153/4, 335-352.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 355., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE

Seismotectonic hazard map of Hungary

Kovács, Gábor[1,5], Koroknai, Balázs[1], Győri, Erzsébet[2], Németh, Viktória[1], Balázs, László[1,3], Czecze, Barbara[2], Bondár István[4], Wórum, Géza[1], Szabó, Gergely[5], Kegyes-Brassai, Orsolya[6], Tóth, Tamás[1]

[1]Geomega Kft.; [2]Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet; [3]Wigner Fizikai Kutatóközpont;
[4]Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet;
[5]ELTE BDPK Földrajzi Tanszék; [6]Széchenyi Egyetem, Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék

Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe

Összefoglalás

Magyarország új szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, a 2018-2.2.1-NKP-2018-00007 kutatási projekt keretében készült el 1:500 000 léptékben. Az új szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térkép közvetlen áttekintő információkat nyújt a szakemberek és a társadalom számára egy adott terület földrengés-érintettségéről, illetve a potenciális felszínközeli vetős elmozdulásokról. Ezen információkat egészítik ki az Eurocode 8 talajosztályok térképezett elemei, amelyek megmutatják, hogy földrengés bekövetkezése esetén hol és milyen mértékű rengéserősítő hatással kell számolni. A szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térkép és az ugyancsak megszerkesztett szeizmotektonikai térkép a projekt keretében elkészült térképsorozat záró tagjai, amelyek a projekt legfőbb eredményeit összesítve mutatják be.

Kulcsszavak: szeizmotektonika, veszélyeztetettség, Magyarország, térkép

Abstract

The new seismotectonic hazard map of Hungary was constructed at a scale of 1:500 000 in the framework of the research project 2018-2.2.1-NKP-2018-00007, funded by the National Research, Development and Innovation Fund. The new seismotectonic hazard map provides direct overview information for professionals and the society on the seismic hazard of a given area and potential near-surface seismic displacements. This information is complemented by the mapped elements of the Eurocode 8 soil classes, which show where and to what extent earthquake amplification effects should be expected, if earthquake occurs. The new seismotectonic hazard map, futhermore the seismotectonic map also prepared in the project, are the final part of the series of maps as essential project-products, which summarize the main results of the project.

Keywords: seismotectonics, hazard, Hungary, map

Creating and analyzing the seismotectonic model of Hungary

SEISMOTECTONIC HAZARD MAP OF HUNGARY

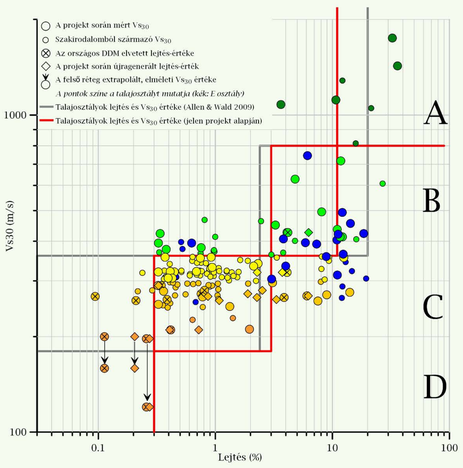
by

Institute of Earth Physics and Space Science
Geomega Ltd.

1:500 000

PROJECT FINANCED FROM THE NRDI FUND

Project: 2018-1.2.1-NKP-2018-00007



Vs_{30} — slope correlation of literature data and own measurements with Eurocode 8 soil classes (A—E)

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE

Reference:

Kovács, G., Koroknai, B., Győri, E., Németh, V., Balázs, L., Czecze, B., Bondár, I., Wórum, G., Szabó, G., Kegyes-Brassai, O., Tóth, T. 2023: Seismotectonic hazard map of Hungary. Földtani Közlöny 153/4, 355.

For explanation of the map see:

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335

Koroknai B., Kovács G., Wórum G., Békési E., Győri E., Czecze B., Wéber Z., Porkoláb K., Bozsó I., Szárnya Cs., Szűcs E., Németh V., Balázs L., Szabó G., Tóth T. 2023:. Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. Földtani Közlöny 153/4, 335-352.

Legend

Topographic slope %
(in brackets the Eurocode 8 soil classes)

- <= 0.3 (potential D)
- 0.3 - 0.8 (C3)
- 0.8 - 1.5 (C2)
- 1.5 - 3 (C1)
- 3 - 11 (B)
- 11 < (A)

Eurocode 8 soil classes mapped by geomorphology and geology

- Potentially class D (young loose sediment is thicker than 25 m)
- Class D based on geomorphology, but the young, loose sediment is thinner than 25 m
- Mapped extent of soil class potentially E

Inferred Quaternary structural activity of pre-Pannonian faults

- Active fault/fault segment (constrained by direct data)
- Probably active fault/fault segment (constrained by indirect data)
- Potentially active fault/fault segment (constrained by structural considerations)

Late post-rift to Quaternary tectonic and atectonic faults (<6-8 Ma)

- Near surface manifestation of reactivation of pre-Pannonian fault
- Poorly constrained or suspected near surface manifestation of reactivation of pre-Pannonian fault
- Faults of uncertain/debated origin

Earthquakes

- M ≤ 2
- 2 < M ≤ 4
- 4 < M

Location and magnitude of earthquakes detected between 456-1995

- M ≤ 2
- 2 < M ≤ 4
- 4 < M

Location and magnitude of earthquakes detected between 1996-2021

0 10 20 30 40 50 km

Map projection: Hungarian National Grid (EOV, EPSG: 23700)
Cultural data source: OpenStreetMap contributors
Map compiled by Geomega Ltd.

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 357–374., Budapest, 2023

DOI: 10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.357

Visegrád pusztulása az oszmán-török hódoltság előtt – az 1541-es földrengés történeti és archeoszeizmológiai nézőpontból

KÁZMÉR Miklós[1], AL-TAWALBEH, Mohammad[1,2], GYŐRI Erzsébet[3], LASZLOVSZKY József[4], GAIDZIK, Krzysztof[5]

[1]Eötvös Loránd Tudományegyetem, Őslénytani Tanszék, Budapest, mkazmer@gmail.com, Orcid: 0000-0003-1092-1316
[2]Ministry of Education, Irbid, Jordan, moh_tawalbeh89@yahoo.com
[3]HUN-REN FI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, Budapest, gyori@seismology.hu
[4]Department of Medieval Studies, Central European University, Budapest, Hungary –Vienna, Austria, Laszlovj@ceu.edu
[5]Institute of Earth Sciences, University of Silesia, Sosnowiec, Poland, krzysztof.gaidzik@us.edu.pl

Destruction of Visegrád before the Ottoman occupation – historical and archaeoseismological data on the 1541 earthquake

Abstract

The Danube Bend was the site of the proposed Nagymaros dam, part of the Gabčikovo–Nagymaros hydropower complex in Slovakia and Hungary. The dam was designed in the 1970s to resist intensity VI seismic events. We present historical and archaeological evidence for an intensity IX earthquake on 21 August 1541, which destroyed buildings in the royal town of Visegrád. Evidence includes vertical fissures cutting through the 30 m high, 13th century donjon Salamon Tower, built on hard rock. Some parts of the 15th century Franciscan friary situated in the town of Visegrád, built on the alluvial plain, collapsed due to liquefaction of the subsoil. The date of a potentially responsible earthquake on 21 August 1541 was recorded in a sermon of the eyewitness Lutheran minister Péter Bornemisza, living at Pest, 35 km away. Taken by the Ottoman army in 1544, the royal town and the palace of Visegrád lost strategic importance, never to be rebuilt. Photographs and drawings of the donjon made three centuries later faithfully reflect the status of 16th century seismic damage, corroborated by modern archaeological excavations in the ecclesiastic complex. Investigations in historical seismology and archaeoseismology are essential components during planning of critical facilities.

Keywords: archaeoseismology, historical seismology, Visegrád

Összefoglalás

A Duna-kanyar lett volna a helyszíne a tervezett nagymarosi duzzasztógátnak, a bős–nagymarosi vízerőműrendszer legalsó tagjának. A gátat az 1970-es években tervezték olyan stabilra, hogy ellenálljon VI-os intenzitású földrengéseknek. Magyarországon eddig még nem alkalmazott eljárással történeti följegyzéseket, fényképeket és rajzokat, valamint régészeti ásatások adatait sorakoztatjuk fel annak igazolására, hogy 1541. augusztus 21-én egy IX-es intenzitású rengés pusztította el Visegrádot. Bizonyítékaink között vannak a Salamon-tornyot kettévágó hasadék és a királyi palota szomszédságában egykor állt ferences kolostor maradványain felismerhető deformációs jelenségek. A Salamon-toronyról a 19. század végén készült rajzok és fényképek hűen dokumentálják a 16. századi földrengéskárokat. A pontos datáláshoz a rengés során tönkrement ferences kolostor – régészeti ásatásokkal megtámogatott – története szolgáltat adalékokat. A királyi palotára és a kolostorra vonatkozó történeti dokumentáció elemzésével megállapítottuk, hogy Visegrád katasztrófájáért korábban a települést pusztító nagy árvizek mellett az a rengés lehetett felelős, amelyet 1541. augusztus 21-én Pesten élt át Bornemisza Péter, későbbi lutheránus püspök. Visegrádot 1544-ben elfoglalta a török, ezáltal megszűnt stratégiai jelentősége; a pusztuló és romos épületeket és a várost nem építették újjá. A történeti és régészeti kutatások eredménye ismét felhívja a figyelmet arra, hogy kritikus létesítmények tervezésénél elengedhetetlen feltétel a környezet történeti-szeizmológiai és archeoszeizmológiai vizsgálata.

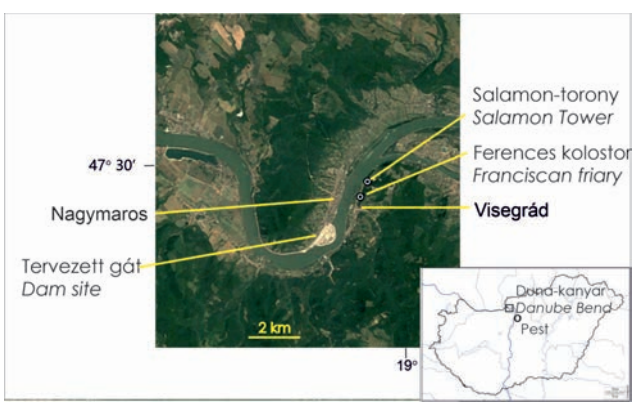
Tárgyszavak: archeoszeizmológia, történeti szeizmológia, duzzasztógát

Bevezetés

A Duna-kanyarban vágja át Európa második legnagyobb folyója a Magyar-középhegységet. A 200 méter mélyre bevágódott meder a hegység kiemelkedésének ütemében ma is mélyül (RUSZKICZAY-RÜDIGER et al. 2005, KARÁTSON et al. 2006). A térképi nézetben U alakú folyómeder ma még ismeretlen tektonikai folyamatok eredőjeként alakulhatott ki (*1. ábra*). A szűkület mint egy duzzasztógát ideális színhelye már jó évszázada foglakoztatja a vízépítő mérnökök fantáziáját. A terv majdnem valóra vált, amikor Csehszlovákia és Magyarország 1977-ben szerződést kötött a Bős–Nagymaros vízerőmű-komplexum megépítésére. Ebben Nagymaros és Visegrád között gáttal zárták volna el a Dunát. A visszaduzzasztott területre érkezett volna a csúcserőműként működő bősi duzzasztó napi kétszeri árhulláma, illetve egy kisebb erőművet építettek volna magába a gátba.

A terület földrengés-veszélyeztetettségét akkoriban minimálisnak tartották, mert sem a modern, műszeres korból, sem történeti adatok alapján nem volt ismert olyan rengés, amely esetleg veszélyeztette volna a tervezett létesítményeket (RÉTHLY 1952, ZSÍROS 2000). A tervezéskor figyelembe vett, mértékadó intenzitás VI-os volt az MSK-64 skálán (MISTÉTH 1987).

A megindult építkezést végig követték a földtani (BENCE et al. 1991, KORPÁS & CSILLAGNÉ TEPLÁNSZKY 1999) és mérnökgeológiai vizsgálatok (GÁLOS et al. 1988). Sem a megelőző vizsgálatok során, sem az alapárok kiásásakor nem találtak földrengési tevékenységre utaló nyomot. Ennek ellenére az 1980-as évek végén aggodalmak merültek föl a gát szeizmikus biztonságát illetően (CSEREPES et al. 1989). A hivatalos vizsgálat (BIZOTTSÁG 1989) megállapította, hogy a tervezés során nem készült korszerű szeizmológiai kutatás. A Geofizikai Intézet által időközben rohamtempóban elkészített szakvéleményt, mely szerint IX-es intenzitású esemény bekövetkeztére kellene méretezni az erőművet, a vízépítő mérnökök elhárították a közeli, középkori erődítmények épségére hivatkozva (MISTÉTH 1994). Végül a bekövetkező politikai változások következtében, de részben azokat kezdeményezve Magyarország kihátrált a szerződésből. A bősi erőmű és csatolt műtárgyai megépültek – akkor már – Szlovákiában, a nagymarosi gát ügye pedig *ad acta* került. A politikai, gazdasági, környezetvédelmi és műszaki viták azóta sem zárultak le. Ezek friss összefoglalását adja a gátat pártolva ZSUFFA et al. (2023) és ellenezve REYNOLDS (2020) tanulmánya. Jelen tanulmányunkban történeti és régészeti adatokat tárunk az olvasó elé egy archeoszeizmológiai vizsgálat eredményeként, melyben bemutatjuk, hogy Visegrád középkori épületei mikor és milyen mértékű földrengési károsodást szenvedtek.



1. ábra. A Duna-kanyar Google Earth felvételen 1994. december 31-én. A folyó medrében látható a nagymarosi gát építését szolgáló körtöltés (később elbontották) és a vizsgált középkori épületek helye

Figure 1. *Site of the proposed Nagymaros dam and medieval archaeological sites at Visegrád. Vintage Google Earth image, dated 31 December 1994. The dam construction site is still visible, removed later*

Módszerek

Két épületet tanulmányoztunk részletesebben: az úgynevezett Salamon-tornyot és a volt ferences kolostort. Mindkettő a Duna partján, a hajdani királyi palota közelében áll. Figyelembe vettünk a városban álló más épületekre vonatkozó történeti adatokat is. A régészeti ásatások során feltárt talajrétegeket a rajtuk álló épületalapokkal összefüggésben értékeltük. Archeoszeizmológiai terepi vizsgálataink során az épületeken vagy azok megmaradt részein észlelt sérülési bélyegeket azonosítottuk, fölmértük és leírtuk. Ahol restaurálás és újjáépítés során ezeket eltakarták, ott archív rajzokat és fényképeket tanulmányoztunk. Rajzokkal és fotókkal dokumentáltuk a megfigyeléseket. Sorozatfelvételekből háromdimenziós modelleket készítettünk az Agisoft Metashape szoftverrel (FORLIN et al. 2017). A falak és sérüléseik irányát és dőlésszögét lézer távmérővel, mérőszalaggal, dőlésmérővel, kitűzőléccel és lézerszintezővel mértük meg. Új módszert fejlesztettünk ki a jellegtelen, de erősen deformált padlószint fölmérésére. Négyzethálóban fölfektetett, 10×10 cm-es rácspontokba állított mérőléc osztásait lézeres szintező segítségével olvastuk le. ArcGIS 10-ben végzett TIN interpolációval készült a 3D modell. Az ESI-2007 környezeti szeizmicitási skálát alkalmaztuk a rengés intenzitásának megállapítására (MICHETTI et al. 2007). A sérülési mintázatokat az Archeoszeizmológiai Adatbázisban található fényképekkel vetettük össze (KÁZMÉR & GAIDZIK 2023).

Eredmények és értékelésük

Visegrád és a Duna-kanyar

A Duna két oldalán, egymással szemben mintegy 600 m-re található a bal parton Nagymaros község és a jobb parton Visegrád városa (*1. ábra*). A 13. és a 16. század között Visegrád egyike volt a Magyar Királyság uralkodói székhelyeinek, sőt a 14. században fővárosi szereppel is bírt. Nagymaros virágzó kereskedelmi település volt a középkorban. A 16. század közepétől, az oszmán-török hódítástól kezdve Visegrád elvesztette korábbi jelentőségét, és gazdasági élete lehanyatlott. Sohasem nyerte vissza korábbi szerepkörét. A nagy építkezések megszűntek, az épületeket elhagyták, anya-

gukat kitermelték, egy részüket pedig a hegyoldal törmeléke és földcsuszamlások betemették (IVÁN 2004).

Visegrád és Nagymaros egyaránt a Duna legalsó, pleisztocén teraszára épült, de házsorai felhúzódtak a szomszédos hegyek lejtőire is (PÉCSI 1959). Kutatásaink során Visegrád kevés, akárcsak részleteiben fennmaradt középkori épületét vizsgáltuk: a Salamon-tornyot, amely egy 13. századi lakótorony, a királyi palotakomplexumot és a szomszédos ferences kolostort. Vizsgálataink arra irányultak, hogy esetleges múltbéli földrengések nyomaira találjunk (KÁZMÉR et al. 2019, 2021), illetve hogy magyarázatot kapjunk a ferences kolostor régészeti feltárása során megfigyelt, nagymértékű szintsüllyedésre.

Salamon-torony

A Salamon-torony miocén korú andezit piroklasztikum kőanyagából épült (TÖRÖK 2008). Visegrád városától délre áll egy meredek, andezit agglomerátumból álló hegyoldalon, mintegy 35 méterre a Duna fölött. A hajdani lakótorony megnyúlt hatszög alaprajzú: 30 m hosszú észak-déli irányban és 17 m széles erre merőlegesen. Ma 30 méteres magasságig állnak falai (*2. ábra*).

Történetét IVÁN (2004) alapján az alábbiakban foglaljuk össze. A Salamon-torony és környezete volt a visegrádi erődrendszer alsó vára, melyet a Duna folyami és parti úti forgalmának ellenőrzésére építettek. IV. Béla király a 13. század közepén építtette a tatárjárás után kiépült dunai védővonal egyik legfontosabb elemeként (LASZLOVSZKY 2021). Belsejét a 14. században átalakították uralkodó rezidencia céljára. Ezt követően, tönkremeneteléig csak katonai célokra használták.

A lakótorony belseje öt emeletre tagolódik. A falak mindenhol egyenletesen 3,5 m vastagok, kivéve az északi és a déli sarkot, ahol 8 méteresek. A nyugati és a keleti falban minden szinten egy-egy faragott kőelemekkel kialakított ablaknyílást találunk. A déli sarok 8 méteres falában volt hajdan az emeletekre vezető lépcső. A déli sarok helyén néhány évtizede még egy hatalmas omlás volt látható, mely révén a torony egész belseje feltárult (*2. ábra*). Ezt – köztes, fából készült megoldások után – ma 20. századi, kő és beton kiegészítés takarja (LŐVEI 2014). Valamennyi még álló falat függőleges hasadékok szelnek át (*3, 4. ábra*).



2. ábra. V alakú sérülés a Salamon-torony déli sarkában, az I. Ferdinánd csapatai által vezetett várostrom eredménye. Az 1540. október 12-én bekövetkezett omlás feltárta a lakótoronynak mind a hat emeletét. A szemlélővel szembenéző, keleti oldalon az ablakok vonalában végigfutó, függőleges repedés látható – ez erős földrengés nyoma, mely az ostrom okozta sérülésektől függetlenül keletkezett. BESZÉDES Sándor felvétele 1870-ben (Forster Központ Fotótára 52495N) (BOZÓKI 2014, 2. ábra)

Figure 2. *V-shaped collapse damaged all six floors of Salamon Tower as seen in 1870. View from east. The collapse scar on the left was caused by cannonfire on 12 October 1540. Note the vertical fracture along the vertical row of windows – this is an indication of severe seismic shaking. Photograph by Sándor BESZÉDES (Photo Archives of Forster Centre 52495N) (BOZÓKI 2014, fig. 2)*



3. ábra. A Salamon-torony nyugati oldalán, a teljes 35 méteres magasságon, az ablakok vonalában végigfutó, függőleges hasadék: erős földrengés bizonyítéka. GREGUS Antal ceruzarajza 1872-ből (Forster Központ Fotótára 55908N) (BOZÓKI 2014, 4. ábra)

Figure 3. *Vertical fissure across all six floors on the western facade of Salamon Tower, a clear signal of severe seismic shaking. Pencil drawing by Antal GREGUS in 1872 (Photo Archives of Forster Centre 55908N) (BOZÓKI 2014, fig. 4)*



4. ábra. A Salamon-torony észak felől. Az ék alakban összefutó, ablaktalan falak középvonalában jól látszik egy-egy függőleges hasadék. Jakob ALT grafikája 1821–1826-ból (BOZÓKI 2014)

Figure 4. *Salamon Tower from north. Both windowless walls bear a vertical fissure, down to the middle of the height; these are potential markers of earthquake shaking. Etching by Jakob ALT, ca. 1821–1826 (BOZÓKI 2014)*

A déli sarok omlása az 1540-es ostrom következménye. Ennek során I. Ferdinánd magyar király csapatai négy napon át ágyúzták a tornyot, benne a Szapolyai Jánoshoz hű védőssereggel. Az utolsó napon az öt emelet magas fal leomlott, és a várvédők megadták magukat. A négy évvel későbbi török foglalás eredményeképpen az építmény elvesztette stratégiai jelentőségét, ezért sem a lakótornyot, sem az azt körülvevő alsóvárat nem építették többé újjá.

A 19. században, amikor még a királyi rezidencia emléke nem halványult el, különféle restaurálási módokkal kísérleteztek. Eleinte követ és fát, később, az 1970-es években az akkor divatos vasbeton pótlást alkalmazták. A homlokzati kőpótlás és a vakolás lényegében minden katonai vagy természeti eredetű sérülést eltüntetett (BOZÓKI 2005, 2014). Ezeket ezért elsősorban a 19. századi rajzokon, felméréseken és fényképeken lehet tanulmányozni. Az ily módon meg-



5. ábra. Magas, karcsú tornyokat hosszában kettéhasító, földrengés okozta sérülések. A) A 2012-es földrengésben megsérült templomtorony (Finale Emilia, Emilia-Romagna tartomány, Olaszország) (ACITO et al. 2014, 2a ábra). B) Az 1880-as földrengésben hosszában végighasadt torony (Szent Márk-templom, Zágráb, Horvátország) (KOZÁK & ČERMÁK 2010, 105. ábra). C) A 2009-es, Mw 6,3-as földrengésben megsérült harangtorony (L'Aquila, Olaszország) (PRECIADO et al. 2020, 10. ábra). D) A 14. században épült Mansourah-mecset minaretje az algériai Tell-hegységben, a marokkói határ közelében, erősen szeizmikus zónában. A metszet az 1870-es években készülhetett (MORENA 2015, 1. ábra)

Figure 5. *Earthquake-induced vertical fissures along slender, tall towers. A) Bell tower damage in the 2012 earthquake (Finale Emilia, Emilia-Romagna, Italy) (ACITO et al. 2014, fig. 2a). B) The 1880 earthquake vertically cut through the bell tower of St. Marcus church in Zagreb, Croatia (KOZÁK & ČERMÁK 2010, fig. 105). C) Bell tower damaged in the 2009 earthquake, Mw 6,3 (L'Aquila, Italy) (PRECIADO et al. 2020, fig 10). D) Minaret of the 14th century Mansourah mosque in the Tell Mts, Algeria, near the Moroccan border, standing in a strongly seismic zone. Graphic probably from the 1870s (MORENA 2015, fig. 1)*

őrződött információ az 1544-es török foglalást közvetlenül megelőző idők állapotát mutatja (2–4. ábra), és alkalmas archeoszeizmológiai vizsgálatokra.

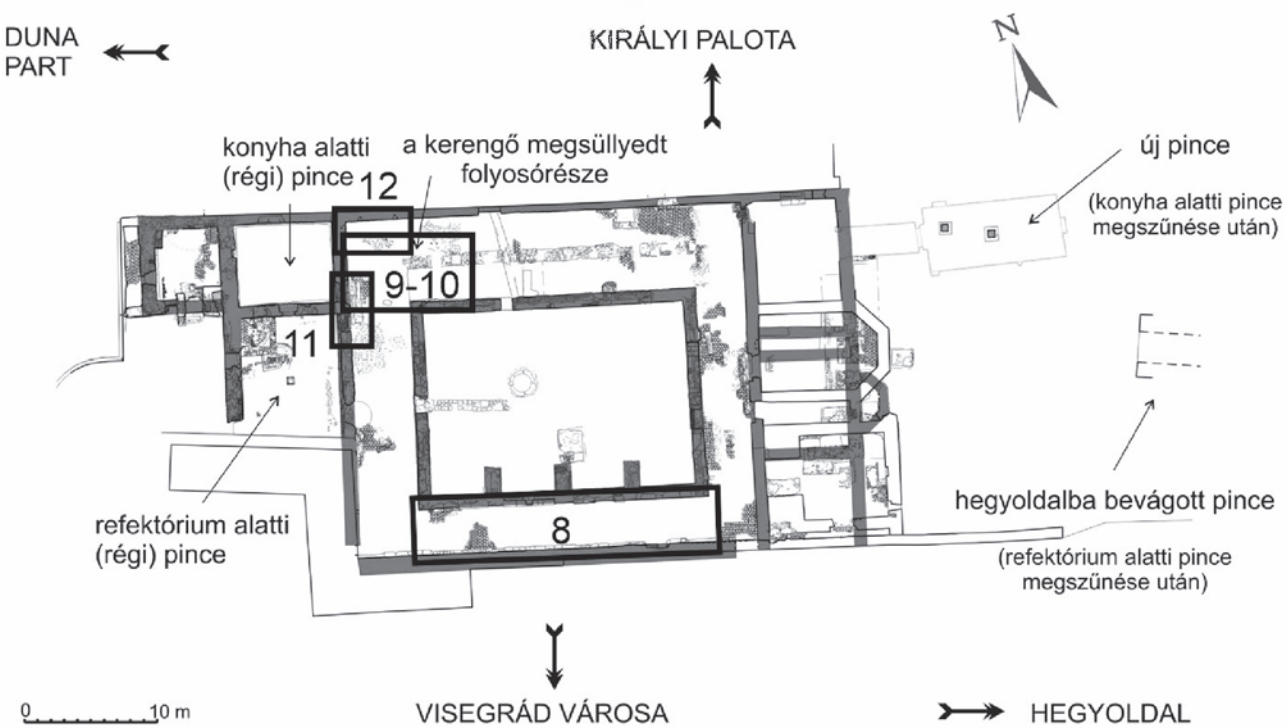
A leginkább föltűnő sérülés az 1540-es ostrom következtében leomlott sarok helye (IVÁN 2004). A *2. ábra* fényképét és a *3. ábra* rajzát megfigyelve láthatjuk, hogy vannak a tornyon az ostromhoz nem köthető sérülések is. A keleti, hegy felőli és a nyugati, Duna felőli homlokzat közepén, mind az öt emeleten, az ablakok sorát követve végighúzódik egy-egy függőleges hasadék (*2, 3. ábra*). Ezeken kívül az északi sarkot bezáró két, ablak nélküli falat is félmagasságig végigtagolja egy-egy hasadék (*4. ábra*). Földrengés által megrongált tornyok, legyenek akár lakó- vagy temetkezési helyek, vagy templomtornyok, gyakran viselnek hasonló sérüléseket, általában az egymással szemben álló falak középvonalában (*5. ábra*). A tunéziai Sousse várának (*kasbah*) saroktornya a 859-es földrengésben repedt végig (BAHROUNI et al. 2020, 4.2 ábra). Az angliai Broadstairs Szent Péter-templomának tornya az 1580-as rengés nyomait viseli (MUSSON 2007, 10. ábra). A Fülöp-szigeteki Manila Szent Ágoston-templomának az 1880-as rengésben megsérült tornyával egyetemben (SAITA et al. 2004, 5b ábra) valamennyien jól mutatják a jelenséget. Nemegyszer a végighasadt toronynak egyik fele leomlott, míg a másik állva maradt: az olaszországi Emilia-Romagna-tartománybeli Finale Emilia óratornya 2012-ben szenvedett hasonló sérülést (*5. A ábra*) (ACITO et al. 2014). Míg a Salamon-torony déli sarkának leomlása történeti forrásokkal pontosan dokumentált, a többi függőleges hasadék mind olyan falat szel át, melyek az ágyútűztől védettek voltak. Ezért gondoljuk úgy, hogy ezeket a hasadékokat földrengés okozta.

A ferences kolostor

A visegrádi királyi palota tőszomszédságában találhatók a kolostor régészetileg feltárt maradványai (BUZÁS et al. 1995). Zsigmond király alapította 1424-1425-ben az obszerváns ferences rend számára (LASZLOVSZKY 2009). A Duna legalsó teraszára épült a kelet-nyugati tájolású, Szűz Máriának szentelt gótikus templom és az északon hozzá csatlakozó, négyszög alaprajzú kolostorépület. Mátyás király fedezte a 1470–1480-as renoválás és megnagyobbítás költségeit. A 16. század elején (Jagelló-kor) pedig további átépítésekre került sor. Szokatlan részlete az épületnek, hogy a kerengő északi szárnya szélesebb volt, mint a többi; itt egy sor vörösmárvány oszlop tartotta a kéthajós boltozatot. Utóbbit II. Ulászló (1490–1516) idején építették. A kerengő boltozata fölött helyezkedtek el a szerzetesek cellái. Mára csak legfeljebb 2,5 m magas falak maradtak meg egyes épületrészeknél a kolostorból, ezért elsősorban a teljes területen feltárt járószintet vizsgáltuk (*6. ábra*).

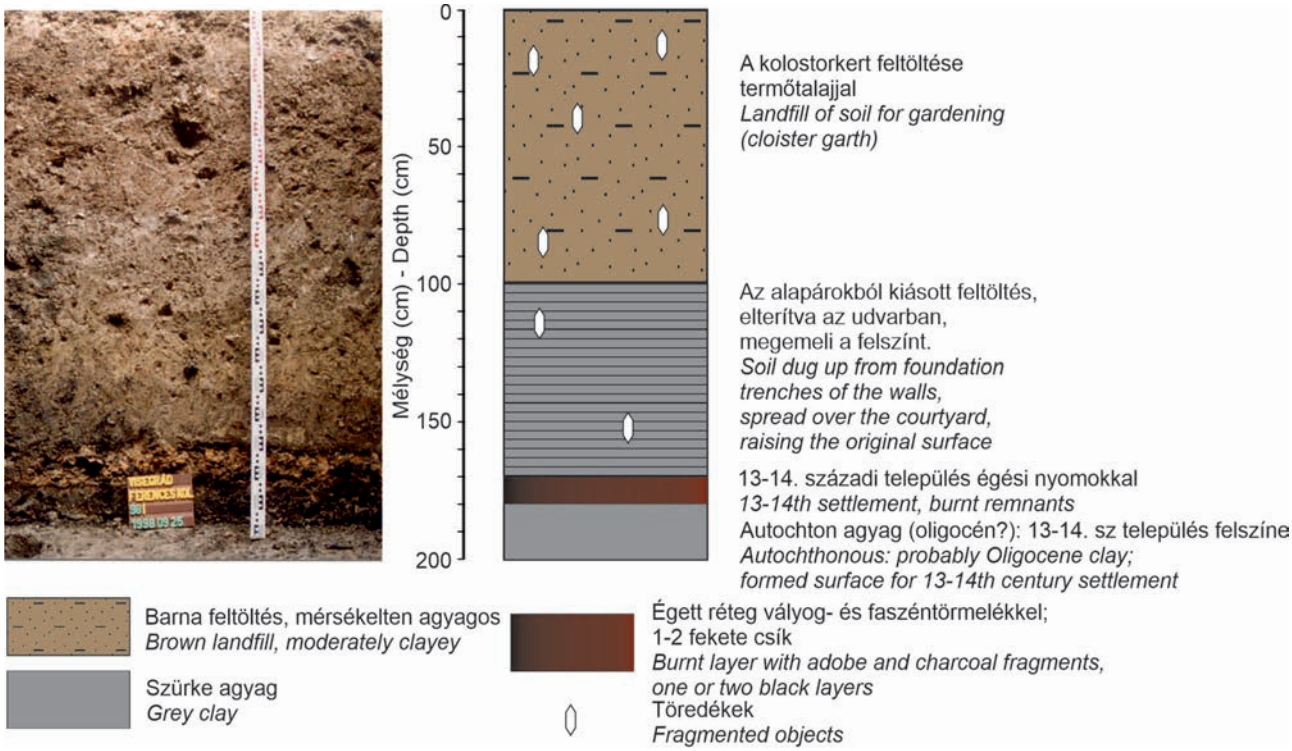
Altalaj

A kolostor közvetlenül a tőle keletre húzódó hegy lejtőjének lábához épült. A legfeljebb 2 m mélységig hatoló egyik régészeti szonda rétegsorában a hajdani Duna-terasz-



6. ábra. A visegrádi ferences kolostor alaprajza (KISS & LASZLOVSZKY 2013 után, módosítva). A déli fal 3 m magas, a többi legfeljebb 1–1,5 m. A négyszögek és a beléjük írt számok a továbbiakban közölt fényképeket jelzik. 8 – a kerengő déli szárnya: padlózata 10–20 cm-t süllyedt, hullámosan. 9–10 – a 80 cm-t elérő süllyedés helyszíne. 11 – a lesüllyedt és megbillent lépcsőfokok. 12 – a falba mélyedő gerendafészkek a lesüllyedt padlószint fölött

Figure 6. *Franciscan friary at Visegrád. Ground-floor plan of the cloister (after KISS & LASZLOVSZKY 2013, modified). The southern wall is 3 m high, other walls are less than 1–1.5 m high. Numbers in rectangles refer to the photo sites below. 8 – floor of the rectangular, covered cloister walk has subsided by about 10–20 cm in average. 9–10 – site of 80 cm subsidence in the NW corner of the cloister walk. 11 – subsided stairs. 12 – beam holes to support a wooden floor*



7. ábra. A kolostor udvarán mélyített szonda rétegsora (lásd még I. táblázat)
Figure 7. *Excavated profile of subsoil at probe in the cloister garth (see also Table I)*

nak sem homok-, sem kavicsos üledékét nem találták meg, hanem 1.8 m mélységig csak feltöltést (7. *ábra, I. táblázat*). A régészeti feltárás eredményeképpen a kolostorépület több részéről is rendelkezünk információval, amelyek a középkori település, majd a 15. században épült kolostor rétegsorait mutatják. Az udvar 5 m mély kútját feltárták: olyan bőséges mennyiségű vizet szolgáltatott, hogy az ásatás folyamán mindvégig szivattyúzni kellett. Azóta is folyamatosan áll benne a víz, amelynek szintje a Duna vízszintváltozásait is követi. A kolostor főfalai autochton agyagon állnak.

A kerengő sérülései

Az udvart körülvevő, négyszög alaprajzú kerengő padlóját habarcsba ágyazott tégla burkolta. Eredetileg vízszintes, sík felszíne ma különféle deformációs bélyegeket hordoz (*8. ábra*). Néhol csak 15 centiméterrel, egyes részei viszont akár 80 centiméterrel is az eredeti járószint (az alapfalak teteje, felmenő falak alsó szintje) alá süllyedtek. Az északnyugati sarokban, kb. 40 m^2-es felületen hatalmas üreg képződött: derekáig ér a benne állónak (*6. ábra*, 8. és 9. lelőhely; *9. ábra*). A részletes topográfiai felmérés alapján készült, háromdimenziós modell azt mutatja, hogy a megsüllyedt, de megőrződött padlószint alól mintegy 14 m^3 anyag hiányzik: ekkora a gödör térfogata (*9, 10. ábra*).

A megsüllyedt terület nyugati oldalán két lépcsőfok vezetett a szomszédos refektórium bejáratához (*5. ábra*, 8. lelőhely; *11. ábra*). A lépcsők és az alattuk lévő padlószint egyaránt megsüllyedt, és oldalra, észak felé dőlt. Ennek következtében a lépcső jobb oldali vége 70 cm-rel van mélyebben, mint eredeti helyzete. A szomszédos, falba mélyedő lyukak valószínűleg gerendafészkek: a süllyedést követő javítás során ideiglenes fapadlót építettek; ezt tartották a gerendák (*6. ábra*, 12. lelőhely; *12. ábra*).

I. táblázat. Régészeti szonda rétegsora a visegrádi ferences kolostor udvarán (1998)
Table I. *Stratigraphy of an archaeological probe in the courtyard of the Franciscan friary (1998)*

Mélység	Megfigyelés	Értelmezés
0,0–1,0 m	Barna feltöltés építési törmelékkel. Mérsékelten agyagos.	Talaj a kolostorudvar művelhetővé tételére.
1,0–1,7 m	Zöld agyag kevés építési törmelékkel. Anyagában megegyezik a legalsó agyaggal.	A falak alapárkából kiásott talaj, elterítve az udvaron. Megemelte az eredeti terepszintet.
1,7–1,8 m	Égett réteg vályog- és faszéndarabokkal, 1–2 fekete réteg.	13–14. századi település égésnyomokkal.
1,8–2,0 m	Zöld, zsíros agyag, lelet nélkül.	Autochton agyag, valószínűleg oligocén. A 13–14. századi település simított felszíne.



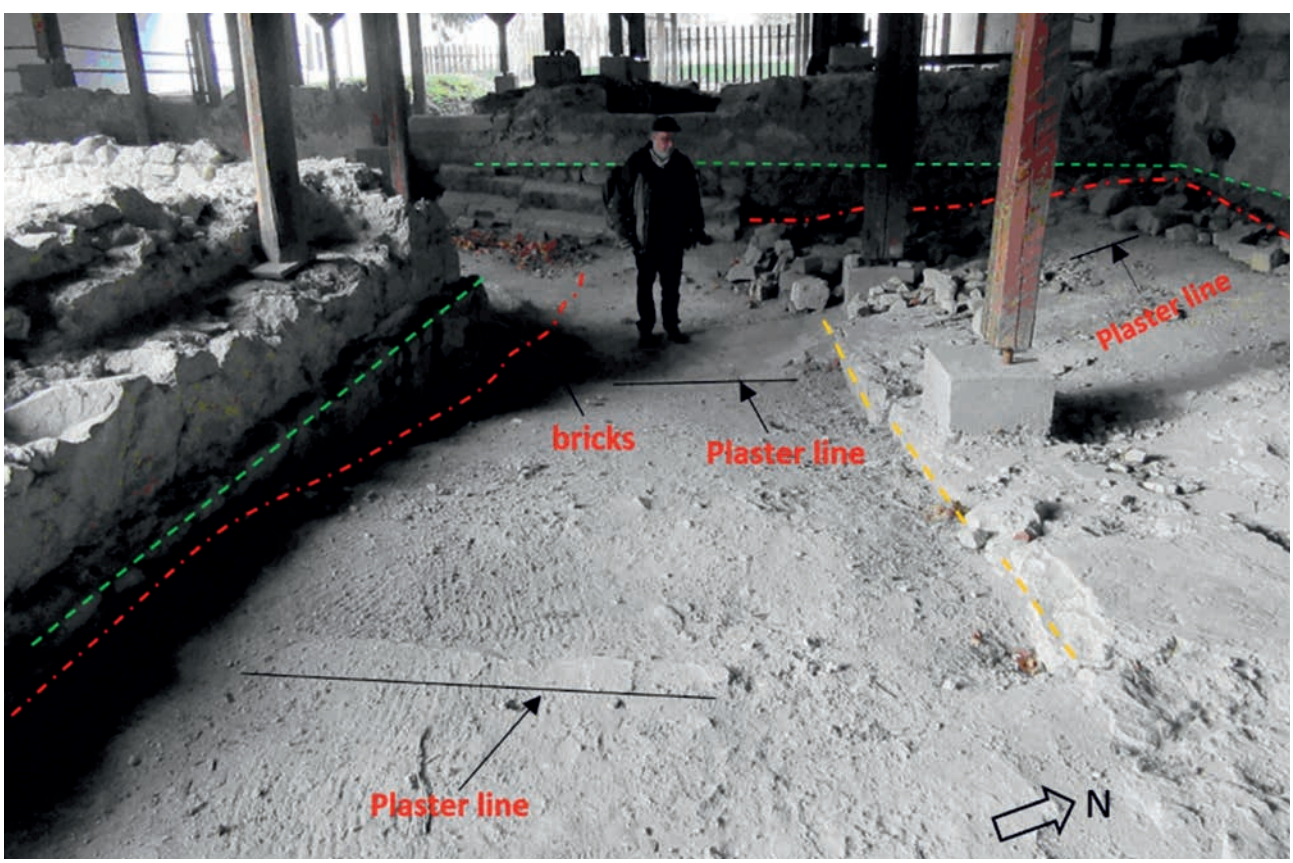
8. ábra. Hullámosan deformálódott és megsüllyedt padló a kerengő déli szárnyában, nyugatról nézve. Az eredeti téglaburkolatot fölszedték; most az ágyazóhabarcs felszíne látható. Ez a *6. ábrán* jelölt 8. sz. helyszín. Az Archeoszeizmológiai Adatbázis (ADB) #6699 sz. fényképe

Figure 8. *Undulating floor in the southern sector of the cloister walk. Originally covered by bricks, now the underlying plastered surface is visible. View to east. Site 8 on* Fig. 6. *Archaeological Database (ADB) photo #6699*

Értelmezés

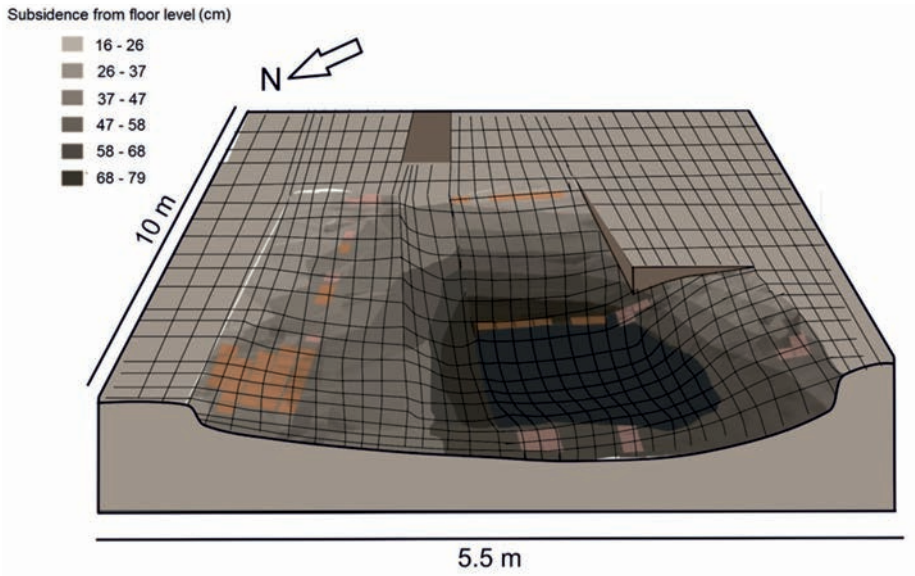
Árvíz vagy földrengés? A károsodás mechanizmusa

Az 1990-es régészeti feltárások során a sérüléseket, a különféle deformációkat és a megmaradt falakban megfigyelhető sérüléseket pontosan rögzítették (Buzás et al. 1995, Halász & Mordovin 2002, Laszlovszky & Romhányi 2003). Ezeket a régészetben bevett módon katonai műveletek, a felhagyást követő természetes pusztulás és az épületek kőbányaként való felhasználása nyomainak tulajdonították. Később Kiss & Laszlovszky (2013a, b) fölvetették, hogy a Duna megnövekedett árvízszintje szerkezeti károsodásokat okozhatott a kolostorban a kora 16. században. Ezekről az árvizekről részletes történeti és kevesebb régészeti dokumentáció maradt fönn. Kiss Andrea (2012, 2019) később újabb tanulmányokban és nagy jelentőségű monográfiájában bizonyította a 16. században megfigyelhető egyre súlyosabb árvizek meglétét. Ugyanakkor tudjuk a dunai árvizekről, hogy ezek többnyire néhány napig, esetleg 1–2 hétig tartanak csak, legalábbis napjainkban. Tönkretehetik az elá-



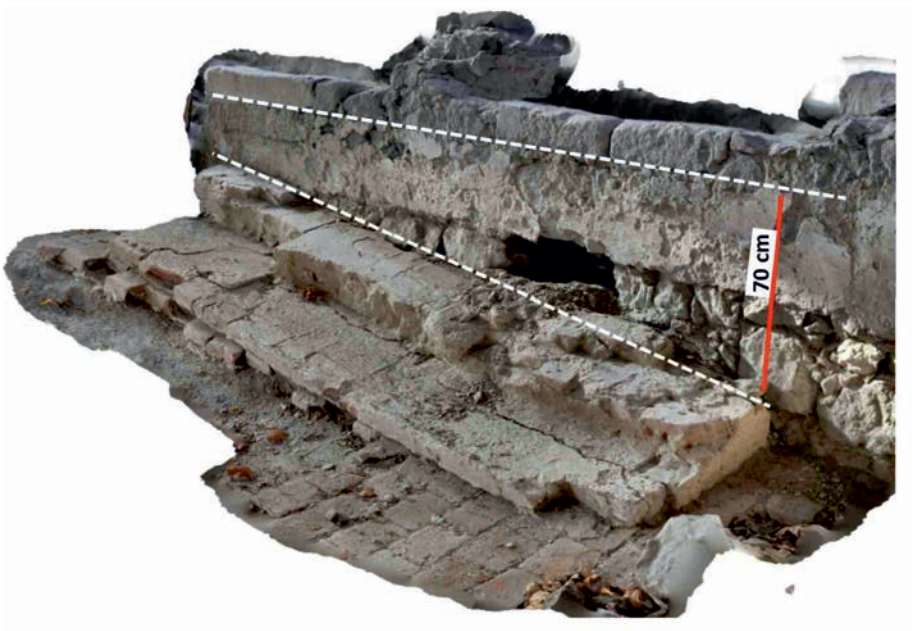
9. ábra. A kerengő megsüllyedt padozata az északnyugati sarokban, kelet felől nézve. Az eredeti padlószintet vízszintes, szaggatott zöld vonal jelöli a baloldali falon. A megsüllyedt padló helyzetét dőlt, szaggatott vörös vonal jelzi. A süllyedés legnagyobb mértéke 80 cm, ahol a régész áll. Néhány habarcsba ágyazott burkolati tégla még látható. A védőtetőt tartó faoszlopok az eredeti boltozatot tartó kőoszlopok helyén állnak. Sárga vonal jelöli a jobb oldali, kéthajójú kerengőszárny középső oszlopsorához tartozó, a padlóval együtt megsüllyedt alapfalat. A megdőlt és megsüllyedt lépcsők (*11. ábra*) láthatók a háttérben. Ez a *6. ábra* 8–9 sz. lelőhelye. ADB #6705. sz. fénykép. Bricks – megőrződött téglaburkolat. Plaster line: a téglaburkolat fektetőhabarcsának felületét jelző vonal

Figure 9. *Subsided floor of the cloister walk in the northwestern corner. Original floor level marked on left with a green, horizontal, dashed line. Subsided floor marked with inclined, red dashed line. Maximum subsidence is 80 cm, where person stands. A few floor bricks, embedded in mortar, are still in place. Wooden columns, supporting protective roof of the excavated area, replace stone columns, which supported a double vault. The latter collapsed during shaking, due to subsidence of its foundation (raised, between aisles). Subsided, tilted stairs visible behind person (see* Fig. 11*). View to west. Sites 8–9 on* Fig. 6. *ADB photo #6705*



10. ábra. A kerengő északnyugati sarkában a padlózat mélyedése háromdimenziós modellen, a nyugati fal felől nézve. A rácsháló jelzi az alakot, a szürke színskála a mélységet. Rózsaszín jelöli a megőrződött téglaburkolatot. Narancsszín: habarcs. A gödör térfogata 14 m^3, ennyi talaj mosódott ki a padlószint alól a földrengés keltette talajfolyósodás során

Figure 10. *3D model of 0.8 m deep depression in NW corner of cloister. View to east. Grid shows the shape, grey tint marks depth. Pink: preserved bricks. Orange: plaster. Total calculated volume of ejected material is ca 14 m^3 in this part of the cloister*



11. ábra. Megsüllyedt és megdőlt lépcsőfokok a kerengő nyugati falánál. A lépcső a refektóriumba vezetett. A lépcső teteje eredetileg a vízszintes, szaggatott vonal magasságában volt; onnét süllyedt 70 cm-t. A háromdimenziós modell a structure-from-motion technikával készült. A *6. ábra* 11. sz. lelőhelye. ADB #6724

Figure 11. *Tilted and subsided stairs 70 cm below thresholds of the doors in the western wall of cloister walk. Top of the stairs was at the upper dashed line before subsidence. 3D model by structure-from-motion photography. View to SW. Site 11 on* Fig. 6. *ADB photo #6724*



12. ábra. Gerendafészkek a ferences kolostor kerengőjének északkeleti sarkában. A megsüllyedt lépcsőfokok fölé vésett lyuk egyértelműen jelzi, hogy a gerendák beillesztésére, a padló készítésére a földrengés után volt szükség. Ez a *6. ábrán* látható 12. sorszámú helyszín. ADB #6707

Figure 12. *Holes for beams: one above the subsided stairs(!), indicating it was carved after subsidence. There is another in the wall in the back. Beams supported a wooden floor, put above the useless stairs. Site 12 on* Fig. 6. *ADB photo #6707*

rasztott épületben a bútorzatot, esetleg a falakat borító vakolatréteget, de nem okoznak szerkezeti károsodást sem a tégla-, sem a kőfalakban. A vályogházak azonban szinte azonnal összedőlnek, amint árvíz éri őket. A ferences kolostor faragott kövekből, gondosan épült, jelentős alapfalakkal rendelkezett. Nem is lehetett volna másképp egy királyi pénzből, a királyi palota tőszomszédságában álló épület esetében. Hasonlóképpen, gyakori árvizek sújtották a folyó mentén lejjebb, a Buda melletti Nyulak-szigetén (mai Margit-sziget) álló, úgyszintén királyi alapítású, domonkos apácakolostort. A 13. századtól kezdve fönnmaradt elbeszélő forrásokból tudjuk, hogy egyes nagy áradások, a 15. század végétől pedig egyre gyakrabban jelentkező és súlyos árvizek megzavarták a kolostor lakóinak mindennapi életét, de épületkárokról nem maradtak fönn feljegyzések (Vadas 2013). Valószínűleg az árvízveszély okozta, hogy több épületmaradványon is megfigyelhető a padlószint újjáépítése, de magasabb szinten, ahogy ez a visegrádi királyi palota és a ferences kolostor ásatásánál is jelentkezett. Az utóbbinál az árvizek egyre fokozódó hatását mutatja, hogy a folyóhoz közeli oldalon egy nagy méretű pincét betömtek a 16. század elején, és helyette a hegy sziklájába faragtak egy új pincét. Mindezekkel együtt a kerengőfolyosó nagymértékű süllyedésére és a refektórium előtti lépcső deformációjára nem adnak egyértelmű magyarázatot a 16. század első felének árvizei.

Talajfolyósodás

Véleményünk szerint a ferences kolostor kerengőjében, a padlózat északkeleti részén található jelentős süllyedés az altalaj folyósodásának következménye. Ez a jelenség akkor alakul ki, amikor lökéshullám következtében a pórusnyomás megnő, és az üledékszemcsék eltávolodnak egymástól. Az altalaj folyadékként viselkedik, és elveszti teherviselő képességét. Az így kialakult egyenlőtlen tömörödés következtében az épület egyes részei eltérő mértékben süllyedtek meg. Ilyen helyzetekben rövid életű, legfeljebb percekig működő szökőkutak és homokvulkánok jöhettek létre a járószinten. Ilyenek hordhatták a ki a padlószint alól hiányzó 14 köbméternyi üledéket (*9, 10. ábra*) (Bray & Dashti 2014, Győri 2006).

A kolostor főfalai tömött, szürke agyagon, a szálkőzeten állnak. A kerengő járószintje alatt viszont laza feltöltés található, mely valószínűleg az alapárkokból került oda. Ezt mutatja, hogy építési törmeléket és régészeti leleteket is tartalmaz (*7. ábra, I. táblázat*). A kerengő északi szárnyát tagoló, egyébként utólag beépített oszlopsor alapozása is ezen a feltöltésen nyugszik. Ez az oka annak, hogy maguk az oszlopok is megsüllyedtek, és keresztirányú repedések vannak az oszlopalapokat összekötő sávalapozásban is. A kerengő valamennyi szárnyában láthatók padlódeformációk, de ezek mértéke sokkal kisebb. Mindez összefügghet azzal is, hogy a hegyhez közelebbi oldalon kisebb feltöltésre volt szükség a kerengő járószintjének kialakításakor. Az eltérés másik oka a kerengő mellett, a refektórium alatt kialakított pince lehetett.

Az északkeleti sarok 0,8 méteres süllyedése, melyet az alóla kimosott 14 m^3 altalaj hiánya okozott, csak talajfolyósodás során jöhetett létre. Ilyenkor a szeizmikus lökéshullámok beérkezése megnöveli a pórusnyomást; a pórusvíz – amerre csak lehet, általában fölfelé – kiszökik, magával sodorva az altalajt. A túlnyomásos közeg áraszthatta el üledékkel a szomszédos refektórium alatti pinceszintet is. A téglapadló repedésein áttörő víz üledékkel boríthatta be a padlót, amelyet a rengés után eltakaríthattak. Az ily módon megsüllyedt padló és az úgyszintén megsüllyedt két lépcső már nem biztosított kapcsolatot a kerengő és a szomszédos refektórium között: ezért fedték le a gerendafészkekbe illesztett gerendákon nyugvó padlóval a megsüllyedt részt (*12. ábra*).

A kolostorépület padlószintjén megfigyelt alakváltozási jelenségek egy másik lehetséges magyarázata a szeizmikus eredetű talajfolyósodás során létrejövő szétcsúszás (*lateral spreading*) és talajcsúszás jelensége. A deformáció ugyanis javarészt az épület Duna felőli szakaszán jött létre, azaz a hegylábi lejtő legalsó részén (*6. ábra*). Erős földlökések okozhattak kisebb, a folyómeder irányába bekövetkező suvadásokat, melyek akár a kolostor alól is magukkal sodorhattak talajt. Ez az eset azért kevéssé valószínű, mert az épület 180 méterre van a mai Duna-parttól. A megőrződött alapfalak épek, nem viselik oldalirányú deformáció nyomát. A tervezett további ásatások tisztázhatják ezt a problémát.

Hasonló padlószinti deformációk ismertek más régészeti lelőhelyekről is (*13. ábra*). Az egyenlőtlen süllyedés okozta gödrösödés (hasonló átmérőjű és mélységű) szép példáit láthatjuk például a tunéziai Monastir római mozaikjain (Bahrouni et al. 2014), a korinthoszi Lechaion katedrálisában (*13.A ábra*) (Apostolopoulos et al. 2015, Minos-Minopoulos et al. 2015), az olaszországi Ferrara városában (Caputo et al. 2016) és a bizánci Gadara városában (ma Umm-Qais, Jordánia) (Fandi 2018).

Melyik földrengés?

Mindezek nyomán olyan rengést keresünk, amely egyaránt felelőssé tehető a Salamon-torony és a ferences kolostor rongálódásáért. Tudatában vagyunk annak, hogy az utóbbi évezred kárpáti-pannon földrengéseinek 90%-ról semmiféle tudomásunk sincsen (Kázmér & Győri 2020); ezért kicsi az esélye annak, hogy megtaláljuk a pusztulásért felelős rengést.

Első kérdés: mikor volt a rengés? Nem ismerünk olyan történeti följegyzést, mely Visegrád földrengés okozta pusztulásáról tudósítana. A ferences kolostor építésének és átépítésének folyamatát a kor meglehetősen viharos történelmének kontextusába helyezve próbáljuk leszűkíteni a vizsgálandó időintervallumot (*II. táblázat*).

A pusztulás

Mikor rongálódott meg az épület? Mindenképpen a ferences konvent 1513-as országos gyűlése után, akkorra ugyanis el kellett készülnie a kolostor Jagelló-kori átépítésének. Ennek az átépítésnek volt az eredménye a kerengőfolyosó új boltozata, és az egyik oldal már említett oszlopsoros, kéthajós kialakítása. Ennek részleges pusztulása még a kolostor végső elhagyása előtt következett be, mivel a beszakadt bol-



13. ábra. Padlószintek deformációja talajfolyósodás és vízkiszökés hatására földrengések sújtotta régiókban. A) A Lechaion-katedrális kövezett padlózata (Korinthosz, Görögország) (APOSTOLOPOULOS et al. 2015). B) Tölcséres süllyedék terrazzo padlózaton. Átmérő kb.3 m (Brigetio, Magyarország). Az 1763-as komáromi földrengés közvetlen közelében lévő lelőhely (DOBOSI & KÁZMÉR 2022). C) Római villa megsüllyedt padlózata (Capo d'Orlando, Szicília, Olaszország) (BOTTARI 2016). D) Megsüllyedt padlózat, közepén megbillent oszlop talapzatával (Akrotiri, Thera, Görögország) (PAPAZOI 2022)

Figure 13. *Deformed floors due to liquefaction of soil and water escape in seismic regions. A) Lechaion basilica, Corinth, Greece (APOSTOLOPOULOS et al. 2015). B) Funnel-shaped depression on the terrazzo floor of a residential house, ca. 3 m diameter (Brigetio, Hungary). Site next to the epicentre of the 1763 Komárom earthquake (DOBOSI & KÁZMÉR 2022). C) Depression in the floor of a Roman villa (Capo d'Orlando, Sicily, Italy) (BOTTARI 2016). D) Depressions on the floor of a paved room, Tilted column plinth in the middle (Akrotiri, Thera, Greece) (PAPAZOI 2022)*

tozatot eltakarították, és a megsüllyedt folyosószakaszon faszerkezettel alakítottak ki új járószintet. Figyelembe véve a kolostorra vonatkozó történeti adatokat, mindez valószínűleg 1535 után következett be, amikor még nyolc barát lakta a kerengő északi szárnya fölötti cellákat. Talán még 1539 után, amikor a kolostori hierachia még teljes volt (ismerjük az apát/gvárdián nevét). 1539-ben Szapolyai János király még tataroztatta a szomszédos palotát, és ott töltötte a nyarat felesége, Izabella királyné társaságában. A Salamon-tornyot 1540-ben megvívó császári katonaság megtalálta és megitta az akkor még működő kolostor szerzeteseinek borát (IVÁN 2004: 69, 75. jegyzet). A *terminus ante quem* pedig a közeli Esztergom 1543-as és Visegrád várának 1544-es, oszmán-törökök általi elfoglalása. Ekkorra a szerzetesek már minden bizonnyal elmenekültek.

Földrengés 1541. augusztus 21-én

A 16. századi Magyarországról szinte alig ismertek történeti földrengési adatok (KÁZMÉR & GYŐRI 2020, 2021). Fennmaradt azonban egy érdekes följegyzés az 1540. október 12-i visegrádi ostrom és az 1544-es török foglalás közötti időszakból (VARGA 2017). Ez BORNEMISZA Péter (1536–1584) lutheránus lelkipásztor felnőttkori följegyzése egy gyermekkorában átélt eseményről. Egyik prédikációjában így fogalmaz:

„Hatod Ielről monda: Es leßnec Főld indulasoc bizonyos helyeken. Ez ackoris meg lett midőn Christus wrunc Lelket ki boczatta, es halottaibol fel tamadot, Es az vtannis. Mi időnkbennis Buda veßedelme előtt az Nap annira el vezte fenyet, hogy deelbe az Czillagokat latnac, es olly föld indulas lett, hogy az polczrol az fazokac le hulnanac, es az tornyokis romlanac, ottis Budan és Pesten az en házamba." (BORNEMISZA 1584, p. DCCVI).

A prédikáció ezen szakasza a Bibliára, a Jelenések könyvére utal, ahol a 11,13. versben ez áll: *„És lőn abban az órában nagy földindulás, és a városnak tizedrésze elesék"*. Buda veszedelme az 1541. augusztus 21-i napot jelenti, amikor

II. táblázat. Események a ferences kolostor életében a földrengés időpontja környékén

Table II. *Events in the history of the Franciscan friary in the 16th century*

Dátum	Esemény	Hivatkozás	Következmény
1513. március 15.	A magyarországi obszerváns ferences rendtartomány gyűlése.	Buzás et al. 1995	Az utolsó nagyobb építés és újjáépítés befejeződik. Az egész kolostor és a kerengő rendben működik.
1535	Nyolc testvér él a rendházban, négyük felszentelt pap.	Buzás et al. 1995	A kolostor rendben működik.
1539	Az apátok nevét eddig az évig ismerjük.	Buzás et al. 1995	A kolostor rendben működik.
1539 nyara	Szapolyai János király megjavíttatja a szomszédos királyi palotát. Felesége, Izabella királyné társaságában itt tölti 1539 nyarát.		A kolostor működik.
1540. október 12.	Velsius osztrák tábornok megostromolja a Salamon-tornyot. A torony déli sarka négynapi ágyúzás után leomlik. A csapatok megisszák a kolostor borát.	Iván 2004:68	Az ostrom során a kolostor falai nem szenvednek sérülést.
1540. október 21.	Velsius parancsot ad a kolostor elrabolt borának megfizetésére.	Iván 2004:69, 75. jegyzet	Valószínűleg a megszokott mederben folyt az élet, ha csak a bor elvesztése volt a szerzetesek fő gondja.
1541. augusztus 21.	**Földrengést és részleges napfogyatkozást észlelnek Pesten, 35 km-re Visegrádtól.**	**Bornemisza (1584): Napfogyatkozás, melyet alátámasztanak Kaposvári (2006) számításai**	**Ez lehet a Visegrádot elpusztító földrengés.**
	Megsüllyed a kerengő téglapadozata, a refektóriumba vezető lépcső és az északi folyosó oszlopsora. Ugyanott leomlik a boltozat.	Kiss & Laszlovszky (2013)	A kolostor kerengője súlyosan megsérül.
	A sérült oszlopok és a leomlott boltozat maradványait eltakarítják a kerengő északi folyosójáról.	Buzás et al. (1995)	Újjáépítési szándék.
	A padlóba mélyülő gödröt gerendákra fektetett fapallókkal egyenlítik ki. A tartók a falakba vésett gerendafészkekbe illeszkednek.	Saját megfigyelés	A kolostort még lakják: újra lehetséges az átjárás az északi folyosóról a refektóriumba. (Olcsó, ideiglenes falak épültek.)
1543	Török támadások a környéken. Esztergom elfoglalása. Visegrád sikertelen ostroma.	Iván 2004:70	A szerzetesek bizonyára elmenekültek a harcok közeledtével. A kolostor megszűnt működni.
1544	A török elfoglalja Visegrádot.	Iván 2004:70	A kolostort végleg felhagyják.
1552	A királyi palota romokban.	Jovius 1552 (*fide* Balogh 1966:226-227); *fide* Pálóczi-Horváth (2014:292)	
1587	Romokban Visegrád városa, a királyi palota, a Salamon-torony, valamennyi templom és a polgárházak.	Leonhard Lubenau (*fide* Sahm, 2012)	
	A kerengő téglapadlózatát fölszedik. A város maradék népessége és/vagy a betelepülő törökök hasznosítják a kolostor maradványait: az udvari kutat, kitermelik az építőköveket.		Megkezdődik az építőanyag újrahasznosítása. A templom is elveszti funkcióját.
	Szórványos temetkezés a kerengőben, ahol a téglaburkolatot már fölszedték. A romos kolostor további, lassú pusztulása.	Buzás et al. (1995)	Az épületkomplexum egyházi jellege megszűnik. Egyes részeit a helyi keresztény közösség még szent helynek tartja, és ide temetkezik.
	A káptalanterem boltozata beomlik. Az ívek bordái szétszórva a téglaburkolatától már megfosztott padlón. A töredékeket helyben hagyják.	Buzás et al. (1995)	Elhagyott épület.
18. század	Folytatódik az építőanyag kitermelése: kő és tégla bekerül a török után újjáépülő Visegrád házaiba. A német telepesek nincsenek tisztában a romok eredetével, falusi házakba építik be az anyagot.	Buzás et al. (1995)	
	A több emelet magas falak megérték a 18. századot. Ekkor Starhemberg gróf, az új tulajdonos, lebontatta jó részüket Visegrád telepes falvának építéséhez.	Buzás et al. (1995)	A kolostornak nem maradt felmenő fala. A templommal határos fal egyes részei megmaradnak, mint kerítés az újonnan kijelölt birtokhatárok között.

a várat védő magyar, az azt kívülről támadó német és a magyarokat „felmentő" oszmán-török sereg végső összecsapása az utóbbiak győzelmével végződött.

A „Nap elvesztette fényét" az ugyanaznap bekövetkezett részleges napfogyakozást jelenti (KAPOSVÁRI 2006). BORNEMISZA megbízható forrásnak tartható még akkor is, ha prédikációja évtizedekkel a kérdéses esemény után jelent meg (PÉTER 1996). A gyermek BORNEMISZA, aki a kérdéses időpontban, hatéves korában Pesten élt, emlékezhetett erre a két, egyazon napra eső, félelemkeltő eseményre; családi elbeszélések is ébren tarthatták ennek a napnak az emlékét. A történeti szeizmológiában azok a följegyzések, amelyekben egy történeti eseményt egy csillagászati eseményhez kapcsolódva rögzítenek, megbízhatónak minősülnek (GUIDOBONI & EBEL 2009). A környezettörténet azon ága, amely katasztrofális természeti eseményeket (földrengéseket, árvizeket, száskajárást stb.) történeti feljegyzések alapján vizsgál, már kidolgozta ezen feljegyzések megbízhatósági értékelésének szempontjait. Ha az elbeszélő a katasztrófákat isteni közbeavatkozás vagy más, természetfölötti hatalom tevékenységének tulajdonítja, ezeket a kevésbé megbízható, problematikus események közé sorolják. A bekövetkezett események kisebb, érdekesebb részleteinek megemlítése viszont növeli a megbízhatóságot. Az esemény után röviddel vagy különleges körülmények között készült feljegyzés szintén fontos bizonyítéknak tekinthető. Egy évtizedekkel később lejegyzett történet viszont már valószínűleg kevésbé megbízható. BORNEMISZA idézett sorai a megbízhatóságát növelő több jellemzővel is bírnak.

Bár a rengés és a napfogyatkozás vallási kontextusban jelenik meg, a példaként felhozott, személyes élményen alapuló esemény egy jól ismert történeti tényhez kapcsolódik. Buda és Pest törökök általi elfoglalása nem csak Magyarország számára volt tragikus esemény. A gyermek BORNEMISZA Pesten nőtt föl. Ugyanabban az évben veszítette el szüleit. Gyermekségének további éveit más családoknál töltötte az ország különböző részein. Ezért teljes joggal feltételezhetjük, hogy a közvetlenül a személyes sorsát befolyásoló események előtt megélt természeti jelenségek (földrengés, napfogyatkozás) élénken bevéződtek emlékezetébe, és megbízhatóan fel tudta idézni őket évtizedekkel később is. A függetlenül elvégzett csillagászati számítások is alátámasztják a napfogyatkozás bekövetkeztét a jelzett napon. A kisebb megfigyelések (leeső edények, megrongálódott templomtornyok) rögzítése is a megbízható történeti följegyzések tulajdonsága. Ezek az események megmaradhattak a szemtanú, akár egy hatéves gyermek emlékezetében is. Ezért úgy gondoljuk, hogy BORNEMISZA idézett sorai megbízható történelmi forrásként szolgálnak egy olyan földrengés bekövetkeztére, amely nem sokkal Buda oszmán-török foglalása előtt történt.

A *Magyar Földrengés Katalógus*nak a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatóriumban őrzött, kiadatlan változata (ZSÍROS 2014) ezt az eseményt VI-os intenzitásúnak értékeli 4,1-es magnitúdót rendelve hozzá. Az észlelő Pesten volt, az epicentrum azonban lehetett távolabb is, akár közelebb Visegrádhoz, ahol értelemszerűen magasabb intenzitással jelentkezett. Remélhetőleg további archeoszeizmológiai kutatások lehetőséget adnak ennek a kérdéskörnek a tisztázására.

Teljes pusztulás?

Vajon mekkora volt a földrengés pusztítása Visegrádon? A legellenállóbb épület, az andezitagglomerátum szálkőzetre épült Salamon-torony 3,5-től 8 méterig terjedő falvastagságával a tetejétől az alapzatáig végighasadt. Ugyan a megelőző várostrom következében leomlott a déli falsarok, de a hasadékok nem akkor keletkeztek, azok helye védve volt az ágyúzástól. A ferences kolostor kerengőboltozatának egy része és valószínűleg egyes falai is leomlottak. A kerengő nagy részén a boltozat megmaradt, mert erre a pusztulásra a régészeti feltárás tanúsága szerint csak az épület elhagyása után került sor. Ezzel szemben az oszlopokon nyugvó, kéthajós boltszakasz biztosan leomlott A kerengő padozata – talajfolyósodás következtében – egyenlőtlenül, de erőteljesen megsüllyedt. Ugyancsak megsüllyedt az oszlopokat összekötő sávalapozás. Az omlás és a folyósodás az épület azon részein volt a legerőteljesebb, ahol vastag volt a feltöltés. Azonban nem csak építészeti megfigyelések és régészeti adatok szólnak a jelentős pusztulás mellett. A Duna volt a korszak legjelentősebb főútvonala. Az erre haladó utazók kiszálltak a hajdani királyvárosnál és megtekintették a palotát, a fellegvárat és magát a volt várost is.

Ungnád Dávidot Miksa, Magyarország királya küldte követségbe a török szultánhoz. 1572-es útján a kíséretében lévő krónikás följegyezte a visegrádi megálló során látottakat: a királyi palota és a szomszédos kolostor lepusztult állapotát (FERUS 2007: 99). Néhány évvel később Ungnád egy másik útján egy másik krónikás Visegrádot romosnak írja le (GERLACH 1674: 9). Majd egy későbbi, 1587-es követjáráson a kíséret egyik tagja, Reinhard Lubenau, königsbergi utazó részletezte az épületek szomorú állapotát:

„... uber der Thona zur rechten Handt leidt eine gahr schone Festung aus einem hohen Berge, zu welcher wir hinuber gefahren, dselbe zu besichtigen; unter dem Berge wahren ein Hauffen // zerstöreter palatia, groser Herren Hauser, Kirchen und Klöster, auch ein koniglich palatium, Lusthaus und Gartten auch grose Mauren und allerlei Gebeude, elche alle zerstöret un sol Keiser Sigismundus dies palatium haben angefangen zu bauen, und von Matha Corvino volendet worden, aber von den Turcken zerstöret." (SAHM 1912: 76).

Magyarul: *„A Duna jobb oldalán egy magas hegyen jó erőd, amit meg is látogattunk. A hegy alatt házak, romlott paloták, nagy és előkelő házak, templomok és kolostorok, valamint egy királyi palota, kerti lakok, kertek, magas falak és más épületek, valamennyien lerombolva. Zsigmond király kezdte építeni ezt a palotát, Corvin Mátyás fejezte be, és a török lerombolta."*

Lubenau valamennyi pusztítást a török seregnek tulajdonította, amint azt útikalauzai elmondták neki. Figyelembe

kell azonban vennünk, sem a német seregnek 1540-ben, sem a töröknek 1543–44-ben nem volt oka arra, hogy a kolostorépületeket és a város egyéb házait támadja, pusztítsa. Céljuk a katonai létesítmények elfoglalása, használhatatlanná tétele vagy megszállása volt: az Alsóvár a Salamon-toronnyal, amely a Duna forgalmát tartotta ellenőrzése alatt, és a hegytetőn a Fellegvár. Véleményünk szerint a városi épületek nagymértékű pusztulását elsősorban ugyanaz a földrengés okozta, amely végigrepesztette a Salamon-tornyot, és lerombolta a ferences kolostor jó részét.

Intenzitás

A ferences kolostorban csak alacsony, legfeljebb 2–2,5 m magas fölmenő falak őrződtek meg. Ezért az Earthquake Archaeology (EAE-13) intenzitási skála (Rodríguez-Pascua et al. 2013) itt nem alkalmazható. Helyette – jobb híján – az Environmental Intensity Scale-t (ESI-2007) használtuk. E szerint „gyakori talajfolyósodási jelenségek, homokvulkánok legfeljebb 3 m átmérővel, süllyedékek több mint 30 cm, de nem több mint 1 m mélységgel" IX-es intenzitást jelölnek. Az északkeleti sarok ~6 m átmérőjű, 80 cm mély süllyedéke beleillik ebbe a kategóriába (Michetti et al. 2007). A Visegrádon észlelt magas intenzitást a tőle 35-km-re lévő Pesten nyugodtan észlelhette Bornemisza gyengébb, VI-os rengésként (Varga 2017). Ezek az intenzitásértékek korrelálnak a korábban használt MSK-64-es skálával (Musson et al. 2010), amelyet a nagymarosi gát tervezésénél használtak (Mistéth 1987, 1994). A gátra az 1970-es években alkalmazott, VI-os mértékadó intenzitás láthatóan erős alulbecslés (ez még az 1763-as komáromi földrengés elemzése alapján készült). A IX-es intenzitást már a MTA Szeizmológiai Obszervatórium munkatársai javasolták (Bizottság 1989), de ezeket a vízépítő mérnökök elvetették. Szerintük a környékbeli középkori épületek állaga nem teszi ezt a magas intenzitást valószínűvé. Ezért most, a rendelkezésre álló adatok, a részletes helyszíni vizsgálatok és a történeti adatok elemzése alapján ismét javasoljuk a IX-es intenzitásérték elfogadását. A tágabb környéken belül épülő bármely kritikus létesítmény tervezésekor ezt a magasabb értéket szükséges figyelembe venni.

Melyik törésvonal?

A Dunán Esztergom és Budapest között végzett sekélyszeizmikus felmérés nagyszámú, a folyómeder alatti oligocén és miocén képződményeket metsző, potenciálisan aktív vetőt, eltolódást és/vagy normálvetőt mutatott ki (Oláh et al. 2014). Számuk meghaladja a felszíni feltárásokban megismerhető vetők számát, melyeket Bence et al. (1991), Korpás & Csillagné Teplánszky (1999) és Fodor et al. (1999) térképei ábrázolnak. Nem tudjuk megerősíteni, de ki sem zárhatjuk, hogy valamelyikük vagy akár többük is elmozdult a történeti időkben. Nem tudunk róla, hogy végeztek volna más szisztematikus vizsgálatot felszínig hatoló törések keresésére. Mivel a történeti térképek nagy pontossággal rögzítik a Duna mederváltozásait (Székely et al. 2009), ezek további vizsgálata a folyódinamikán túlmenően, aktív tektonikai szempontokat is figyelembe véve, ígéretes lenne.

Távolabbi vetőzónák is fölmerülhetnek mint a Visegrádot elpusztító rengés okozói. A Börzsöny hegységtől keletre húzódó Diósjenői-vető mentén (Érsekvadkert és Szente község között) 2013-ban pattant ki M_L 4,1 magnitúdójú, eltolódásos rengés. Az epicentrum Visegrádtól mindössze 28 km-re van (Wéber et al. 2016), lényegesen közelebb, mint a jól ismert, 1956-os dunaharaszti földrengést okozó vető (50 km-re), vagy a Balaton–Tóalmási-vető Dunától keletre levő szakasza, ahol a negyedidőszaki aktivitás nagyon valószínű (Ruszkiczay-Rüdiger et al. 2007, 2009). A környék mérsékelt, bár magyarországi viszonylatban jelentős szeizmikus aktivitásával egyetemben ez a Diósjenői-vető tektonikus aktivitására utal (Koroknai et al. 2020, 2023). A terület aktivitásának hajtóereje a Pannon-medence tektonikus inverzióját kiváltó, dominánsan transzpressziós feszültségmező, mely eltolódások, rátolódások és normálvetőket reaktiváló feltolódásos vetők működését teszi lehetővé (Porkoláb et al. 2023a, 2023b).

Földrengésveszély

Az 1970-es években a Bős–Nagymaros vízerőműrendszer tervezésekor az aktív tektonikai folyamatok szerepét és veszélyességét – legalábbis a magyarországi létesítmények esetében – alábecsülték. Hasonló helyzet állt elő a paksi atomerőmű szeizmikus veszélyeztetettségének felülvizsgálatakor. Az addig szokatlan, a szakmai nyilvánosságban is megjelenő vita (Balla 1999, Tóth & Horváth 1999) kimutatta, hogy a Duna medrének irányváltásai hordozhatnak tektonikai információt. Erre utaló, fontos résztanulmányok jelentek meg a 2000-es évek elején a Duna-kanyarról is. Tematikus csoportokba rendezve a következőket említjük meg: (1) A környező hegyek gyors negyedidőszaki kiemelkedése egyidejűleg a folyómeder bevágódásával járt (Ruszkiczay-Rüdiger et al. 2005, Karátson et al. 2006). (2) A folyómeder lefutásának nagymértékű megváltozása, melyeket archív térképek rögzítettek a 16. századtól kezdődően. Ennek a jelenségnek folyódinamikai vagy tektonikai magyarázata még várat magára (Székely et al. 2009). (3) Növekvő nyugalmi és árvízszintek a középkor végétől (Mészáros & Serlegi 2011; Kiss & Laszlovszky 2013a, b; Kiss 2019). (4) Számos vetőt képezett le a Duna medre alatt Oláh és csapata (2014), melyek akár potenciálisan aktívak is lehetnek.

A műszeres és történeti adatokon alapuló szeizmicitást meglehetősen jól ismertnek tekinti a szakmai közvélekedés (Tóth et al. 2002), új történeti adatok azonban bármikor fölbukkanhatnak. Az archeoszeizmológia, ez a Magyarországon újnak számító tudományág további rengésekről szolgáltathat adatokat. Véleményünk szerint ezért szükséges, hogy a történeti szeizmológiai és archeoszeizmológiai vizsgálat minden kritikus infrastrukturális létesítmény előzetes veszélyeztetettségi tanulmányának integráns része legyen.

Következtetések

Archeoszeizmológiai vizsgálatokat végeztünk Visegrádon a sérült, középkori Salamon-tornyon és a régészetileg feltárt, hajdani ferences kolostoron. A helyszín a közelben tervezett, de meg nem épült nagymarosi duzzasztógát és vízierőmű tőszomszédsága. Ezt VI-os intenzitású rengésre méretezték. Középkori épületeken hasadékokat, épületomlást és talajfolyósodásra utaló süllyedést dokumentáltunk, amelyek egy IX-es intenzitású földrengés folyományaként is létrejöhettek. Véleményünk szerint a közeli Pesten megfigyelt, 1541. augusztus 21-re datált földrengés okozhatta Visegrád pusztulását. Történelmi útleírások szerzői rendszeresen megemlítik, hogy a korábbi királyi város, Visegrád elhagyatott, lerombolt kísértetváros volt 1544-et, a török foglalást követően. A lehetséges földrengésveszély miatt a környező területeken építendő kritikus létesítmények tervezésénél a földrengésveszély vizsgálatához nélkülözhetetlen a történeti és a régészeti adatok figyelembevétele.

Köszönetnyilvánítás

Mohammad AL-TAWALBEH a Stipendium Hungaricum-ösztöndíj jóvoltából végezhette PhD-tanulmányait Budapesten, az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Krzysztof GAIDZIK kutatásait az University of Silesia in Katowice Research Excellence Initiative támogatta. PÁLÓCZI-HORVÁTH András és DZSIDA Orsolya a latin szövegek értelmezésében segítettek. GRYNAEUS András megjegyzései segítették a magyar szöveg megformálását. FODOR László szakszerkesztő valamint LŐVEI Pál és egy további, anonim lektor gondos munkája sok kisebb-nagyobb hibától szabadította meg a kéziratot. Valamennyiüknek ezúton fejezzük ki köszönetünket.

Irodalom

ACITO, M., BOCCIARRELLI, M., CHESI, C. & MILANI, G. 2014: Collapse of the clock tower in Finale Emilia after the May 2012 Emilia Romagna earthquake sequence: Numerical insight. – *Engineering Structures* **72,** 70–91. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.026

APOSTOLOPOULOS, G., MINOS-MINOPOULOS, D. & PAVLOPOULOS, K. 2015: Geophysical investigation for the detection of liquefaction phenomena in an archaeological site, Lechaion, Greece. – *Geophysics* **80,** EN105–EN117. https://doi.org/10.1190/geo2014-0109.1

BAHROUNI, N., BOUAZIZ, S., SOUMAYA, S., BEN AYEF, N., ATTAFI, K., HOULA, Y., EL GHALI, A. & N. REBAI, N. 2014: Neotectonic and seismotectonic investigation of seismically active regions in Tunisia: a multidisciplinary approach. – *Journal of Seismology* **18,** 235–256. https://doi.org/10.1007/s10950-013-9395-y

BAHROUNI, N., MEGHRAOUI, M., HINZEN, K., ARFAOUI, M. & MAHFOUD, F. 2020: The damaging earthquake of 9 October 859 in Kairouan (Tunisia): Evidence from historical and archeoseismological investigations. **–** *Seismological Research Letters* **98,** 1890–1900. https://doi.org/10.1785/0220190258

BALLA Z. 1999: Van-e bizonyíték negyedidőszaki tektonizmusra Paks környékén? („A paksi atomerőmű földrengésbiztonsága" kötet megjelenése kapcsán). – *Földtani Közlöny* **129,** 97–107.

BALOGH J. 1966: *A művészet Mátyás király udvarában*. I-II. – Akadémiai, Budapest, 799 + 509 pp.

BENCE, G., CSÁSZÁR, G., DARIDA-TICHY, M., DUDKO, A., GÁLOS, M., GANGL, G., KERTÉSZ, P., KORPÁS, L. & ZIER, Ch. 1991: Geologische und ingenieurgeologische Beschreibung der Donaustufe Nagymaros. – In: CSÁSZÁR, G. & LOBITZER, H. (szerk.): *Jubileumsschrift 20 Jahre geologische Zusammenarbeit Österreich–Ungarn*, Teil 1, 385–400.

BIZOTTSÁG 1989: A Központi Földtani Hivatal Elnöke által a MT Minisztertanács 1.071/89 (VI. 15.) határozata alapján a bős-nagymarosi vízlépcsőrendszer építésével kapcsolatos földtani-geofizikai kérdések I/1, I/2. témájában összehívott szakértői bizottság tagjainak állásfoglalása. – Központi Földtani Hivatal, Budapest, 1989. július 3-7. Országos Földtani és Geofizikai Adattár. T.18584. Kézirat, 19, részben számozott lap.

BORNEMISZA P. 1584: *Prédikatioc, egesz esztendő altal minden vasárnapra rendeltetett Evangeliomból.* Detrekoe.

BOTTARI, C. 2016: Archaeoseismology in Sicily: past earthquakes and and effects on ancient society. In: D'AMICO, S. (ed.): *Earthquakes and Their Impact on Society*. Springer Natural Hazards, 491–504. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21753-6_20

BOZÓKI, L. 2005: Le tour dite „Salamon" comme residence royale en 14e siècle. Donjon, tours maîtresses, tours fonction et représentation. – In: RIBERA, F. (ed.) *Loci tra le rocce*. Alinea Editrice, Salerno, 401–406.

BOZÓKI L. 2014: A visegrádi Salamon-torony építés és helyreállítás története. – *Archaeologia – Altum Castrum Online,* 1–40.

BRAY, J. D. & DASHTI, S. 2014: Liquefaction-induced buildings movements. – *Bulletin of Earthquake Engineering* **12,** 1129–1156. https://doi.org/10.1007/s10518-014-9619-8

BUZÁS, G., LASZLOVSZKY, J., PAPP, Sz., SZEKÉR, Gy. & SZŐKE, M. 1995: The Franciscan friary of Visegrád. (History, archaeological remains, the results of the 1990–1993 campaign). – In: LASZLOVSZKY, J. (ed.) *Medieval Visegrád, Royal Castle, Palace, Town and Franciscan Friary*. Dissertationes Pannonicae, ser. **III/4,** 26–33, figs: 170–207 on 144–162.

CAPUTO, R., POLI, M. E., MINARELLI, L., RAPTI, D., SBORAS, S., STEFANI, M. & ZANFERRARI, A. 2016: Palaeoseismological evidence for the 1570 Ferrara earthquake, Italy. – *Tectonics* **35,** 423–1445. https://doi.org/10.1002/2016TC004238

CSEREPES L., BARTHA GY. & HAJÓSY A. 1989: A nagymarosi vízlépcső-építkezés területének tektonikai problémái. – *Hitel* 4, 51.

Dobosi, L. & Kázmér, M. 2022: Late Roman earthquake in Brigetio? – In: Biró, Sz. (ed.): *Pannonia Underground*. Proceedings of the international conference held at Szombathely, 25–26 November 2021. Savaria Museum, Szombathely, 179–207.

Fandi, M. 2018: Effects of large historical earthquakes on archeological structures in Jordan. – *Arabian Journal of Geoscience* **11,** 9. https://doi.org/10.1007/s12517-017-3364-7

Ferus, A. 2007: *Die Reise des kaiserlichen Gesandten David Ungnad nach Konstantinopel im Jahre 1572*. – M. Thesis, University of Vienna, 175 pp.

Fodor, L., Csontos, L., Bada, G., Györfi, I. & Benkovics, L. 1999: Tertiary tectonic evolution of the Pannonian basin system and neighbouring orogens: a new synthesis of paleostress data. – In: Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F. & Séranne, M. (eds): The Mediterranean Basin: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. *Geological Society, London, Special Publications* **156**, 295–334. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.15

Forlin, P., Valente, R. & Kázmér, M. 2017: Assessing earthquake effects on archaeological sites using photogrammetry and 3D model analysis. – *Digital Methods in Archaeology and Cultural Heritage* **9**, e00073s. https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00073

Gálos, M., Kertész, P. & Marek, I. 1988: The general spatial system of rocky environment for building purposes. – *Periodica Polytechnica, Civil Engineering* **32**,151–168.

Gerlach, S. 1674: *Tagebuch…. David Ungnad… Gesandschafft.* – Frankfurt am Mayn.

Guidoboni, E. & Ebel, J. E. 2009: *Earthquakes and Tsunamis in the Past. A Guide to Techniques in Historical Seismology*. – Cambridge University Press, Cambridge.

Győri, E. 2006: Site effect determination at liquefiable sites. – *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* **41,** 117–132. https://doi.org/10.1556/AGeod.41.2006.1.9

Halász Á. & Mordovin M. 2002: Adatok a visegrádi ferences kolostor építéstörténetéhez. Aufgaben zur Baugeschichte der Franziskaner-Klosters von Visegrád. – *Communicationes Archaeologicae Hungariae* **2002,** 231–250.

Iván L. 2004: *A visegrádi vár története a kezdetektől 1685-ig*. – Magyar Nemzeti Múzeum Mátyás Király Múzeuma, Visegrád, 259 pp.

Jovius, P. 1552: *Pauli Jovii Novocomensis Episcopi Nucerini Historiarum Sui Temporis*. Tomus Secundus. – Florentiae, 1227 pp.

Kaposvári Z. 2006: *Magyarországról látható napfogyatkozások 1500–1599 között*. – http://saros139.hu/eclipse/HE15.htm (Letöltés: 2023. augusztus 19.)

Karátson, D., Németh, K., Székely, B., Ruszkiczay-Rüdiger, Zs. & Pécskay, Z. 2006: Incision of a river curvature due to exhumed Miocene volcanic landforms: Danube Bend, Hungary. – *International Journal of Earth Sciences* **95,** 929–944. https://doi.org/10.1007/s00531-006-0075-9

Kázmér, M. & Gaidzik, K. 2023: Towards a Database for Archaeoseismology. – 8th International Colloquium on Historical Earthquakes, Palaeo-macroseismology and Seismotectonics, 17–21 September 2023, Lixouri, Greece. – *Bulletin of the Geological Society of Greece, Special Publication* **11**, 119–122.

Kázmér, M. & Győri, E. 2020: Millennial record of earthquakes in the Carpathian-Pannonian region – historical and archeoseismology. – *Hungarian Historical Review* **9,** 284–301. https://doi.org/10.38145/2020.2.284

Kázmér M. & Győri E. 2021: Ezer év földrengéseinek történeti és régészeti dokumentációja Magyarországon. – In: Demeter G., Kern Z., Pinke Zs., F. Romhányi B., Vadas A. & Bíró L. (szerk.): *Környezettörténet 3. Környezeti folyamatok a honfoglalástól napjainkig történeti és természettudományos források tükrében*. Bölcsészettudományi Kutatóközpont, Budapest, 213–225.

Kázmér M., Tawalbeh, M., Buzás G. & Laszlovszky J. 2019: Tizenhatodik századi földrengéskárok Visegrádon és Budán – történeti és archeoszeizmológia. – *Földtani és Geofizikai Vándorgyűlés*, Balatonfüred, 2019. október 3–5. Magyarhoni Földtani Társulat, 50–53.

Kázmér, M., Al-Tawalbeh, M., Győri, E., Laszlovszky, J. & Gaidzik, K. 2021: Destruction of the royal town in Visegrád, Hungary – historical evidence and archeoseismology of the 1541 AD earthquake at the proposed Danube dam site. – *Seismological Research Letters* **95**/2, 3202–3214. https://doi.org/10.1785/0220210058

Kiss A. 2012: Dunai árvizek Magyarországon a középkori írott források tükrében: 1000–1500, Esettanulmányok, forráskritika és elemzési problémák. – In: Kiss A., Piti F. & Szabados G. (szerk.): *Középkortörténeti tanulmányok* **7**, 339–355. Középkorász Műhely, Szeged.

Kiss, A. 2019: *Floods and Long-Term Water Level Changes in Medieval Hungary.* – Springer Nature, Cham, xix + 896 pp.

Kiss A. & Laszlovszky J. 2013a: Árvízhullámok a Dunán? A Duna árvizei és a visegrádi ferences kolostor a késő középkorban és a kora újkorban. – *Korall* **53**, 36–65.

Kiss, A. & Laszlovszky, J. 2013b: (14th–)16th-century Danube Floods and Long-Term Water-Level Changes in Archaeological and Sedimentary in the West and Central Carpathian Basin. An Overview with Documentary Comparison. – *Journal of Environmental Geography* **6/3–4**, 1–11. https://doi.org/10.2478/jengeo-2013-0001

Koroknai, B., Wórum, G., Tóth, T., Koroknai, Zs., Fekete-Németh, V. & Kovács, G. 2020: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. – *Earth-Science Reviews* **211**, 103411. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103411

Koroknai B., Kovács G., Wórum G., Békési E., Győri E., Czecze B., Wéber Z., Porkoláb K., Bozsó I., Szárnya Cs., Szűcs E., Németh V., Balázs L., Bondár I., Szabó G. & Tóth T. 2023: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 335–352. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335

Korpás L. & Csillagné Teplánszky E. 1999: *A Börzsöny-Visegrádi-hegység 1:50.000 földtani térképe*. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

Kozák, J. & Čermák, V. 2010: The Illustrated History of Natural Disasters. – Springer, Dordrecht, 203 pp. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3325-3

Laszlovszky, J. 2009: Crown, Gown and Town: Zones of Royal, Ecclesiastical and Civic Interaction in Medieval Buda and Visegrád. –

In: KEENE, D., NAGY, B. & SZENDE, K. (eds): *Segregation – Integration – Assimilation. Religious and Ethnic Groups in the Medieval Towns of Central and Eastern Europe*. Farnham, 179–203.

LASZLOVSZKY J. 2021: Visegrád várai és a tatárjárás után kiépített dunai védvonal. – In: BUZÁS G. (szerk.): *„Visegrád, Visegrád! Hol hajdani fényed?" Tanulmányok Szőke Mátyás 80. születésnapjára.* Mátyás Király Múzeum, Visegrád, 25–49.

LASZLOVSZKY, J. & ROMHÁNYI, B. 2003: Cathedrals, monasteries and churches: the archaeology of ecclesiastic monuments. – In VISY, Zs. (ed.): *Hungarian Archaeology at the Turn of the Millennium.* Teleki László Foundation, Budapest, 372–377.

LŐVEI P. 2014: „Konzerválni és nem restaurálni" – a műemlékvédelem elvei, régebbi és újabb törekvései. – *Műemlékvédelem* **58**, 41–50.

MÉSZÁROS, O. & SERLEGI, G. 2011: The impact of environmental change on Medieval settlement structure in Transdanubia. – *Acta Archaeologica* **62,** 199–219. https://doi.org/10.1556/AArch.62.2011.1.9

MICHETTI, A. M., ESPOSITO, E., GUERRIERI, L., PORFIDO, S., SERVA, L., TATEVOSSIAN, R., VITTORI, E., AUDEMARD, F., AZUMA, T., CLAGUE, J., COMECI, V., GÜRPINAR, A., MCCALPIN, J., MOHAMMADIOUN, B., MÖRNER, N. A., OTA, Y. & ROGOZHIN, A. 2007: Environmental Seismic Intensity Scale 2007 – ESI 2007. – *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* **LXXIV**. Servizio Geologico d'Italia, Roma, 7–54.

MINOS-MINOPOULOS, D., PAVLOPOULOS, K., APOSTOLOPOULOS, G., LEKKAS, E. & DOMINEY-HOWES, E. 2015: Liquefaction features at an archaeological site: Investigations of past earthquake events at the Early Christian Basilica, ancient Lechaion harbour, Corinth, Greece. – *Tectonophysics* **658**, 74–90. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.010

MISTÉTH E. 1987: A dunai vízlépcsőrendszer földrengéssel szembeni állékonysága. – *Vízügyi Közlemények* **69,** 184–205.

MISTÉTH E. 1994: Vízépítési műtárgyak szeizmikus állékonysága. – *Hidrológiai Közlöny* **74,** 9–14.

MORENA, S. 2015: *The virtual reconstruction of the minaret of Mansourah mosque (Algeria)*. – 2015 Digital Heritage, 28 September 2015–02 October 2015. https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7413852

MUSSON, R. M. W. 2007: British earthquakes. – *Proceedings of the Geologists' Association* **118,** 305–337. https://doi.org/10.1016/S0016-7878(07)80001-0

MUSSON, R. M. W., GRÜNTHAL, G. & STUCCHI, M. 2010: The comparison of macroseismic intensity scales. – *Journal of Seismology* **14,** 413–428. https://doi.org/10.1007/s10950-009-9172-0

OLÁH P., FODOR L., TÓTH T., DEÁK A., DRIJKONINGEN, G. & HORVÁTH F. 2014: A Szentendrei-sziget környéki folyóvízi szeizmikus szelvényezések földtani eredményei. – *Földtani Közlöny* **144**, 359–380.

PAPAZOI, E. 2022: Waiting for the Catastrophe… The Interaction between Humans and Nature in Akrotiri of Thera. – In: COMPATANGELO-SOUSSIGNA, R., DIOSONO, F. & LE BLAY, F. (eds): *Living with Seismic Phenomena in the Mediterranean and Beyond between Antiquity and the Middle Ages.* Proceedings of Cascia (25–26 October, 2019) and Le Mans (2–3 June, 2021) Conferences. Archaeopress, Summertown, 93–98.

PÉCSI M. 1959: *A magyarországi Duna-völgy kialakulása és felszínalaktana*. – Akadémiai Kiadó, Budapest, 346 pp.

PÉTER, K. 1996: Bornemisza, Péter. – In: *The Oxford Encyclopedia of the Reformation*, 4 vols. New York and Oxford, Oxford University Press, **1,** 201–202.

PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023a: Active tectonics of the Circum Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **58**, 149–173. https://doi.org/10.1007/s40328-023-00409-8

PORKOLÁB K., BÉKÉSI E., BROERSE, T., KENYERES A. & WÉBER Z. 2023b: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 299–308. https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.299

PRECIADO, A., SANTOS, J. C., SILVA, C., RAMÍREZ-GAYTÁN, A. & FALCON, J. M. 2020: Seismic damage and retrofitting identification in unreinforced masonry churches and bell towers by the september 19, 2017 (Mw = 7.1) Puebla-Morelos earthquake. – *Engineering Failure Analysis* **118**, 104924. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104924

RÉTHLY A. 1952: *A Kárpátmedencék földrengései: 455–1918*. – Akadémiai Kiadó, Budapest.

REYNOLDS, D. A. J. 2020: Let the river flow: Fighting a dam in communist Hungary. – *Hungarian Cultural Studies* **13**, 20 p. http://doi.org/10.5195/ahea.2020.391 (Letöltés: 2023. augusztus 19.)

RODRÍGUEZ-PASCUA, M., SILVA, P. G., PÉREZ-LÓPEZ, R., GINER-ROBLES, J.-L., MARTÍN-GONZÁLEZ, F. & PERUCHA, M. A. 2013: Preliminary intensity correlation between macroseismic scales (ESI07 and EMS98) and Earthquake Archaeological Effects (EAEs). – In: GRÜTZNER, C, RUDERSDORF, A., PÉREZ-LÓPEZ, R. & REICHERTER, K. (eds): *Seismic Hazard, Critical facilities and Slow Active Faults.* PATA Days. Proceedings of the 4th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology (PATA), 9–14 October 2013, Aachen, Germany, 221–224.

RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., FODOR, L., BADA, G., LEÉL-ŐSSY, SZ., HORVÁTH, E. & DUNAI, T. J. 2005: Quantification of Quaternary vertical movements in the central Pannonian Basin: A review of chronologic data along the Danube River, Hungary. – *Tectonophysics* **410,** 157–172. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.048

RUSZKICZAY-RÜDIGER, ZS., FODOR, L. I. & HORVÁTH, E. 2007: Neotectonics and Quaternary landscape evolution of the Gödöllő Hills, Central Pannonian Basin, Hungary. – *Global and Planetary Change* **58**/1–4, 181–196. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.010

RUSZKICZAY, ZS., FODOR, L. I., HORVÁTH, E., TELBISZ, T. 2009: Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: a DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. – *Geomorphology* **104**, 203–217. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014

SAHM, W. 1912: *Beschreibung der Reisen der Reinhold Lubenau. 1. Teil*. – Mitteilungen aus der Stadtbibliothek zu Königsberg i. Pr. IV. Beyers, Königsberg i. Pr.

SAITA, J., BAUTISTA, M. L. P. & NAKAMURA, Y. 2004: On relationship between the estimates strong motion characteristics of surface layer

and the earthquake damage – case study at Intramuros, Metro Manila. – *13th World Conference on Earthquake Engineering,* Vancouver, B.C., Canada, August 1–6, 2004, Paper No. **905**, 7 p.
https://www.sdr.co.jp/eng_page/papers/13wcee_micro_in_manila.pdf

Székely B., Molnár G. & Timár G. 2009: Lázár deák és a folyódinamika – térképezési hibák vagy valós mederváltozás? – In: Kázmér M. (szerk.) *Környezettörténet. Az elmúlt 500 év környezeti eseményei történeti és természettudományi források tükrében.* Hantken Kiadó, Budapest, 71–94.

Tóth, L., Mónus, P., Zsíros, T. & Kiszely, M. 2002: Seismicity in the Pannonian Region – earthquake data. – *Stephan Mueller Special Publication Series* **3,** 9–28.

Tóth T. & Horváth F. 1999: Van bizonyíték a negyedidőszaki tektonizmusra Paks környékén! – *Földtani Közlöny* **129,** 109–124.

Török Á. 2008: Építészeti kőanyagok előfordulása és felhasználása a mai Magyarország területén a XVIII. századig. – *Miskolci Egyetem Közleményei A., Bányászat* **74,** 137–155.

Vadas, A. 2013: Long-term perspectives on Danube floods. The Dominican nunnery on Margaret Island (Budapest) and the Danube river. – *Interdisciplinaria Archaeologica. Natural Sciences in Archaeology* **4,** 3–22.

Varga P. 2017: Régi hazai földrengések, különös tekintettel Budapestre. – *Magyar Geofizika* **58**, 76–87.

Wéber, Z. 2016. Probabilistic waveform inversion for 22 earthquake moment tensors in Hungary: new constraints on the tectonic stress pattern inside the Pannonian basin. — *Geophysical Journal International* **204**, 236–249. https://doi.org/10.1093/gji/ggv446

Zsíros T. 2000: *A Kárpát-medence szeizmicitása és földrengés veszélyessége. Magyar földrengés katalógus (456–1995).* – MTA Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Szeizmológiai Obszervatórium, Budapest, 455 pp.

Zsíros T. 2014: *Földrengések a Kárpát-medence térségében. Magyar földrengés katalógus (456–1995).* – Kiadatlan katalógus, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium, Budapest.

Zsuffa I., Szöllősi-Nagy A. & Bogárdi J. 2023: Insula Insolita – Szigetköz és Bős–Nagymaros párhuzamos története. – *Hidrológiai Közlöny* **103/**2, 423. https://doi.org/10.59258/hk.11537

Kézirat beérkezett: 2023. 09. 06.

In memoriam

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society

153/4, 375–376., Budapest, 2023

DR. PARÁK TIBOR
1928–2023



Parák Tibor Esztergomban született. Felsőfokú tanulmányait, mely későbbi hírnevét is megalapozta, az Eötvös Loránd Tudományegyetem geológus szakán végezte, 1954-ben szerzett diplomát. Geológuspályáját a Nógrádi Szénbányáknál kezdte. Az 1956-os forradalom eseményei éppen Romániában érték, és mivel korábban volt már összeütközése az államvédelmi szervekkel, nem tért vissza Magyarországra. Jugoszlávián át Ausztriába távozott, ahol a menekülteket elosztó intézmény a semleges Svédországot jelölte meg úti célként. Nyelvtudás, pénz, kapcsolatok és a képzettségét igazoló iratok nélkül érkezett a svédországi menekülttáborba. Onnan a göteborgi Technikai Főiskola Geológiai Osztályára került, ahol kis idő múlva Beskow professzor tanársegédként alkalmazta. 1958-ban a Kiruna-bányavidék Malmberget nevű vasércbányájánál geológusi állást kapott, majd a Svéd Földtani Intézet megbízásából végzett kutatásokat a régió Leveänieni nevű bányahelyén. Az érctest térképezését, valamint a kutatófúrások anyagának ásvány-kőzettani és geokémiai feldolgozását végezte. Eredményeit egy dolgozatban foglalta össze, mellyel a Stockholmi Egyetemen elnyerte a Filosofia licentiat (egyetemi doktor) fokozatot. Vizsgálatai során olyan földtani jelenségeket figyelt meg, melyeket össze egyeztethetetlennek tartott a Kiruna-típusú ércek keletkezéselméletével. Kutatásai alapján 1965-ben állásajánlatot kapott a világ egyik legnagyobb vasércbánya-vállalatától, az LKAB-tól (Luossavaara–Kiirunavaara Aktie Bolag), amit elfogadott. Itt 1969-ben a geológiai részleg vezetőjének nevezték ki. Ekkori geokémiai vizsgálatai nyomán egyre jobban érlelődött benne az a gondolat, hogy az érctelepek nem a szakmában általánosan elfogadott intruzív magmás keletkezésűek.

Új munkahelyén teljesedett ki szakmai életműve. Munkájához a szakirodalom összegyűjtése és áttanulmányozása mellett hozzátartozott a felszíni és felszín alatti földtani térképezés, az ércvagyonszámítás, a kutatófúrások kitűzése és ezek anyagának sokoldalú feldolgozása, az érctestek rekonstrukciója, a geokémiai elemzés, valamint a kőzetmechanikai vizsgálat is. Terepmunkát végzett gyalog, autón, csónakon és helikopteren. Kutatta a kirunai ércek genetikáját, keresett és talált (mégpedig jelentős mennyiségben) ritka földfémeket, foglalkozott az uránércekkel, feltárt két kisebb wolfrám- és egy jelentős rézérclelőhelyet, és jelentős időt fordított aranyércek kutatására. Mindezekről neves folyóiratokban számos dolgozata jelent meg. A nemzetközi elismerést a Kiruna-típusú vasércek genetikájára vonatkozó új elméletével szerezte meg. Per Geijer professzor évek alatt dogmává merevedett intuzív-vulkáni elméletével szemben kimutatta a kirunai vasércekről, hogy azok vulkáni környezetben létrejövő exhalatív-üledékes telepek. Vagyis kiderítette, hogy a Kiruna-típusú vasérc nem Kiruna típusú! Álláspontját a Stockholmi Egyetemen 1973-ban lezajlott doktori (Filosofia doktorat) szigorlat vitáján fejtette ki és védte meg. A három nemzetközi hírű opponenst (C. Offtedal, S. Landgren, V. Epstein professzorok) négy és félórás vitában győzte meg tézisei helyességéről. A vita során az akkor már 80 éves Per Geijer professzor is elfogadta alternatívaként Parák állításait. Sikeres védése nyomán professzori rangot nyert, és országos, majd nemzetközi szaktekintéllyé emelkedett. Megbecsült kutató lett szép fizetéssel. Tudományos szempontból, anyagi értelemben és családilag is révbe ér. Tudományos eredményei eljutottak a világ minden részébe, és disszertációja a vezető amerikai, japán és orosz geokémikusok érdeklődését is kiváltotta. Egymást érték az egyetemekre, kutatóintézetekbe és konferenciákra szóló meghívások, szakértői felkérések. Ezek nyomán fordult meg az USA-ban, Guineában, Ausztráliában, Új-Zélandon, Algériában, Brazíliában, Peruban, Kínában, Japánban, Egyiptomban és a Spitzbergákon. Egyedüli európai meghívottja volt az amerikai Citizen Ambassador Programnak, melynek keretében vezető előadója volt a tudományos ülésnek (1988).

A bánya termelési eredményei és a nemzetközi elismertség következtében főgeológus lett, majd amikor a konszern vezetése Parák szorgalmazására egy külön kutatási leányvállalatot (Prospekting AB) alapított, annak igazgatójává nevezték ki. Az 1970-es évek második felében a vaskohászat dekonjunktúrája a svéd acéltermelést is érintette. A takarékossági intézkedésekkel és a leépítésekkel Parák nem értett egyet, majd a vezetéssel történő konfliktusok miatt egy időre megvált a vál-

lalattól. A gazdasági helyzet javulása után visszahívták igazgatói állásába. Ezt követően elsősorban az általa „háromlépcsős" kutatásnak nevezett program (1. a Kiruna típusú oxidos ércek feldolgozása, 2. az oxidos és szulfidos ércek együttes előfordulásának vizsgálata, 3. az oxidos és szulfidos ércprovinciák összefüggéseinek vizsgálata) utolsó lépcsőjének kidolgozására fordította munkaideje nagyobb részét.

Parák Tibor nemcsak kutató, hanem szakmai-közéleti ember is volt. Gazdasági és szakszervezeti vitákban is részt vett, közéleti szereplése az országos sajtóban is nyilvánosságot kapott. Mindenkor kiállt helyesnek vélt elgondolásáért. „A lelkiismeret nem lehet kompromisszumok tárgya" – olvashatjuk egy írásában, és korrekt jellemre utal a következő mondat is, melyet személyzeti főnöke írt róla egy minősítésben: „Az összes vezető beosztású ember között, akikkel életemben dolgoztam, ő áll a munkaerkölcs szempontjából a legmagasabban."

Parák Tibor gondolataiban és emberi kapcsolataiban bármerre járt, és bármilyen nyelven beszélt, ott volt az édesanya, a család, az otthon és a haza. Az utóbbira szép példa, hogy 1958-ban a Magyar Természettudományi Múzeumnak 47 db Malmbergetből származó ásvány- és ércmintát ajándékozott. Ezek között olyan jelentős példányt is akadt, mely a múzeum 220 éves jubileumi kiállításán is bemutatásra került (Papp Gábor szíves közlése).

Nyugdíjba vonulása után egyre többet járt Magyarországra. Részt vett a hazai szakmai életben, különösen a HUNGEO (Magyar Földtudományi Szakemberek Találkozója) munkájában. Ennek első, 1996-ban rendezett találkozóján előadta a korábbi felfedezését, mely szerint a Kiruna típusú ércek nem Kiruna típusúak (lásd *Földtani Közlöny*: 1997, 127/3–4, 431–481). 1999-ben végleg hazatelepült. Idejét főként arra fordította, hogy összefoglalja gazdag életútjának eseményeit. Nagy ívű, szakmai eredményekben gazdag életútját *A vasember* című, naplószerű könyvében, valamint a „Földtudományok, bányászat, fenntartható fejlődés" tudománytörténeti sorozatban *Életutam* címmel írta meg.

Parák Tibor kitűnő felkészültségű, jól konvertálható tudással rendelkező, kiemelkedő képességű, inventiózus, ernyedetlen szorgalmú és vasakaratú geológus volt. Nyilván emiatt nevezte találóan Vasembernek a *Természet Világa* szerkesztője is, amikor interjút készített vele

Élete, olthatatlan tudásvágya, mindig többre törekvése és munkássága legyen példa előttünk!

Isten veled, Tibor!

KECSKEMÉTI Tibor

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny
Hungarian Geological Society
153/4, 377–380., Budapest, 2023

Hírek, ismertetések

Összeállította: PIROS Olga

Események, rendezvények

Tisztelgés SZABÓ Csaba munkássága előtt a Goldschmidt Konferencián

Az első geokémiai tárgyú Goldschmidt Konferenciát az USA Maryland államában található Baltimore városában rendezték 1988-ban. Az eleinte kétévente ismétlődő eseményen kezdetben még kevés szakember vett részt. A Konferencia 1994-től már évente kerül megrendezésre, és a résztvevők száma több ezer főre nőtt. A kőzetek geokémiai vonatkozásait vizsgáló szekciók kezdeti dominanciáját mára a témakörök sokszínűsége váltotta fel, lefedve a környezeti geokémia, biogeokémia, szerves geokémia és kozmokémia tudományágait is. A Goldschmidt Konferencia többek szerint a geokémia szakterületének legkiemelkedőbb rendezvénye.

2023. július 9–14. között a European Association of Geochemistry (EAG) és a Geochemical Society (GS) a franciaországi Lyonban immár a 33. Goldschmidt Konferenciát hozta tető alá, melyen 76 ország majd' 4500 kutatója vett részt. Hazánkat több egyetem és kutatóintézet hallgatói és munkatársai képviselték, néhányan közülük kiemelt előadó, meghívott előadó vagy szekcióvezető szerepet töltöttek be.

A konferencia 14 témakört és azokon belül 109 szekciót foglalt magába. Az utóbbiak közül csupán négy tisztelgett kiemelkedő tudományos életpályák előtt. Az egyik ilyen szekciót az évtizedek óta az Eötvös Loránd Tudományegyetemen oktató és kutató – jelenleg a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet munkatársaként tevékenykedő – SZABÓ Csaba elismerése hívta létre. A 17 előadást és 15 poszterprezentációt felvonultató szekció az alábbi nevet viselte: Geochemical and geodynamical processes of the lithosphere based on fluid, silicate, carbonatite, and sulfide melt inclusions of the upper mantle and crust (session in honor of Dr. Csaba SZABÓ). E különleges szekció kiemelt előadójaként Robert J. BODNAR (Virginia Tech, USA) – a fluidum- és olvadékzárványok elismert szakértője, az Amerikai Tudományos Akadémia tagja, egyben SZABÓ Csaba egykori amerikai mentora – fő tudományos eredményei, sikerei és együttműködései alapján méltatta SZABÓ Csaba példaértékű szakmai és pedagógiai kiválóságát, melyet az általa nagy számban kinevelt, hazánkban és külföldön dolgozó kutatók több generációja is fémjelez. Meghívott előadók voltak továbbá BALI Enikő (University of Iceland, Izland), Costanza BONADIMAN (Università degli Studi di Ferrara, Olaszország) és Gregory M. YAXLEY (Australian National University, Ausztrália) is. Ők rendre az izlandi Reykjanes-félsziget vulkanizmusáról, a felsőköpenyben előforduló víztartalmú ásványok (amfibol, flogopit) jelentőségéről és a karbonát olvadékok petrogeneziséről értekeztek. Ezek mind olyan témák, amelyek jobb megismeréséhez SZABÓ Csaba és a hallgatói jelentősen hozzájárultak.

A rangos Goldschmidt Konferencián megvalósult szekció óriási elismerés a nemzetközi szakmai közösség részéről a Litoszféra Fluidum Kutató Labor (LRG) alapító SZABÓ Csabának és rajta keresztül a teljes magyar földtudománynak.



SZABÓ Csaba (középen) a tiszteletére szervezett ünnepi vacsorán. A kép bal oldalán a szekció egyik ötletgazdája és levezető elnöke, Bernardo CESARE (Università di Padova, Olaszország), jobb oldalon az egyik előadója, SPRÁNITZ Tamás látható

Csaba SZABÓ (in the middle) at the gala dinner dedicated to him. Bernardo CESARE (University of Padova, Italy), one of people who proposed the session, was sits on the left. Tamás SPRÁNITZ, who had a talk in the session sits on the right

A session to recognize and acknowledge Csaba SZABÓ's scientific contributions at the Goldschmidt Conference

The first Goldschmidt Conference covering the field of geochemistry was held in Baltimore, Maryland in 1988. In these early times, the conference was organized biennially. Later the conference was held annually starting from 1994. During that time, the number of participants has increased significantly, with several thousand researchers from around the world attending each conference. The initial dominance of hard-rock geochemistry topics has evolved over the years to now include a very diverse set of themes including environmental geochemistry, biogeochemistry, organic geochemistry and cosmochemistry. The V. M. Goldschmidt Conference is now considered by many to be the preeminent international geochemistry conference.

Between 9–14 July 2023 the 33th Goldschmidt Conference, organised by the European Association of Geochemistry (EAG) and the Geochemical Society (GS), was held in Lyon, France. The conference had more than 4500 attendees from 76 countries. Hungary was represented by several students and researchers of various universities and research institutes and included several researchers who served as keynote/ invited speaker or session conveners.

The Goldschmidt Conference in 2023 included 14 themes and 109 sessions. Among these sessions only four were dedicated to outstanding researchers. One of them was the session honouring the scientific work of Prof. Csaba SZABÓ, who has been teaching and researching for decades at Eötvös Loránd University, and is currently a senior research associate at the Institute of Earth and Space Physics. The session entitled 'Geochemical and geodynami-



Magyar csoportkép a szekció végén. A fotón szereplő személyek balról jobbra: Pálos Zsófia, Gelencsér Orsolya, Patkó Levente, Aradi László, Liptai Nóra, Szabó Csaba, Tserendorj, Davaakhuu, Zajacz Zoltán, Myovela, Justine, Abudayeh, Ahmad, Szemerédi Máté, Guzmics Tibor, Lange, Thomas, Berkesi Márta, Kővágó Ákos, Taracsák Zoltán, Győre Domokos, a háttérben: Kovács István

Hungarian group photo at the end of the session. People from left to right are: Zsófia Pálos, Orsolya Gelencsér, Levente Patkó, László Aradi, Nóra Liptai, Csaba Szabó, Davaakhuu Tserendorj, Zoltán Zajacz, Justine Myovela, Ahmad Abudayeh, Máté Szemerédi, Tibor Guzmics, Thomas Lange, Márta Berkesi, Ákos Kővágó, Zoltán Taracsák, Domokos Győre, in the background: István Kovács

cal processes of the lithosphere based on fluid, silicate, carbonatite, and sulfide melt inclusions of the upper mantle and crust (session in honor of Dr. Csaba Szabó)' had 17 oral and 15 poster presentations. A keynote talk was given by Robert J. Bodnar (Virginia Tech, USA), a renowned expert in fluid and melt inclusions and member of the U.S. National Academy of Sciences who was Csaba's former mentor. In his talk, he praised Csaba's career in the light of his most significant scientific results and successful collaborations, which is proven by his many generations of students currently working all over the world. Invited speakers in the session were Enikő Bali (University of Iceland), Costanza Bonadiman (University of Ferrara, Italy), and Gregory M. Yaxley (Australian National University, Australia). They presented talks on the volcanism of Reykjanes Peninsula (Iceland), the significance of hydrous minerals (amphibole, phlogopite) occurring in the upper mantle, and the petrogenesis of carbonate melts, respectively – these are all areas in which Csaba and his students have made significant contributions.

The special session at the prestigious Goldschmidt Conference shows the international scientific community's clear and strong appreciation for Csaba Szabó, the founder of the Lithosphere Fluid Research Lab (LRG) and thanks to him to the entire Hungarian Earth sciences.

Patkó Levente, Berkesi Márta, Bali Enikő, Robert, J. Bodnar, Liptai Nóra, Kovács István, Spránitz Tamás

Ünnep a geológusoknak, ünnepség a községnek Emlékezés Papp Károly professzorra Tápióságon

Dr. Papp Károly a Tápió vidékének legalább tucatnyi híressége közé tartozik – és ezt a szakmánkat nem művelők is mind tudják arrafelé. Tápióságon született 1873-ban, idősebb Lóczy Lajosnak volt előbb tanítványa, majd jó hírű munkatársa, később a pesti egyetemen a földtan egyetemi tanára lett.

Papp Károly nevéhez fűződik az egész Magyar Királyság akkori vasérc- és kőszénkészletének leltárba vétele. Ezt a nagy pontosságot követelő munkát XX. század első évtizedeiben végezte el, és ezáltal a szakma számára elérhetővé tette az akkori ország telepeinek típusait, ismerhetővé vagyonukat éppúgy, mint a kitermelhetőségi paraméterek nagy részét.

Életének következő periódusát professzori tevékenysége mellett a tudományos életben és a közéletben való részvétel jelentette. Akadémiai munkák, szerkesztéssel és publikálással töltött évtizedek következtek.

Majd a harmadik szakasz, a nyugdíj nélküli nyugdíjazás, a tagság nélküli akadémikusi lét. Egyik napról a másikra csak a szüleiről rámaradt birtokra támaszkodhatott Tápióságon. Oda visszahúzódva csupán feleségének, Balogh Margitnak a Természettudományi Múzeumban hasznosítható szakértelme, biológusi-botanikusi diplomája hozott valamit a konyhára, emellett az átszervezett egyetemtől – ilyen-olyan áttételeken keresztül – kapott kicsike megbízásokat, talán fordításokat vagy szakkönyveladásokat, amint manapság mondogatják.

Ebben a tanári tevékenységtől teljesen elzárt világban, ebben a bezártságban, élete utolsó szakaszában az egyik kerek születésnapján váratlan vendégeket fogadhatott. 1960-ban egy kisebb csapat – régi diákjai, kollégái és hajdani beosztottai közül néhányan – tette tiszteletét a kis, kertes házacskában. Az eseményt szerencsénkre Csiky Gábor fényképe is megőrizte, ezen a látogatók és az ünnepeltek láthatók: Reich Lajos, Jaskó Sándor, Tomor János, középen ül Pappné Balogh Margit és Papp Károly, köztük-mögöttük Bogsch László, Batkó Lajos, Józsa István (a hivatalsegéd, akinek nemzedékünk is annyit köszönhetett, ha csiszolatkészítésről volt szó), valamint Jugovics Lajos és Horusitzky Ferenc.

2023-ban november 23-án emlékeztünk Papp Károlyra Tápiságon. Az ünnepség keretén belül a professzor életművét Brezsnyánszky Károly foglalta össze, majd a névadó életéről szóló színielőadás következett a Papp Károly Általános Iskola diákságából válogatott és kiválóan betanított együttes előadásában. Ennek szövegét az iskola magyartanára, Nemesi Béláné állított össze fennmaradt dokumentumok és a Papp Károlyt még személyesen ismerő, idősebb szomszédok segítségével. Az életrajzalapú, ám mégis cselekményes előadás méltán kapott a jelenlévőktől hosszan tartó tapsot...

Az iskola kertjében 1992-ben leplezték le a „kőablakban könyöklő" Papp Károly-domborművet (alkotó Rajki László). Itt helyezték el koszorújukat a szép számmal összegyűlt tisztelgők. A geológusközösség és a Magyar Földtani Társulat nevében Brezsnyánszky Károly és Papp Péter koszorúzott, így tisztelegve Papp Károly emléke előtt.

Papp Péter, Brezsnyánszky Károly

19. Téli Ásványtudományi Iskola, Veszprém, 2024. január 18–19.

Idén ismét személyes részvétellel, a tavalyihoz hasonlóan a Pannon Egyetem veszprémi konferenciaközpontjában rendeztük meg a Téli Ásványtudományi Iskolát. Az iskola története érdekes fordulatokat vett az utóbbi években, hiszen a két járványos évben (2020 és 2021) a kényszerűségből távjelenléttel tartott rendezvény nemzetközivé vált, és a résztvevők száma csaknem 200-ra nőtt.

Ezután viszont 2023-ban és idén visszatértünk a korábbi formátumhoz, ami újra dominánsan magyar nyelvűvé és kisebb létszámúvá (kb. 60 résztvevő) tette az iskolát. Mindkét formátumnak megvannak az előnyei, a kisebb létszám és a személyes jelenlét több közvetlen beszélgetésre, szakmai és egyéb eszmecserére ad lehetőséget. A jövő évi, jubileumi (20.) iskola tervezésénél felmerült, hogy – egyesítve a kétféle formátum előnyeit – hibrid formában rendezzük meg az iskolát.

A program és a résztvevők listája megtekinthető az iskola honlapján (http://mposfai.hu/TAI/tai.htm). Az első előadásblokk karbonátokkal foglalkozott: előbb Lázár Anett szép előadásában kriogén barlangi karbonátokról és ezek laboratóriumi modellezéséről hallottunk, majd Németh Péter szintén barlangi karbonátokban előforduló kalcit-aragonit határok nanoszerkezetét tárgyalta. Ezután két előadás a Balaton üledékével foglalkozott, Nyirő-Kósa Ilona egy egyhónapos időtartamú, mezokozmosz léptékű kísérletben kivált karbonátásványok jellegzetességeiről beszélt, majd Pósfai Mihály a Balaton üledékében és vízében talált foszfordús nanorészecskéket mutatta be. A blokkot Magyari Enikő előadása zárta, amely elsősorban a 8200 évvel ezelőtti gyors éghajlatváltozási esemény régiós társadalmi hatásairól szólt, de az ezzel kapcsolatos, a Balaton üledékében megfigyelhető ásványtani változásokat is érintette.

Az első nap délutáni programját Dallos Zsolt saját eredményekkel illusztrált, „review" jellegű előadása indította a 3D elektrondiffrakciós tomográfia 20 éves történetéről és szerkezethatározásban játszott szerepéről. Ezután két környezeti problémákkal kapcsolatos előadás következett: Gelencsér Orsolya a felszín alatti hidrogéntárolás szempontjából fontos ásványreakciók – elsősorban a pirit és hidrogén kölcsönhatása – XPS vizsgálati eredményeit ismertette, majd Mona Maghsoudlou az ózdi padlászpor jellegének változásait állította párhuzamba a helyi ipari folyamatok történetével. A blokkot Viczián István összefoglaló előadása zárta a kabai meteorit XRD és TEM vizsgálati eredményeiről.

Az iskola idei mottójához – „Ásványok és vizualitás" – leginkább a csütörtök esti blokk kapcsolódott. Weiszburg Tamás a Pannonhalmi Főapátság 18. századi ásványgyűjteményét, illetve annak történetét és reambulációs munkálatait mutatta be. Takács József a gyémánttőzsdék zárt és sajátos világába kalauzolta a hallgatóságot. Az első nap zárásaként egy különleges programot szerveztünk, megünnepeltük a Pannon Egyetem alapításának 75., illetve Nemecz Ernő: *Agyagásványok* című könyve megjelenésének 50. évfordulóját. Nemecz professzor ásványtani munkásságára emlékezve Pósfai Mihály rövid felvezetője után több résztvevő (Hartyáni Zsuzsanna, Raucsik Béla, Viczián István, Németh Tibor, Szabó Csaba, Weiszburg Tamás, Zsirka Balázs, Gelencsér András, Dódony István) rövid felszólalásában tanúskodott az egyetem alapító professzorának, egykori rektorának máig ható szakmai kisugárzásáról.

A pénteki program első részében változatos tudományos kérdések és változatos mérési módszerek kerültek terítékre. Osán János a Bodai Agyagkő Formáció radionuklid-visszatartó képességének vizsgálatára végzett, 12 hónapos kísérleteinek érdekes eredményeit foglalta össze. Maróti Boglárka miocén tengerisünök külső morfológiáját 3D LED szkennerrel, belsejét neutrontomográfiával és a sünökben elraktározódott eredeti üledék összetételét PGAI-módszerrel vizsgálta. Hegedűs Máté előadásában egy eredeti módszert mutatott be, amely SEM-felvételek képfeldolgozása által a fogzománcot alkotó prizmák orientációjának kvantitatív jellemzésére alkalmas. Kovács János előadása a szoptatós kismamák életét megkeserítő tejkő képződéséről és ásványtani jellemzéséről szólt. A blokkot Horváth Laura előadása zárta, amelyben a rónabányai barnaszén öngyulladása által létrehozott metamorf ásványtársulás egzotikus képviselőit mutatta be.

A programot egy öt előadásból álló, földtani és ércteleptani vonatkozású blokk zárta. Raucsik Béla és Varga Andrea előadásai Erdélybe, a Pajzsi Komplexum (Hegyes-hg.) vidékére kalauzolták a hallgatóságot, egyrészt a fillonit és metabázit kőzetek (metamorf) rétegszilikátos ásványtársulásának, másrészt a magmás-hidrotermás és metaszomatikus folyamatok által létrehozott ásványok bemutatásával. A framboidális és kolloform pirit tulajdonságai és az ércképző folyamatok közötti összefüggésekre mutatott rá B. Kiss Gabriella előadása, majd Molnár Ferenc uránmentes ásványokon (galenit, altait, káliföldpát) végzett ólomizotópmérések alkalmazását taglalta az ércképződés időbeli szakaszainak elkülönítésében. Végül Bíró Máté a recski porfíros rézérchez kapcsolódó ásványok nyomelem és kénizotóp karakterisztikáit mutatta be.

Összességében az iskola ismét kiváló alkalmat biztosított arra, hogy a hazai ásványtani kutatóműhelyek képviselői megismerjék egymás aktuális kutatási eredményeit. Az előadásokat élénk vita követte, amely a kávészünetekben és csütörtök este a Sport vendéglőben is folytatódott. Még a vendéglői program előtt a résztvevők egy népes csapata Molnár Zsombor idegenvezetésével látogatást tett a PE Nanolab-ban.

Az iskola szakmai gazdái az MTA Geokémiai, Ásványtani és Kőzettani Tudományos Bizottságának Nanoásványtani Albizottsága és a Magyarhoni Földtani Társulat Ásványtan-Geokémiai, valamint Agyagásványtani Szakosztálya. Az iskola anyagi hátterét ezúttal a PE Környezeti Ásványtan Kutatócsoportjának saját bevétele biztosította.

Pósfai Mihály, Kovács-Kis Viktória

Személyi hírek

Gyászhír

Fájdalommal tudatjuk, hogy

Deák Ferenc tagtársunk életének 85. évében és
Jocháné Edelényi Emőke tagtársunk életének 78. évében elhunyt.

Emlékük szívünkben és munkáikban tovább él!

Magyarhoni Földtani Társulat
Földtani Közlöny 153/4 (2023) 275–380
Hungarian Geological Society

Tartalom — Contents

WÉBER Zoltán: Bevezető. – *Preface.* 277

CZECZE Barbara, GYŐRI Erzsébet, TIMKÓ Máté, KISZELY Márta, SÜLE Bálint, WÉBER Zoltán: A Kárpát–Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földrengés-adatbázis. – *Seismicity of the Carpathian–Pannonian region: updated and revised earthquake database.* 279

GYŐRI, Erzsébet, CZECZE, Barbara, TIMKÓ, Máté, BONDÁR, István, CZANIK, Csenge, CZIFRA, Tibor, FODOR, Csilla, GRÁCZER, Zoltán, GRIBOVSZKI, Katalin, GYARMATI, Anett, KALMÁR, Dániel, KISZELY, Márta, KOVÁCS, István János, MÓNUS, Péter, SÜLE, Bálint, SZANYI, Gyöngyvér, TÓTH, László, VARGA, Péter, ZSÍROS, Tibor, WÉBER, Zoltán: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020) (M>2). – *A Cirkum-Pannon régió szeizmicitása (456–2020) (M>2).* 297

PORKOLÁB Kristóf, BÉKÉSI Eszter, BROERSE, Taco, KENYERES Ambrus, WÉBER Zoltán: Regionális feszültségmező és deformációs sebesség a Pannon-medence térségében: új adatrendszerek és térképek bemutatása. – *Regional stress field and strain rate field in the Pannonian region: recent datasets and maps.* 299

BÉKÉSI Eszter, PORKOLÁB Kristóf, WÉBER Zoltán: Stress field of the Pannonian region. – *Feszültségmező a Pannon-térségben.* 309

PORKOLÁB Kristóf, BROERSE, Taco, KENYERES, Ambrus, BÉKÉSI, Eszter, TÓTH, Sándor, MAGYAR, Bálint, WESZTERGOM, Viktor: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. – *GNSS-alapú deformációs sebesség a Pannon-térségben.* 311

KOROKNAI Balázs, WÓRUM Géza, TÓTH Tamás, KOROKNAI Zsuzsa, NÉMETH Viktória, KOVÁCS Gábor: A neotektonikus fázis deformációi Magyarországon. – *Deformations of the neotectonic phase in Hungary.* 313

KOROKNAI Balázs, KOVÁCS Gábor, WÓRUM Géza, BÉKÉSI Eszter, GYŐRI Erzsébet, CZECZE Barbara, WÉBER Zoltán, PORKOLÁB Kristóf, BOZSÓ István, SZÁRNYA Csilla, SZŰCS Eszter, NÉMETH Viktor, BALÁZS László, SZABÓ Gergely, TÓTH Tamás: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. – *Seismotectonics and seismotectonic hazard in Hungary.* 335

KOROKNAI, Balázs, BÉKÉSI, Eszter, BONDÁR, István, CZECZE, Barbara, GYŐRI, Erzsébet, KOVÁCS, Gábor, PORKOLÁB, Kristóf, TÓTH, Tamás, WESZTERGOM, Viktor, WÉBER, Zoltán, WÓRUM, Géza: Seismotectonic map of Hungary. – *Magyarország szeizmotektonikai térképe.* 353

KOVÁCS, Gábor, KOROKNAI, Balázs, GYŐRI, Erzsébet, NÉMETH, Viktória, BALÁZS, László, BONDÁR István, WÓRUM, Géza, SZABÓ, Gergely, KEGYES-BRASSAI, Orsolya, TÓTH, Tamás: Seismotectonic hazard map of Hungary. – *Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképe.* 355

KÁZMÉR Miklós, AL-TAWALBEH, Mohammad, GYŐRI Erzsébet, LASZLOVSZKY József, GAIDZIK, Krzysztof: Visegrád pusztulása a török hódoltság előtt – az 1541-es földrengés történeti és archeoszeizmológiai nézőpontból. – *Destruction of Visegrád before the Ottoman occupation – historical and archaeoseismological data on the 1541 earthquake.* 357

KECSKEMÉTI Tibor: In memoriam Dr. PARÁK Tibor 375

Hírek, ismertetések (összeállította: PIROS Olga) 377