

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

PORKOLÁB Kristóf¹, BÉKÉSI Eszter¹, BROERSE, Taco², KENYERES Ambrus³, WÉBER Zoltán¹

¹HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (HUN-REN FI), Sopron

²Department of Geosciences, Utrecht University, Utrecht, Hollandia

³Lechner Non-Profit Kft. – Kozmikus Geodéziai Observatórium, Budapest, Magyarország

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

Abstract

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

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

Összefoglalás

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

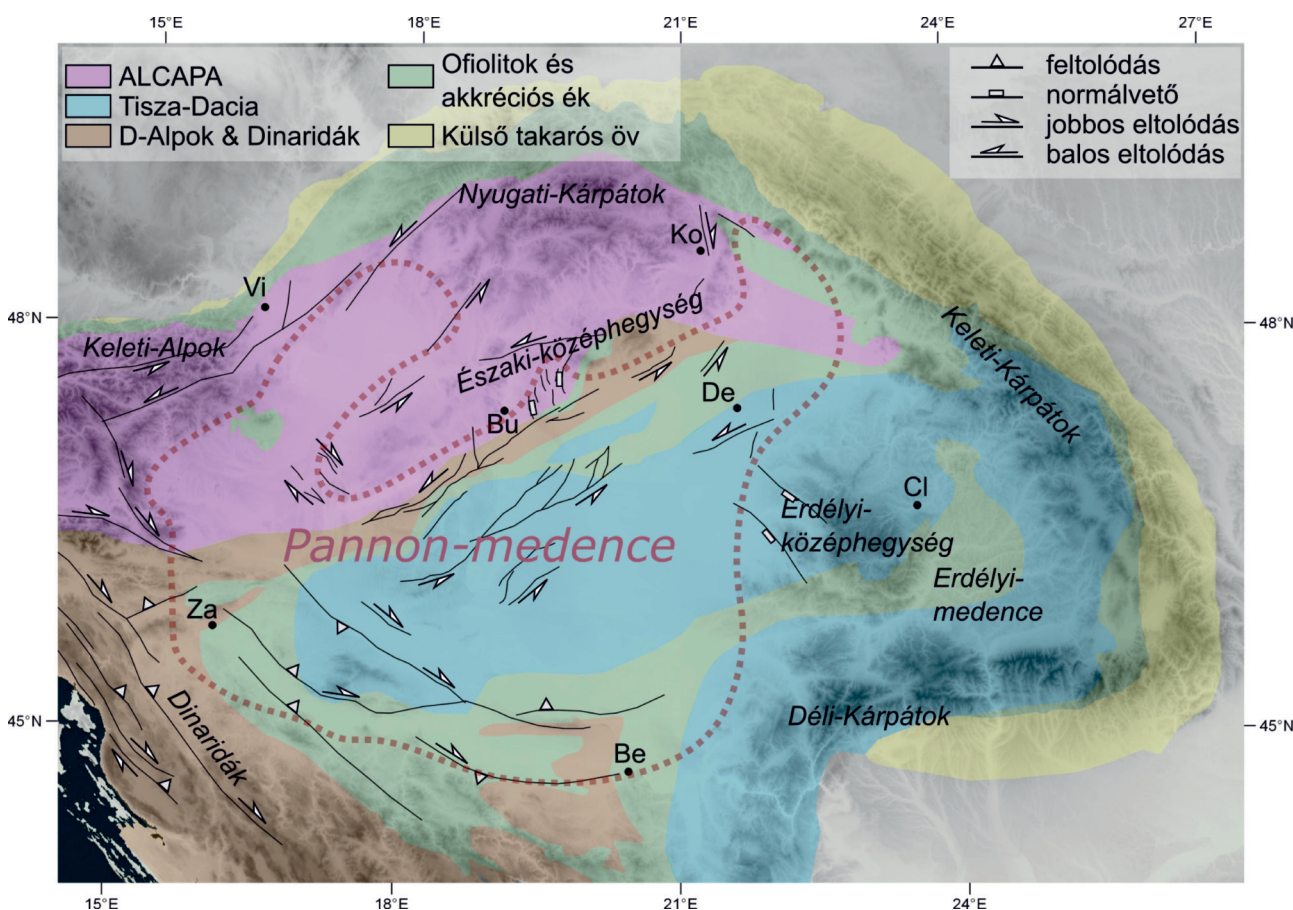
Kulcsszavak: feszültségmező, deformációs ráta, Pannon-medence, szeizmotektonika, aktív tektonika

Bevezetés

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

a sűrűbb és megbízhatóbb adatrendszerek előállítása és használata, különös tekintettel a (kéreg)feszültségadatokra (BADA et al. 2007a) és (űr)geodéziai felszínmozgásadatokra (GRENERCZY et al. 2005).

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



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

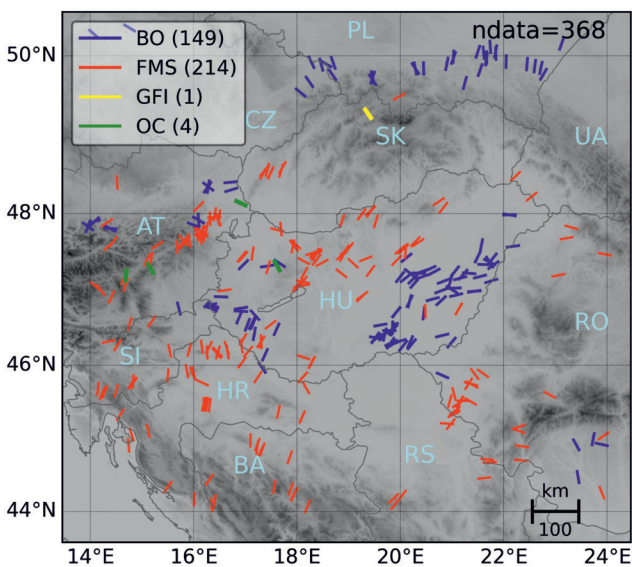
Figure 1. Tectonic units and neotectonically active faults of the Pannonian region (after PORKOLÁB et al. 2023b; fault pattern based on BADA et al. 2007a; KOROKNAI et al. 2020). Dotted line denotes the Pannonian Basin

Adatok és módszertan

Feszültségadatok és interpoláció

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

A feszültségindikátorok eloszlása a területen nem homogén (2. ábra). Ezért a feszültségmező regionális léptékű



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

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

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

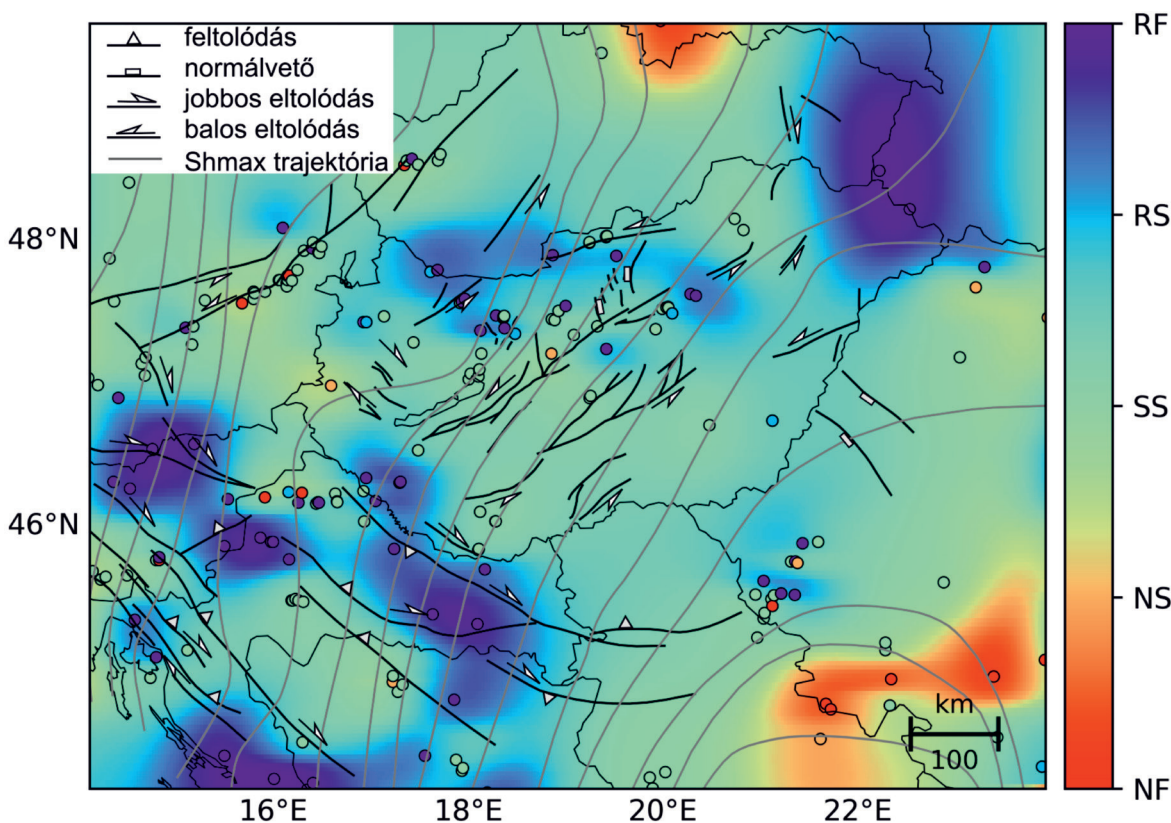
blue = borehole breakout analysis (BO), red = focal mechanism solution (FMS), yellow = geologic fault-slip data (GFI), green = overcoring measurement (OC). Country abbreviations: AT - Austria, BA - Bosnia and Herzegovina, HR - Croatia, CZ - Czech Republic, HU - Hungary, PL - Poland, RO - Romania, RS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

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

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

GNSS adatok és interpoláció

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



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

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

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

Eredmények

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

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

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

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

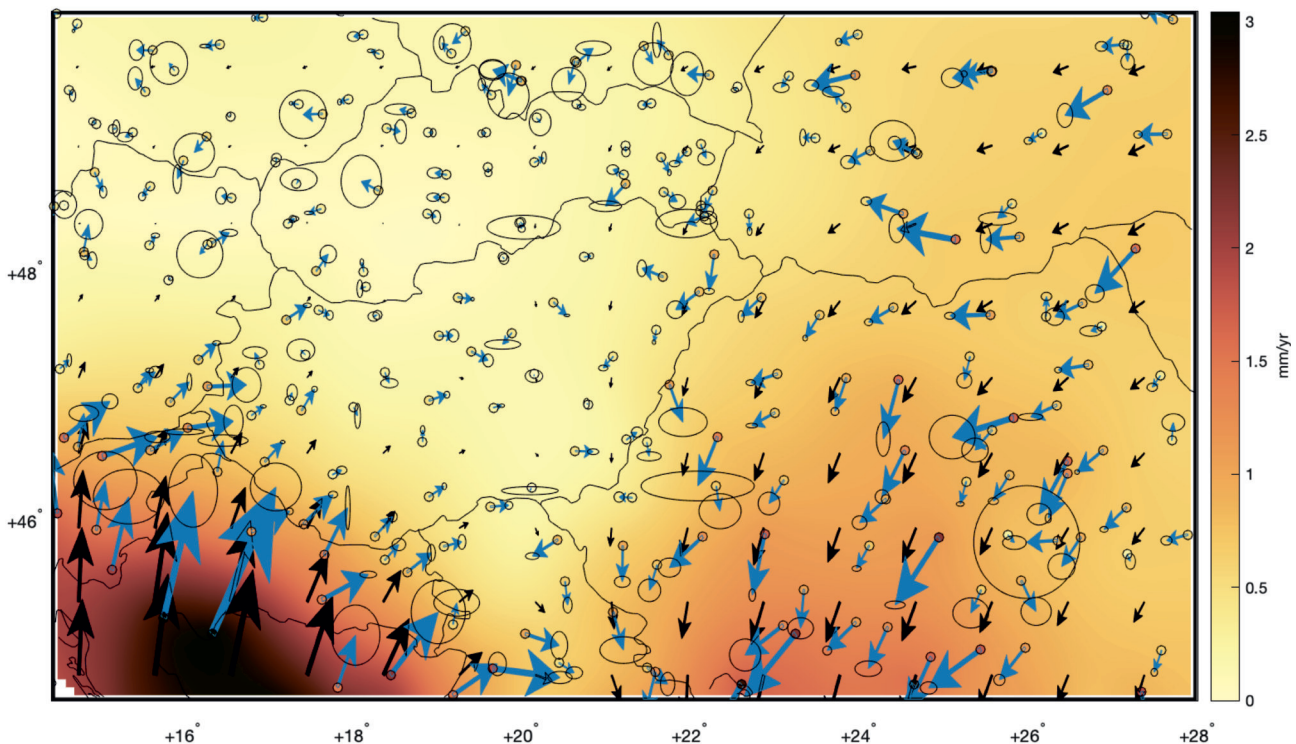
A 368 S_{Hmax} indikátor közül a 214 fészekmechanizmus-megoldás lehetővé tette a tektonikai stílus vagy feszültség-rezsim meghatározását (3. ábra). Hangsúlyozzuk, hogy az ilyen típusú interpolált feszültség-rezsim-térkép csak a jelentős vető menti elmozdulások (földrengések) által hordozott információkat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

északibb részén, a Nyugati-Kárpátokban lokálisan szintén megfigyelhető az extenziós rezsim (3. ábra), bár ezt csak egyetlen fészekmechanizmus-megoldás támasztja alá.

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

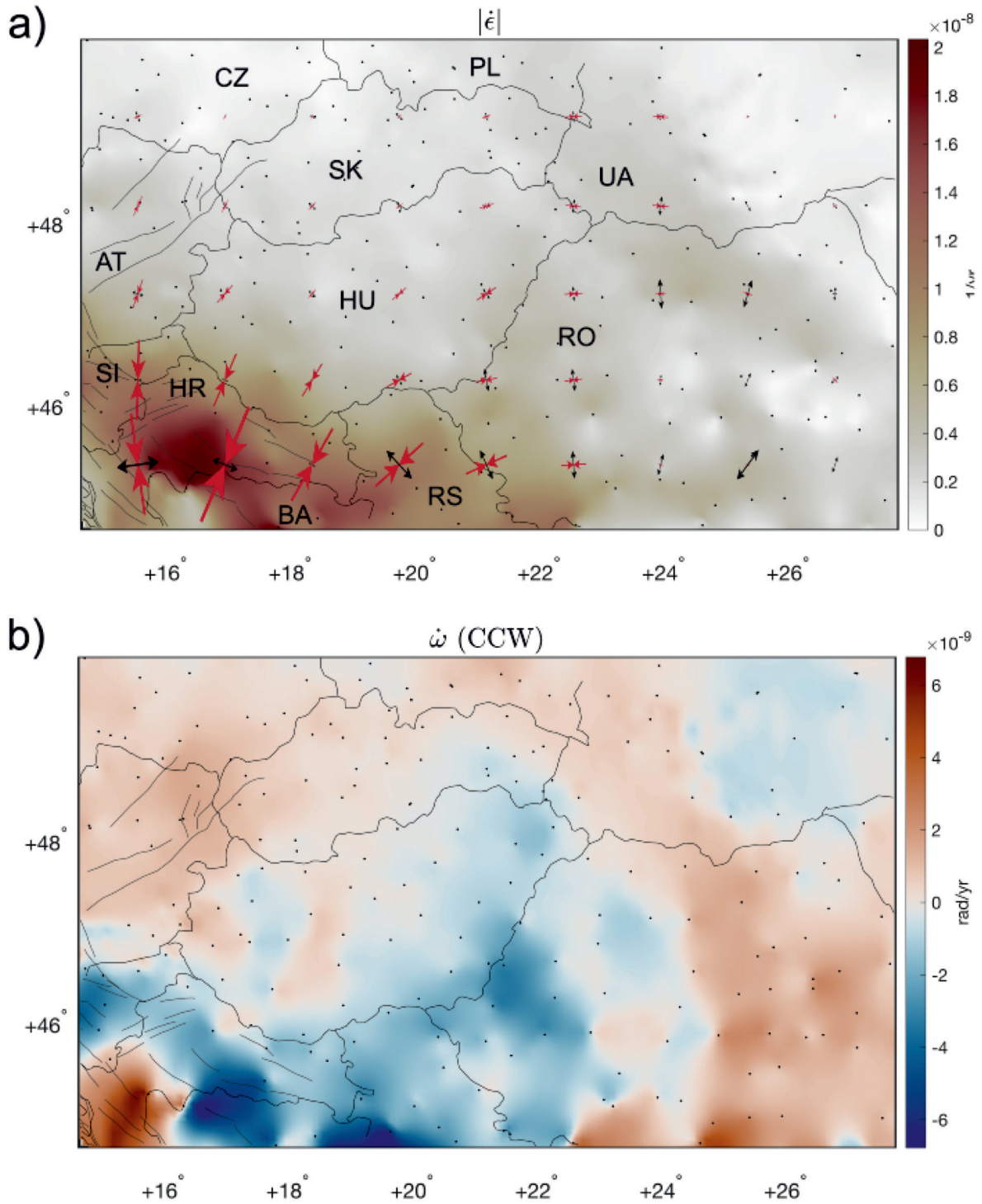
A GNSS-mérésekkel meghatározott horizontális sebességek és azok interpolációja (a stabil eurázsiai lemezhez viszonyítva) a vizsgált terület DNy-i részén (Dinaridák és annak a Pannon-medence felé való átmenete) koherens, 2–3 mm/éves, ÉÉK-i irányú mozgást, a vizsgált terület DK-i részén (Erdélyi-medence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

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



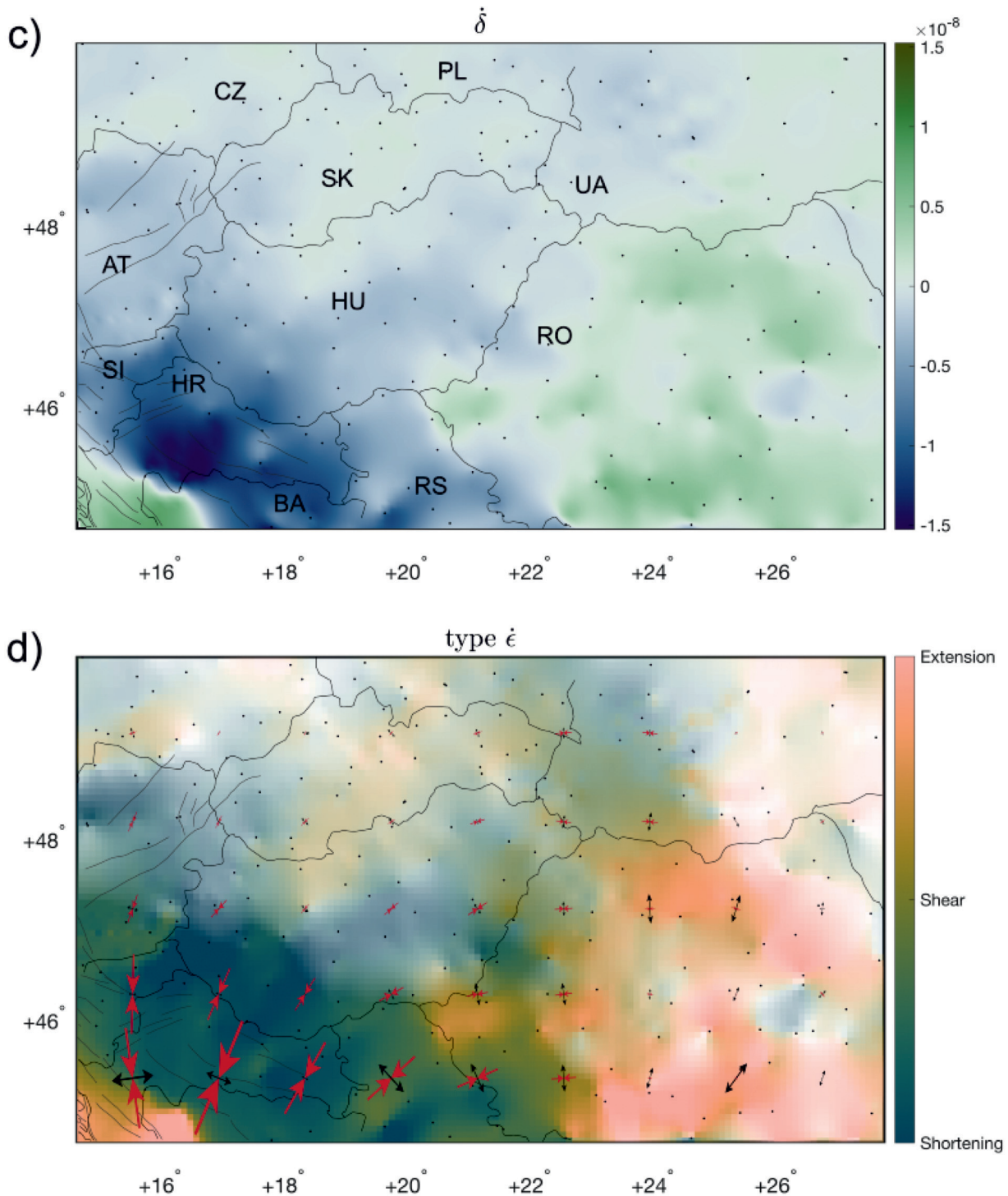
4. ábra. GNSS-mérésekkel meghatározott horizontális sebességek (kék nyilak és fekete $1-\sigma$ hibaellipszisek) és azok interpolációja (fekete nyilak és háttér) PORKOLÁB et al. (2023a) után, a stabil Euráziához viszonyítva. A sebességek nagyságát a színskála mutatja (mm/év)

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



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

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



5. ábra. Folytatás

Figure 5. Continued

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

A forgási sebességek kb. 6 és -6 nrad (nanoradián)/év között mozognak, ahol a pozitív értékek az óramutató járásával ellentétes (counterclockwise, CCW), a negatív érté-

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

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

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

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

Diszkusszió és konklúzió

A feszültség, felszíni mozgás és deformációs ráta eredményei megerősítik, valamint területileg és adatsűrűség tekintetében jelentősen kiegészítik és pontosítják a korábbi eredményeket (BADA et al. 2007a, b; GRENERCZY et al. 2005): a Pannon-térségben a transzpressziós feszültségmező és ehhez kapcsolódóan a rövidüléssel és a transzpressziós deformáció határozzák meg az aktív tektonikát. Az új deformációs ráta-adatoknak és deformációs főtengetyirányoknak köszönhetően – amelyek eddig csak lokálisan és nagyobb bizonytalansággal álltak rendelkezésre (BUS et al. 2009) – összevethetővé vált a feszültségmező és a deformációs mező összehasonlítása. Ezen új sebességinterpolációs és deformációs ráta-adatok szabadon elérhetőek (BROERSE et al. 2023). Az S_{Hmax} (kompresszió) iránya a Pannon-medencében tipikusan ÉK-DNy, ami a terület nagy részén egybeesik

a rövidüléssel deformációs ráta főtengetyirányával (BÉKÉSI et al. 2023a, PORKOLÁB et al. 2023b). A két főtengety iránya a legtöbb földtani környezetben várhatóan egybe kell, hogy essen, hiszen a kompresszió (összenyomás) iránya tipikusan megegyezik a kontrakció (rövidülés) irányával. A feszültség és deformációs ráta megfigyelései viszont nem ugyanazon térrészre vonatkoznak; a feszültségadatok a felsőkéregre, a deformációs adatok pedig a felszínre. A főtengety általános egyezése így arra utal, hogy egyrészt a feszültség- és deformációs adatrendszer összehasonlítható, másrészt a felsőkéreg feszültségmezőjét és a felszín deformációját ugyanazon erők hajtják.

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

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

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

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

„magával húzza” a teljes Égei-térséget, valamint kisebb mértékben a balkáni és az új eredmények fényében a kárpáti területeket is (MÜLLER et al. 2013, CHOUSIANITIS et al. 2015, PORKOLÁB et al. 2023a).

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

Köszönetnyilvánítás

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

Elektronikus mellékletek

BÉKÉSI, E., PORKOLÁB, K. & WÉBER, Z.: Stress field of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron.

<https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB>

PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V.: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron.

<https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC>

Irodalom – References

- ALTAMIMI, Z., COLLILIEUX, X., LEGRAND, J., GARAYT, B. & BOUCHER, C. 2007: ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **112/B9**. <https://doi.org/10.1029/2007JB004949>
- BADA, G., HORVÁTH, F., CLOETINGH, S., COBLENTZ, D. & TÓTH, T. 2001: Role of topography induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. – *Tectonics* **20/3**, 343–363. <https://doi.org/10.1029/2001TC900001>
- BADA, G., HORVÁTH, F., DÖVÉNYI, P., SZAFIÁN, P., WINDHOFFER, G. & CLOETINGH, S. 2007: Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. – *Global and Planetary Change* **58/1–4**, 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007>
- BADA, G., GRENERCZY, G., TÓTH, L., HORVÁTH, F., STEIN, S., CLOETINGH, S., WINDHOFFER, G., FODOR, L., PINTER, N. & FEJES, I. 2007: Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian Basin: Seismicity, GPS velocities, and stress transfer. – *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*, **425**, 243–262. [https://doi.org/10.1130/2007.2425\(16\)](https://doi.org/10.1130/2007.2425(16))
- BÉKÉSI, E., PORKOLÁB, K. & WÉBER, Z. 2023a: Stress field of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 309. <http://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapB>.
- BÉKÉSI, E., PORKOLÁB, K., WESZTERGOM, V. & WÉBER, Z. 2023b: Updated stress dataset of the Circum-Pannonian region: Implications for regional tectonics and geo-energy applications. – *Tectonophysics* **856**, 229860. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229860>
- BROERSE, T., KRSTEKANIĆ, N., KASBERGEN, C. & WILLINGSHOFER, E. 2021: Mapping and classifying large deformation from digital imagery: application to analogue models of lithosphere deformation. – *Geophysical Journal International* **226/2**, 984–1017. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab120>

- BROERSE, T., PORKOLÁB, K., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023: Data supplement to: Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – Doi: <https://doi.org/10.24416/UU01-YV9NWD>
- BUS, Z., GRENERCZY, G., TÓTH, L. & MÓNUS, P. 2009: Active crustal deformation in two seismogenic zones of the Pannonian region—GPS versus seismological observations. – *Tectonophysics* **474/1–2**, 343–352. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.045>
- CARAFI, M. & BARBA, S. 2013: The stress field in Europe: optimal orientations with confidence limits. – *Geophysical Journal International* **193/2**, 531–548. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt024>
- CARAFI, M., TARABUSI, G. & KASTELIC, V. 2015: SHINE: Web application for determining the horizontal stress orientation. – *Computers & geosciences* **74**, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.001>
- CHOUSIANITIS, K., GANAS, A. & EVANGELIDIS, C. P. 2015: Strain and rotation rate patterns of mainland Greece from continuous GPS data and comparison between seismic and geodetic moment release. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **120/5**, 3909–3931. <https://doi.org/10.1002/2014JB011762>
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVÁTH, E., RUSZKICZAY-RÜDIGER, Z., PALOTÁS, K., SÍKHEGYI, F., TIMÁR, G., CLOETINGH, S. & HORVÁTH, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. – *Tectonophysics* **410/1–4**, 15–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.06.008>
- GRENERCZY, G., SELLA, G., STEIN, S. & KENYERES, A. 2005: Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. – *Geophysical Research Letters* **32/16**. <https://doi.org/10.1029/2005GL022947>
- HEIDBACH, O., RAJABI, M., REITER, K., ZIEGLER, M. & TEAM, W. 2016: World stress map database release 2016. – *GFZ Data Services* **10**, 1. <https://doi.org/10.5880/WSM.2016.002>
- HORVÁTH, F. 1993: Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. — *Tectonophysics* **226/1–4**, 333–357. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90126-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90126-5)
- HORVÁTH, F. & CLOETINGH, S. 1996: Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. – *Tectonophysics* **266/1–4**, 287–300. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00194-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00194-1)
- KENYERES, A., BELLET, J., BRUYNINX, C., CAPORALI, A., DE DONCKER, F., DROSCAK, B., DURET, A., FRANKE, P., GEORGIEV, I. & BINGLEY, R. 2019: Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. – *GPS Solutions* **23**, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
- KOROKNAI, B., WÓRUM, G., TOTH, T., KOROKNAI, ZS., FEKETE-NÉMETH, V. & KOVÁCS, G. 2020: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. – *Earth-Science Reviews* **211**, 103411. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103411>
- KOROKNAI, B., BÉKÉSI, E., BONDÁR, I., CZECZE, B., GYÓRI, E., KOVÁCS, G., PORKOLÁB, K., TÓTH, T., WESZTERGOM, V., WÉBER, Z. & WÓRUM, G. 2023: Seismotectonic map of Hungary, Geomega Ltd., Budapest. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 353. <http://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapD>
- KREEMER, C., BLEWITT, G. & KLEIN, E. C. 2014: A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **15/10**, 3849–3889. <https://doi.org/10.1002/2014GC005407>
- MACHUCA-MORY, D. F. & DEUTSCH, C. V. 2013: Non-stationary geostatistical modeling based on distance weighted statistics and distributions. — *Mathematical Geosciences* **45**, 31–48. <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9428-z>
- MÜLLER, M., GEIGER, A., KAHLE, H.-G., VEIS, G., BILLIRIS, H., PARADISSIS, D. & FELEKIS, S. 2013: Velocity and deformation fields in the North Aegean domain, Greece, and implications for fault kinematics, derived from GPS data 1993–2009. – *Tectonophysics* **597**, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.003>
- PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023a: Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. – *Acta Geodaetica et Geophysica*, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s40328-023-00409-8>
- PORKOLÁB, K., BROERSE, T., KENYERES, A., BÉKÉSI, E., TÓTH, S., MAGYAR, B. & WESZTERGOM, V. 2023b: GNSS-based strain rate pattern of the Pannonian region. Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 311. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapC>
- VRABEC, M. & FODOR, L. 2006: Late Cenozoic tectonics of Slovenia: structural styles at the Northeastern corner of the Adriatic microplate. – *The Adria microplate: GPS geodesy, tectonics and hazards*. Springer, 151–168. https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_10
- WACKERNAGEL, H. 2003: *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. – Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5>
- WÉBER, Z. 2009: Estimating source time function and moment tensor from moment tensor rate functions by constrained L_1 norm minimization. — *Geophysical Journal International* **178/2**, 889–900. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04202.x>
- WÉBER, Z. 2016a: Source parameters for the 2013–2015 earthquake sequence in Nógrád county, Hungary. – *Journal of Seismology* **20**, 987–999. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9576-6>
- WÉBER, Z. 2016b: Probabilistic waveform inversion for 22 earthquake moment tensors in Hungary: new constraints on the tectonic stress pattern inside the Pannonian basin. – *Geophysical Journal International* **204/1**, 236–249. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv446>
- WÉBER, Z. 2018: Probabilistic joint inversion of waveforms and polarity data for double-couple focal mechanisms of local earthquakes. – *Geophysical Journal International* **213/3**, 1586–1598. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy096>
- WÉBER, Z. & SÜLE, B. 2014: Source properties of the 29 January 2011 ML 4.5 Oroszlány (Hungary) mainshock and its aftershocks. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **104/1**, 113–127. <https://doi.org/10.1785/0120130152>
- WÉBER, Z., CZECZE, B., SÜLE, B., BONDÁR, I. & GROUP, A. W. 2020: Source analysis of the March 7, 2019 ML=4.0 Somogyszob, Hungary earthquake sequence. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **55/3**, 371–387. <https://doi.org/10.1007/s40328-020-00311-7>

Kézirat beérkezett: 2023. 09. 06.