

Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége

KOROKNAI Balázs¹, KOVÁCS Gábor^{1,3}, WÓRUM Géza¹, BÉKÉSI Eszter², GYÓRI Erzsébet², CZECE Barbara²,
WÉBER Zoltán², PORKOLÁB Kristóf², BOZSÓ István², SZÁRNYA Csilla², SZÜCS Eszter²,
NÉMETH Viktor¹, BALÁZS László^{1,4}, SZABÓ Gergely³, TÓTH Tamás¹

¹Geomega Kft., 1095 Budapest, Mester u. 4.

²Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, 9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

³ELTE BDPK Földrajzi Tanszék, 9700 Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4.

⁴Wigner 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 near-surface 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 adatrendszer (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 földregések eloszlását és fészekmechanizmusát, az aktív feszültségmező jellegét és irányítottságát, valamint hazánk földregés-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 földregések hipocentrumainak a legmodernebb egy- és többeseményes helymeghatározó algoritmusokkal történő pontosítása, továbbá az antropogén szeizmikus események kiszűrése (CZECZE et al. 2023).

– A történelmi földregés 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 földregés 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 és 3D 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 földregések 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 piktant törökországi–szíriai pusztító földregések adtak legutóbb szomorú aktualitást (GSI 2023, ESA 2023). E vizsgálatok segítségével egybehangzóan mintegy 2–3 méteres, balos eltolódást jelző, felszíni elmozdulást dokumentáltak a földregésekhez 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 (feszültségzsim) 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 térkép*en ugyancsak alapvető elemeket jelentenek a szeizmicitás és a szerkezeti modell. Az utóbbi a veszélyeztetettség szempont-

jaból 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 háttéréként 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 rezgésérősítő hatással kell számolni. A gyakorlati szempontból kevésbé lényeges aktív feszültségrezsimet és kéregdeformáció-adatokat a 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 (GYÖRI 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; GYÖRI et al. 2023a; TÓTH et al. 2002, 2005). Igazán jelentős rengések ($M \geq 6$) 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 his-

torikus 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 $M \geq 5$ 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, $M_w \sim 5,6$), 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 helyszínen 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 (GYÖRI 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 szerkezeti lényegében egymás folytatásának tekinthetők, ahogy azt a szeizmotektonikai térképen ábrázolt vetőrajzolat (ún. „gyökérvetők”, lásd *Szerkezeti modell: vetők és aktív vetők*, illetve WÓRUM et al. 2020) is jelzi.

A jelenkori feszültségmező jellege és irányítottsága

Fészekmechanizmus-megoldások

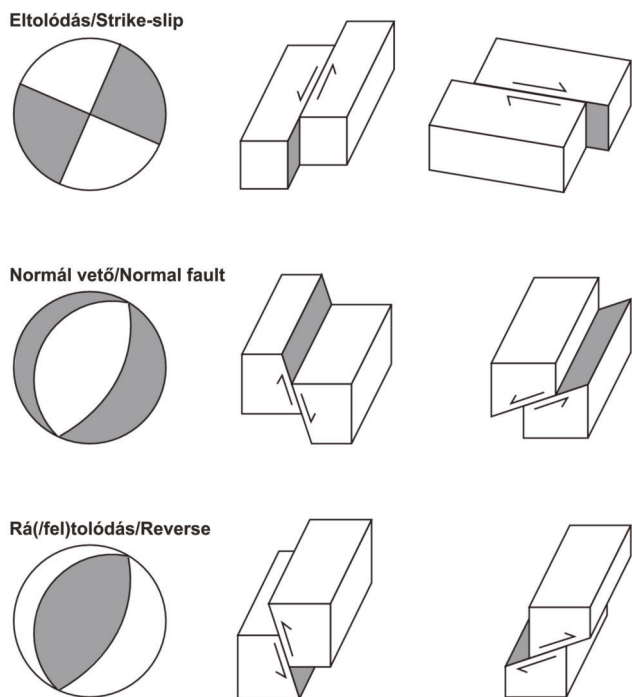
A jelenkori feszültségmező jellegére (tektonikai stílusára) mindenekelőtt a földrengések fészekmechanizmus-megoldásai alapján vonhatunk le nagy területre érvényes következtetéseket. Ennek módszertani háttérét és a legfontosabb eredményeket PORKOLÁB et al. (2023a) ismerteti a régióra vonatkozó jelenkori 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 találhatóak. 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 fentiekben túl feltünteteti 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 grafikusán. A földrengés hipocentruma köré képzelt, ún. fokális gömböt a vetősík és az erre merőleges segédsík négy negyedre osztja. Két szemközti ténegyedben a P-hullám első elmozdulása pozitív, a másik kettőben negatív. Szimmetriakok 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 hipocentrumtól. 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 ténegyede-



1. ábra. A fő vetőtípusok és a hozzájuk tartozó strandlabdák (SHEARER 2009 után). Fehér szín jelöli a negatív, szürke a pozitív ténegyedeket. 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

dek (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.

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 adatrendszerket, 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 feszültségrezsimet folytonos színskála segítségével jelenítettük meg az új szeizmotektonikai térképen, így ez az elem képezi a térkép hátterét. A fehér-lila színárnyalatok az extenziós/transzteniós, a (sötét)kék-zöld az eltolódásos, míg a sárga-barna színek a transzpressziós-kompressziós feszültségrezsimet jelenítik meg (2. ábra).

Az egyik legfontosabb eredmény, hogy Magyarország-on eltolódásos, valamint transzpresszív jellegű feszültségrezsim uralkodik, sehol sem jelentkezik extenzió vagy transztenió. A vizsgált, alapvetően eltolódásos fészekmechanizmus-megoldások közül mindössze két esetben jelentkezett gyenge normál komponens is (azaz minimális transzteniós jelleg). Ugyanakkor ezen megoldások környezetében minden más megoldás eltolódást vagy rátolódásos jellegűt mutatott, így a területileg is számottevő transztenió jelenléte kizárható. Extenziós és transzteniós rezsim 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 megállapításaiival (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 irányítottágára a földrengések fészekmechanizmus-megoldásai mellett további geofizikai-geológiai adatrendszerek (fúrólukfal-kirepedések, ráfúrások 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 feszültség-anomáliák is tükröződjének 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 összetetését 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 mozognak 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 részterület tehát átmenetet képez a viszonylag gyorsan deformálódó Dinaridák, valamint az igen lassan deformálódó középső és északi ország-rész (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 egyenlők. 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 irányítottágúak. 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 felszín deformáció), valamint esetleg az elasztikus feszültségek rátafüggetlen jellegeből adódhatnak. E kérdéskör bővebb kifejtése PORKOLÁB et al. munkájában (2023a) található.

A feszültségrezim és kéregdeformációs eredmények együttesen megerősítik, hogy a vizsgált alp-kárpáti-dinári régió geodinamikáját meghatározó két fő lemeztektónikai 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 lemeztektónikai skálán Afrika és Eurázia 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 rövidüléssel jellemezhető deformációval reagál (HORVÁTH 1995, TOMLJENOVIC & 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 („gyökérvonalak”) tekinthetők, amelyeket az új neotektonikai térkép (WÓRUM et al. 2020) mutat be (halvány-szürke színnel). Hangsúlyozni kell, hogy az ábrázolt prepannóniai vetők nem mindegyike mentén jelentkező 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 aktivitást (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 ($\leq 2,6$ millió év) aktivitást mutató vetőket tekintettük aktívnek. 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 reaktívált prepannóniai gyökerek) egy szűkebb részhalmazát jelent 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 előidézhetheti 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 lehetővé megalapozottá.

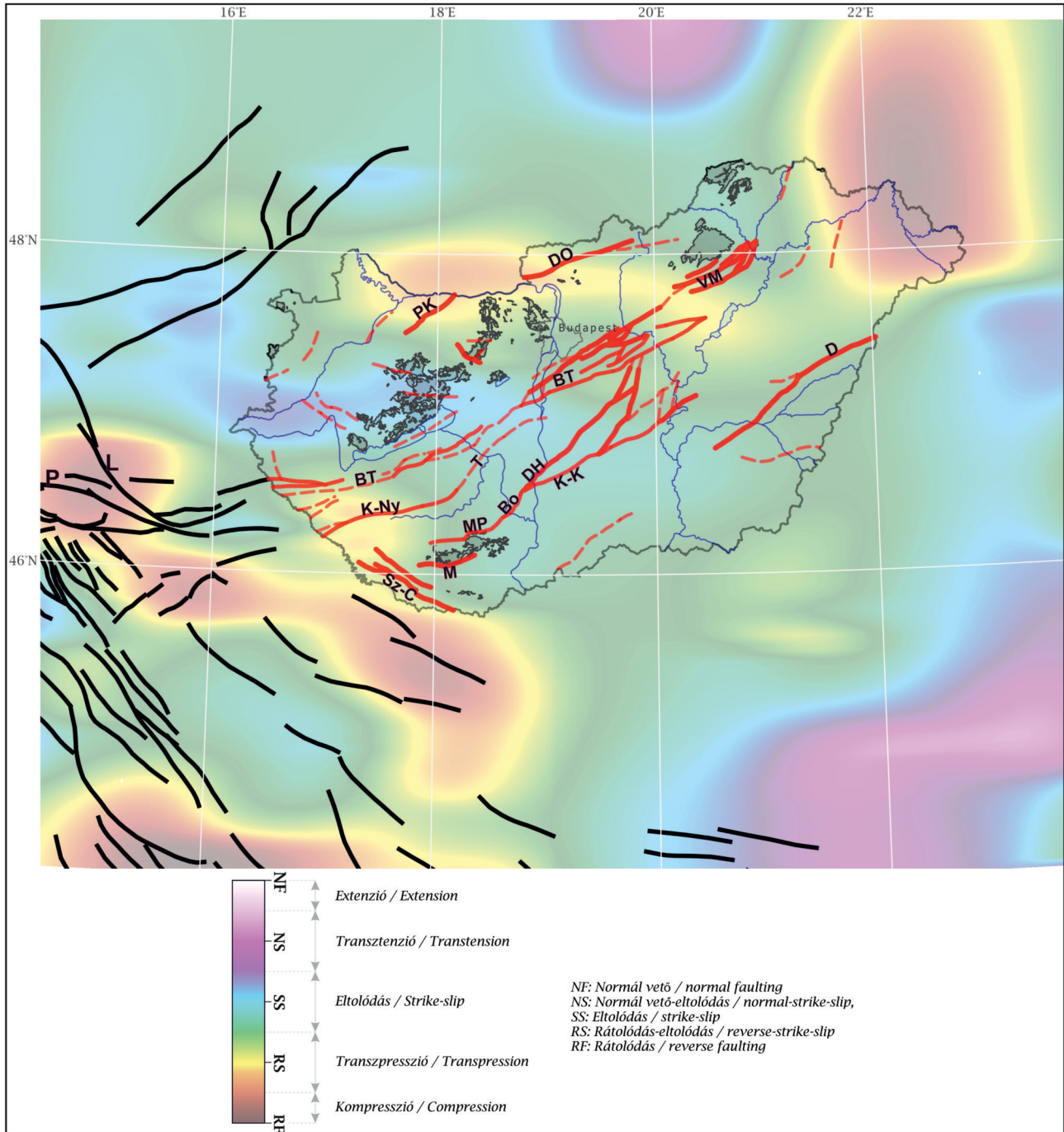
Aktív vetők Magyarországon és az ország környezetében

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 po-

tenciálisan 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 – European Fault Source Model, 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” irányított-ságot 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 irányított-ságától (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 irányított-ságot tükröző alpi (északon) és dinári (délen) szerkezeti doméneket választja el.

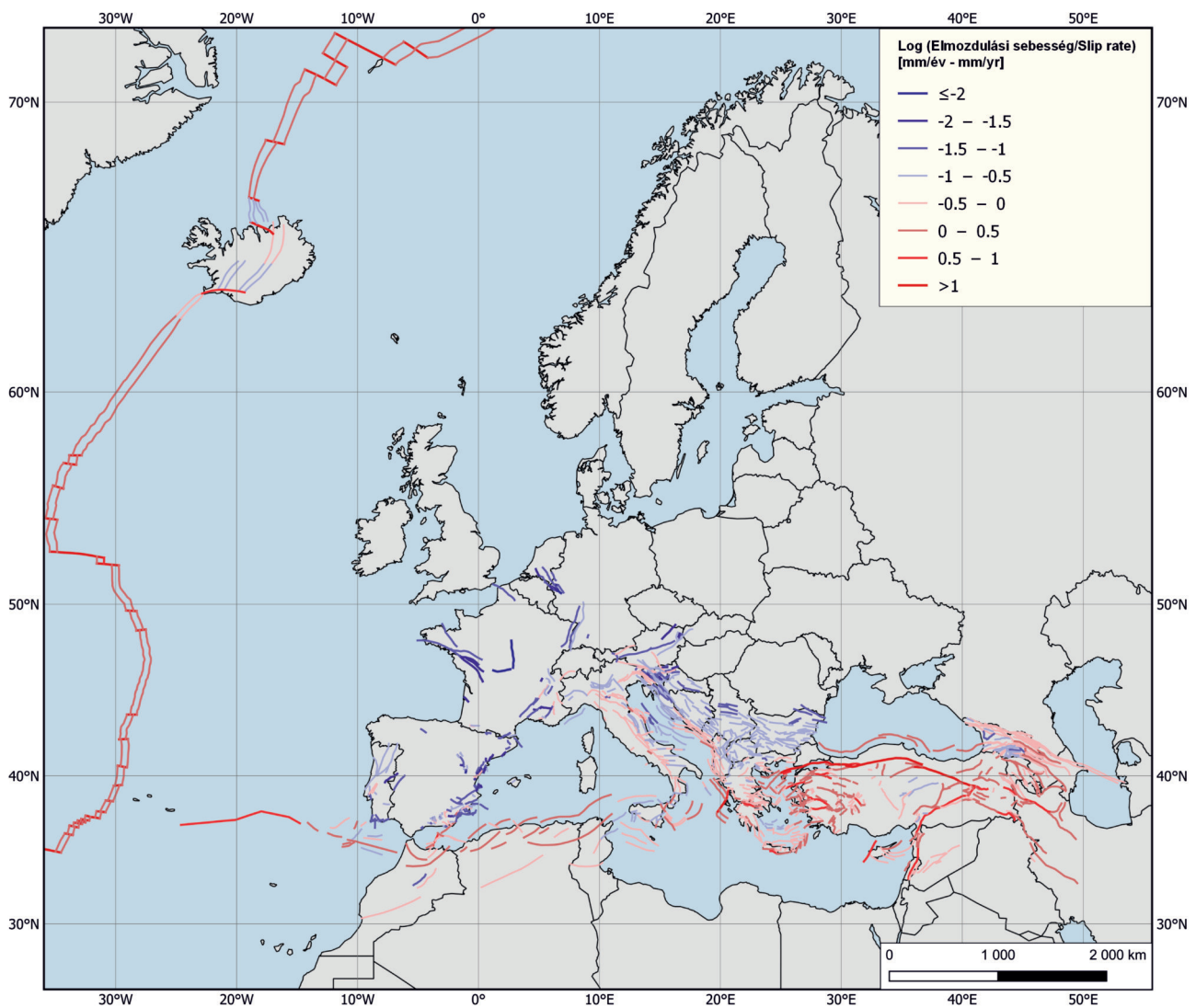
Magyarország területén az említett Periadriai-vető keleti folytatását a Balaton-vető(zóna) képezi. A kb. K–Ny-i csapású periadriai-vetőzónához észak felől csatlakozik a térdépileg igen markáns, ÉNy–DK-i csapású Labot-vető (2. ábra), amely a „klasszikus” (miocén) Periadriai-vetőt el is veti. A Labot-vetőhöz 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 TOMLJENOVIC & CSONTOS (2001) és TOMLJENOVIC 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 szembeötlő, 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 ($\leq 0,3$ – $0,1$ 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 dominanciája 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 (SZÜCS 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 (hózzávetőlegesen $\leq 0,1$ mm/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 $\leq 0,1$ mm/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 (tizedmilli-méter/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 ($M_w \geq 5$) 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 földrengésveszélyeztettség-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).

Összességként megállapítható, hogy jelentős földrengések ($M_w \geq 5$) 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-veszélyeztettség mértéke is számottevően pontosítható. A földrengés-veszélyeztettség 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 mindekelőtt abban tér el a szeizmotektonikai térképtől, hogy azokat az elemeket ábrázolja, amelyek legfontosabb közvetlen információkat nyújtják a társadalom és a szakemberek számára a veszélyeztetettségéről.

A felszínen várható mozgások – leginkább talajgyorsulások – meghatározására irányuló veszélyeztetettség számítások első lépése a földrengés-forrásonak 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*),

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

Table 1. 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 fekéből 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	

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 üledékekkel (kis V_{S30}) fedett területen, mint nagy szilárdságú (nagy V_{S30}) kőzet esetében (CIPTA et al. 2016) az epicentrumtól való távolságot megegyezőnek tekintve. (A veszélyeztetettség 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 megítélés 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 talajosztályt elkülönítésére azért van szükség, mert a két réteg határától 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).

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 geomorfológiai jellegek pontos meghatározása.

- Szakirodalmi V_{S30} -adatok összegyűjtése és geomorfológiai paraméterek hozzárendelése.
- Domborzatmodell(ek) és lejtérszter 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 legvesélyeztetettebb talajosztályok geomorfológiai térképezése fúrési adatok és publikált releváns geomorfológiai és geológiai térképek (KOC SIS 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

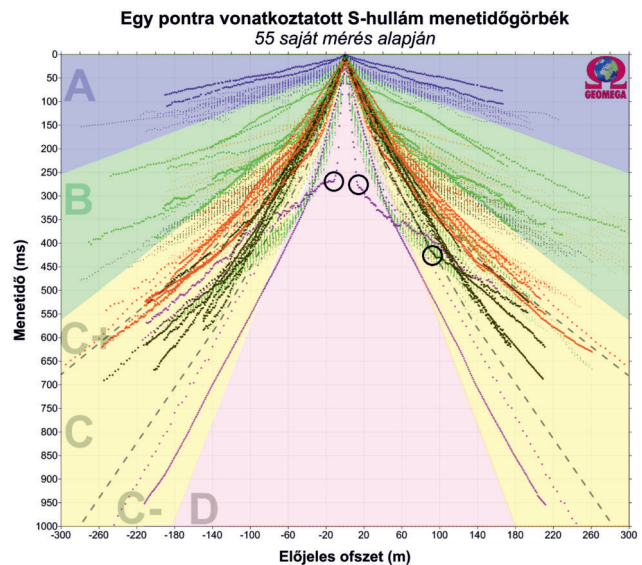
A projekt során az ország teljes területén 10 különböző geomorfológia besorolású helyszínen végeztünk méréseket, amelyek összesen 67 új V_{S30} -meghatározást eredményeztek. A méréseket a Geomega Kft. újonnan fejlesztett Land-Streamer eszközével hajtottuk végre. Az S-hullám sebességértékeit nyíróhullám-tomográfia 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 szilárdság alapú 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



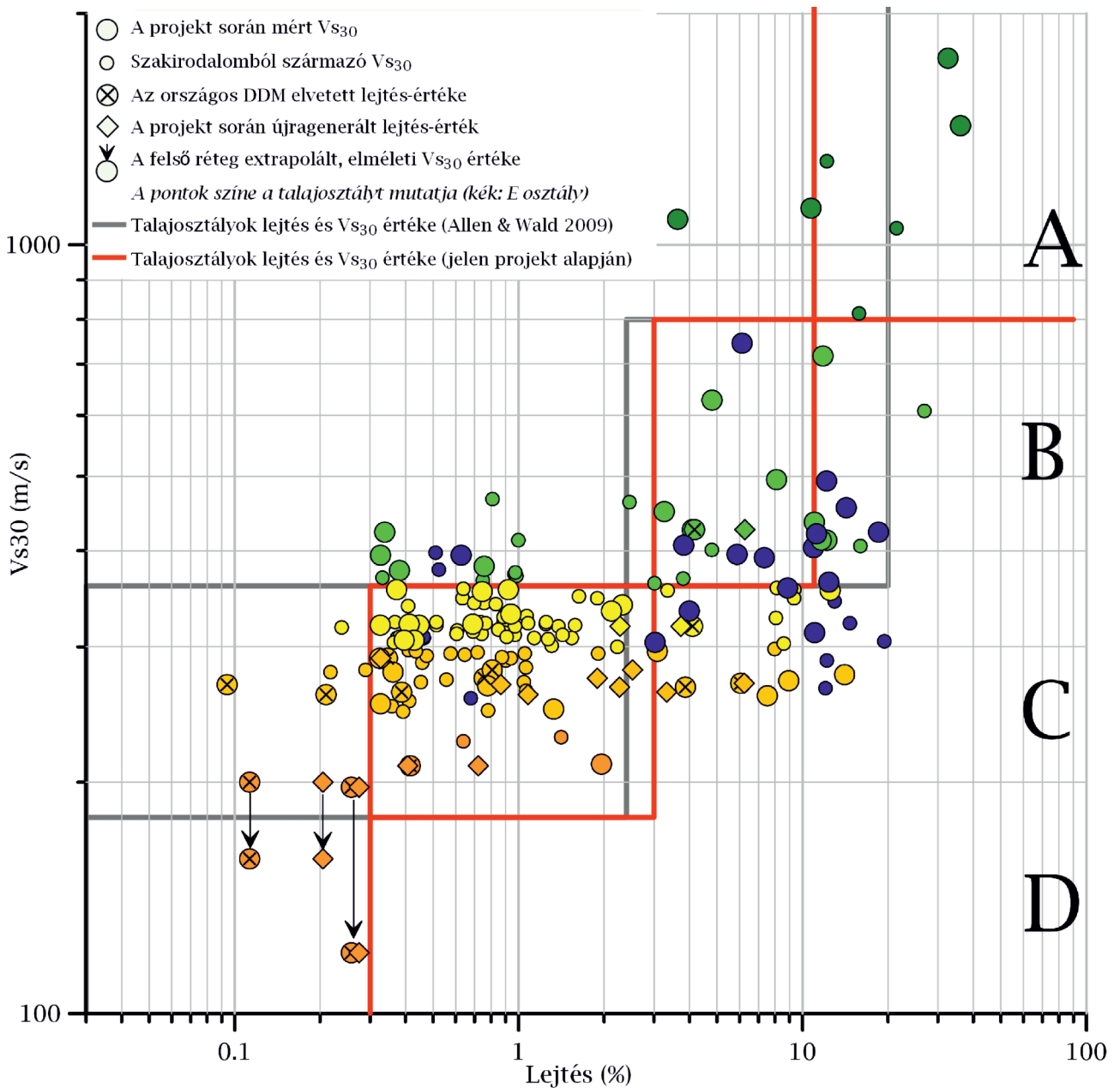
4. ábra. Egy pontra vonatkoztatott S-hullám menetidőgörbék 55 saját mérés alapján, amelyek a mérési helyszíneken az Eurocode 8 talajosztály besorolását lehetővé tették. A nagybetűk és a színezett tartományok az egyes Eurocode 8 talajosztályok tartományát jelölik. Egyes görbéken néhány jellegzetes törési 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 kavicssteraszok, löszplatók, hegygerincek stb. – vezet megfelelő eredményre a veszélyeztettség besorolása szempontjából, továbbá nem is minden kategória határozható meg pusztán a lejtőszög figyelembevételével. Az említett, (közel) vízszintes helyzetű területekhez ugyanis a kicsiny lejtőszöghöz tartozó elméleti értéknel a valóságban nagyobb V_{S30} kapcsolódik, és ebből fakadóan a helyi hatás szempontjából kisebb veszélyeztettségűek. 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 mérési 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 szintvonalai-ból generált, 30 m felbontású, szükség szerint simított, raszteres domborzatmodell segítségével határoztuk meg. Nagyon kis lejtés esetén saját domborzatmodellét hoztunk létre az ingyenesen elérhető, régi topográfiai térképek felhasználásával. A felhasznált domborzatmodellekből százalékos lejtérszteret 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 V_s trend által meghatározott talajosztályt mutatja (sötétzöld: A, világoszöld: B, sárga árnyalatú: 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 indokoltá 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 háttérének színezése mutatja, ahol a zöld árnyalatok a kevésbé, a vörös árnyalatai a jobban veszélyeztetett területeket ábrázolják.

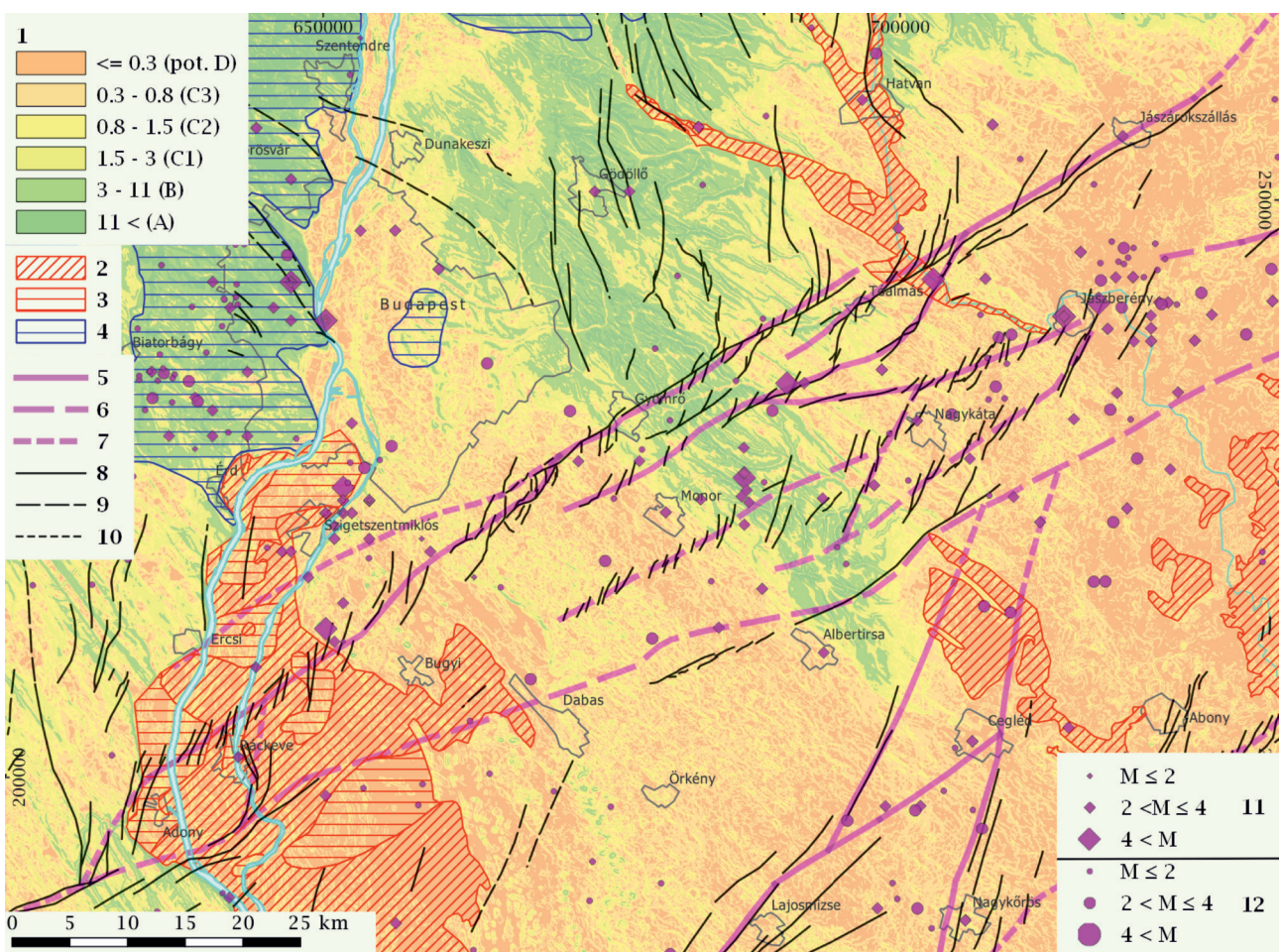
Az új, országos V_{s30} -térkép elkészítésében a lejtőszög meghatározása mellett elvégzett geomorfológiai besorolás két szempontból is kiemelkedően fontos volt:

(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 lejtérszakter 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 üledékekkel 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 (KOC SIS 2018, GYALOG et al. 2005) és fúrás 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 geomorfológiai paraméterei alapján a potenciális D kategóriába esik, de az üledékvastagság a fúrás 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 - Pseudo-D osztály (fiatal, laza üledékek vastagsága < 25 m); 4 - Potenciális E osztály. Prepannoniai vető negyedidőszaki aktivitása [5-7]: 5 - aktív; 6 - valószínűleg aktív; 7 - potenciálisan aktív. Késői posztrift és negyedidőszaki, felszinközeli tektonikus és atektonikus vetők [8-10]: 8 - neotektonikus vető; 9 - valószínű neotektonikus vető; 10 - bizonytalan/vitatott eredetű vető. Földrengések [11-12]: 11 - 456-1995 közötti rengések helye és magnitúdója; 12 - 1996-2021 közötti 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

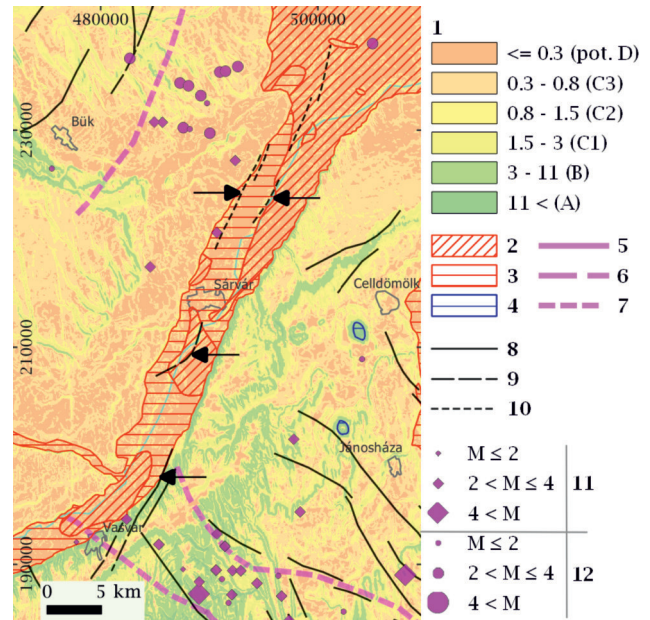
Az új, országos térképen azokat a területeket tekinthetjük a legveszélyeztetettebbnek, ahol nagyobb számú földrendést vagy ilyen területhez kapcsolódó aktív vetőt láthatunk, továbbá potenciális D vagy E talajosztály fordul elő. Ilyen területek például Délnyugat-Magyarországon Csurgó–Nagykanizsa és Zalaszentgrót környéke, Nyugat-Magyarországon Répcelak környezete (Bük–Mihályi–Sárvár háromszög). A Dunántúli-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 vetőszegmensevel (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 Pinchely, Szabadszállás környezete és a Zempléni-hegység délnyugati oldala. Hasonlóképp veszélyeztetett az északi országgrészben (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) fűrési 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 beruháznál 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 tár-



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 földrendések is. A fekete nyilak 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.

sadalom és a szakemberek számára a veszélyeztetettségéről. Gyakorlati szempontból kiemelt jelentőségű a szeizmicitás, az aktív és neotektonikus vetők és az EUROCODE 8 szerinti meghatározott altalajosztályok ábrázolása. Ez utóbbiak azt mutatják meg, hogy földrendés kipattanása esetén hol és milyen mértékű rengésérősítő hatással kell számolnunk a helyi geológiai adottságok következtében. Mindkét térkép az első ilyen típusú áttekintés az országról.

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 ($M_w \geq 5$) 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 kevésbé 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 háttérének részletes kidolgozásában. Köszönettel

tartozunk dr. CSONTOS Lászlónak és egy ismeretlen lektoroknak, 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., GYÓRI, 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., GYÓRI, E., NÉMETH, V., BALÁZS, L., CZECZE, B., BONDÁR, I., WÓRUM, G., SZABÓ, G., KEGYESBRASSAI, 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 (V_{s30}). – *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., GRIBOVSKI 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 Hatástanulmány (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\(16\)](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 Közlemény* **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 Közlemény* **140**, 367–390.
- BASIL, R., DANCUI, L., CARAFA, M. M. C., KASTELIC, V., MAESANO, F. E., TIBERTI, M. M., VALLONE, R., GRACIA, E., SESETIAN, 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., SZÚCS, E. & WESZTERGOM, 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
- CAMELBECK, 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
- CAMELBECK, 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., GYÓRI E., TIMKÓ M., KISZELY M., SÜLE B. & WÉBER Z. 2023: A Kárpát-Pannon régió szeizmicitása: aktualizált és átdolgozott földregés 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: Feszültség-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.mbfisz.gov.hu/fdt100/
- GYÓRI, E., CZECZE, B., TIMKÓ, M., BONDÁR, I., CZANIK, Cs., CZIFRA, T., FODOR, Cs., GRÁCZER, Z., GRIBOVSKIZKI, 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
- GYÓRI 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. & CLOETINGH, 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 Közlemény* **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., GYÓRI, E., LASZLOVSKY, 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 Közlemény* **151**, 179–200. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.2.179>
- KOROKNAI B., BÉKÉSI, E., BONDÁR, I., CZECZE, B., GYÓRI, E., KOVÁCS, G., PORKOLÁB K., TÓTH, T., WESZTERGOM, V., WÉBER, Z. & WÓRUM, G. 2023a: Seismotectonic map of Hungary, Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlemény* **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 Közlemény* **153/4**, 313–334. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.313>
- KOVÁCS, G., KOROKNAI, B., GYÓRI, 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 Közlemény* **153/4**, 355. doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapE
- KOVÁCS G., KOROKNAI B., GYÓRI 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 veszélyeztetettségének térképezése megalkotása és elemzése. Zárótanulmány*. Földfizikai és Úrtudományi 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 paleoszeizmológiai 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/jscesee.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](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00036-4)
- MÁRTON, E., PAVELIĆ, D., TOMLIJENIĆ, 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., ČISOVIĆ, 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., TOMLIJENIĆ, 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 Physical 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 in 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 Közlemény* **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 Közlemény* **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 geomorphological 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.
- SZÚCS 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.
- TOMLJENIČIĆ, 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>
- TOMLJENIČIĆ, 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 Közlemény* **132**, 327–337.
- TÓTH, L., GYÓRI, 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](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., CAMELBECK, T. A., VERBEECK, K. & MEGHRAOUI, M. 2001: 150-kyr. record of surface 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., CZECE, 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., PAVLOVČIĆ-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.