

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

CZECZE Barbara<sup>1,2</sup>, GYÓRI Erzsébet<sup>1</sup>, TIMKÓ Máté<sup>1,2</sup>, KISZELY Márta<sup>1</sup>, SÜLE Bálint<sup>1</sup>, WÉBER Zoltán<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, Budapest

<sup>2</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

---

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

#### Abstract

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

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

---

#### Összefoglalás

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

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

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

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

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

## Bevezetés és előzmények

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

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

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

A XX. század elejéig csak korabeli beszámolók alapján tudtunk információkat szerezni a földrendések helyéről, idejéről és erősségéről. Az első szeizmológiai műszerek, amelyek képesek voltak regisztrálni a talajmozgást, a XIX. század végén jelentek meg. Magyarországon az első szeizmográfot 1902-ben üzemelték be Budapesten, a Földtani Intézet pincéjében, majd 1905-ben Kövesligethy Radó megalapította a Budapesti Földrendési Observatóriumot. Ekkor az országban összesen öt helyen voltak analóg szeizmográfok (Budapest, Fiume, Ógyalla, Temesvár, Zágráb). Az I. világháború kitörésekor 10 állomás volt az országban, de a békeszerződés után csak négy maradt a jelenlegi határon belül. Ezek száma a 90-es évek elejéig sem változott

számottevően, és volt olyan időszak, amikor mindössze egy állomás működött. A digitális korban az állomások száma fokozatosan növekedett, és minőségük is jelentősen javult.

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

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

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

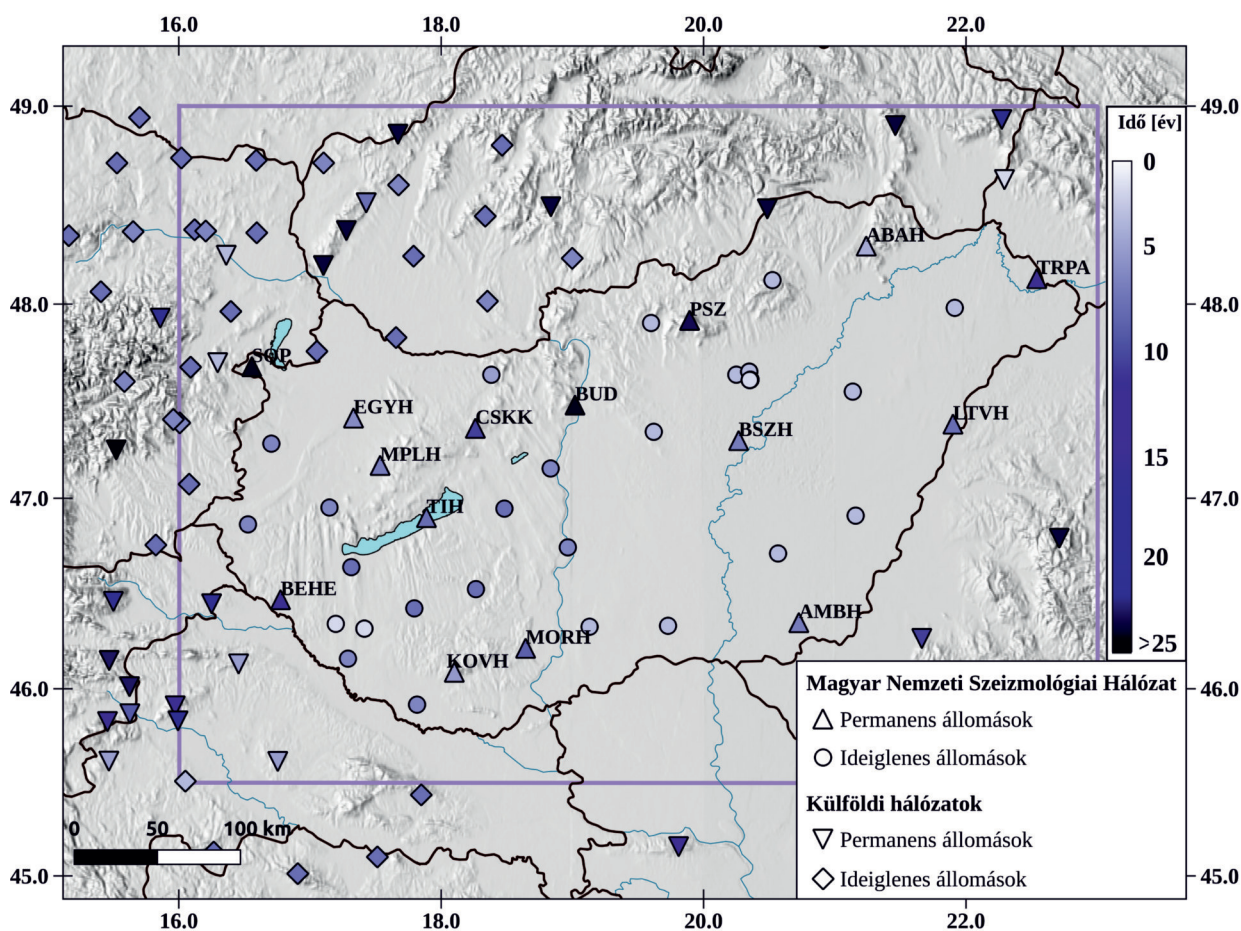
Az ország szeizmotektonikai térképének megalkotásához elegendő a HNSB által lehatárolt terület földregéinek a vizsgálata, mely Magyarországot teljes egészében lefedi. Azonban az országhatáron túli nagyobb földregések is veszélyt jelenthetnek hazánkra, ezért a későbbi veszélyeztetettségi számításokhoz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

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

## A hazai digitális katalógus eseményeinek felülvizsgálata

### Állomások

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



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

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

nagyban hozzájárul a helymeghatározási hibák csökkenéséhez.

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

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

### Helymeghatározások

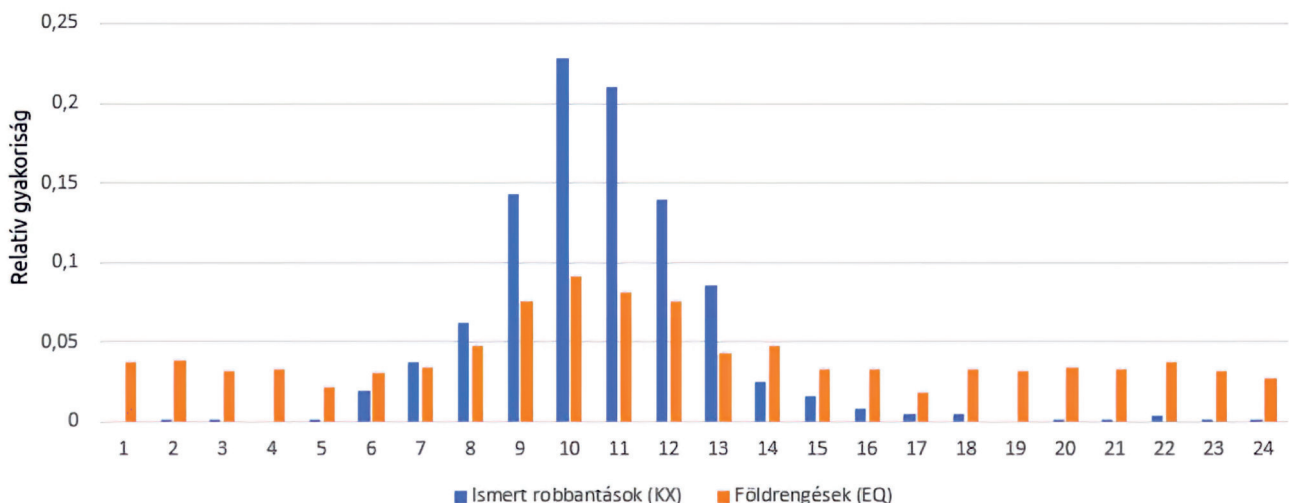
1995-től 2014-ig a helymeghatározás a Hypo71 (LEE & LAHR 1972) program segítségével történt. 2015-ben áttértünk az iLoc helymeghatározó szoftver alkalmazására, és megtörtént a korábbi események egységes újrafeldolgozása is (BONDÁR et al. 2018).

Az iLoc abszolút helymeghatározó algoritmus (BONDÁR & McLAUGHLIN 2009a, BONDÁR & STORCHAK 2011) az ISC (International Seismological Center) lokátorának továbbfejlesztett változata. A helymeghatározáshoz sebességmodellre van szükség, amely leírja, hogy a különböző hullámfázisok milyen sebességgel haladnak át a megtett úton. A gyorsaság érdekében ezek általában egydimenziós, radiálisan szimmet-

rikus modellek, vagyis a sebesség kizárólag a mélység függvénye. Mivel BONDÁR et al. (2018) tanulmánya jól demonstrálja, hogy hazánk területén az elérhető sebességmodellek közül a 3D-s RSTT (MYERS et al. 2010) sebességmodellel érhetőek el a legpontosabb eredmények, a helymeghatározásokat minden esetben ezzel végeztük el. A 3D-s sebességmodell nemcsak a függőleges, hanem a kelet-nyugati és északi-déli irányú változásokat is leírja (az RSTT 3D modell esetében  $1 \times 1$  fokos rácsháló mentén), így a modellezett sebességstruktúra jóval pontosabban közelíti a valóságot. A hazai digitális katalógus 1996 és 2021 között ösz-szesen 9586 db földregést tartalmaz a  $45,5^\circ$ – $49^\circ$ É és  $16^\circ$ – $23^\circ$ K által határolt területen belül. Ezek hipocentrumait ismételtelen meghatároztuk, jelentősen csökkentve a helymeghatározási hibákat. Az eredeti adatbázis nem mindig tartalmazta az összes releváns kimérést, ezért számos esetben az ISC nyilvános adatbázisát is felhasználtuk, valamint a helymeghatározásokat a hazai és nemzetközi adatok összefésülése után végeztük el. Minden olyan eseményt elvetettünk, ahol a másodlagos azimutális nyílás nagy, így a helymeghatározás nagyon bizonytalan volt. Általánosságban elmondható, hogy az újraértékelt földregések többsége kedvező állomásgeometriával rendelkezik.

### Robbantások elkülönítése

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



2. ábra. Ismert robbantások és a természetes eredetüként nyilvántartott szeizmikus események napszakon belüli eloszlása az átdolgozás előtti katalógusban  
Figure 2. Diurnal distribution of documented explosions and seismic events classified as naturally occurring in the pre-revised catalog

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

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

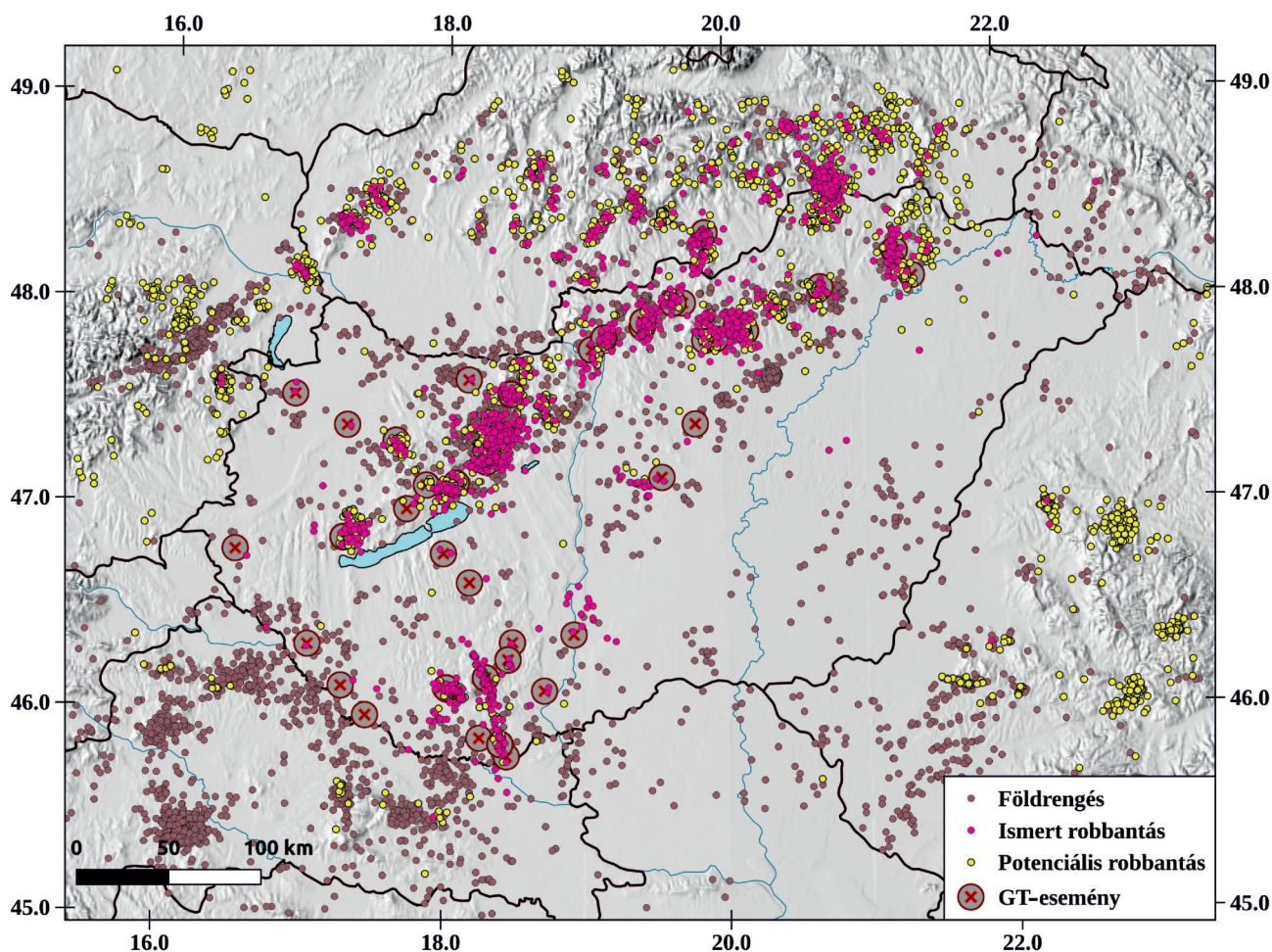
Az antropogén események meghatározására hatékony módszer a hullámforma-korrelációra épülő klaszterezés, amely lehetővé teszi az egymáshoz hasonló hullámformájú események csoportosítását a korrelációs koefficiensük alapján. A módszer felhasználásával számos bánya robbantásait sikerült kiszűrni az adatbázisból.

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

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

### *Klaszteranalízis, többeseményes helymeghatározások*

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



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

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

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

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

#### A felülvizsgálat eredményei

A felülvizsgált hazai digitális katalógusban található természetes eredetű földrendések epicentrumait a 4. ábra térképe mutatja. Kis méretarányú szeizmicitástérképek összehasonlításával nehezen látható lényegi különbség, ezért az átdolgozás előtti és az átdolgozott katalógus közötti különbséget néhány részterületen mutatjuk be (5a, b, c, d ábrák).

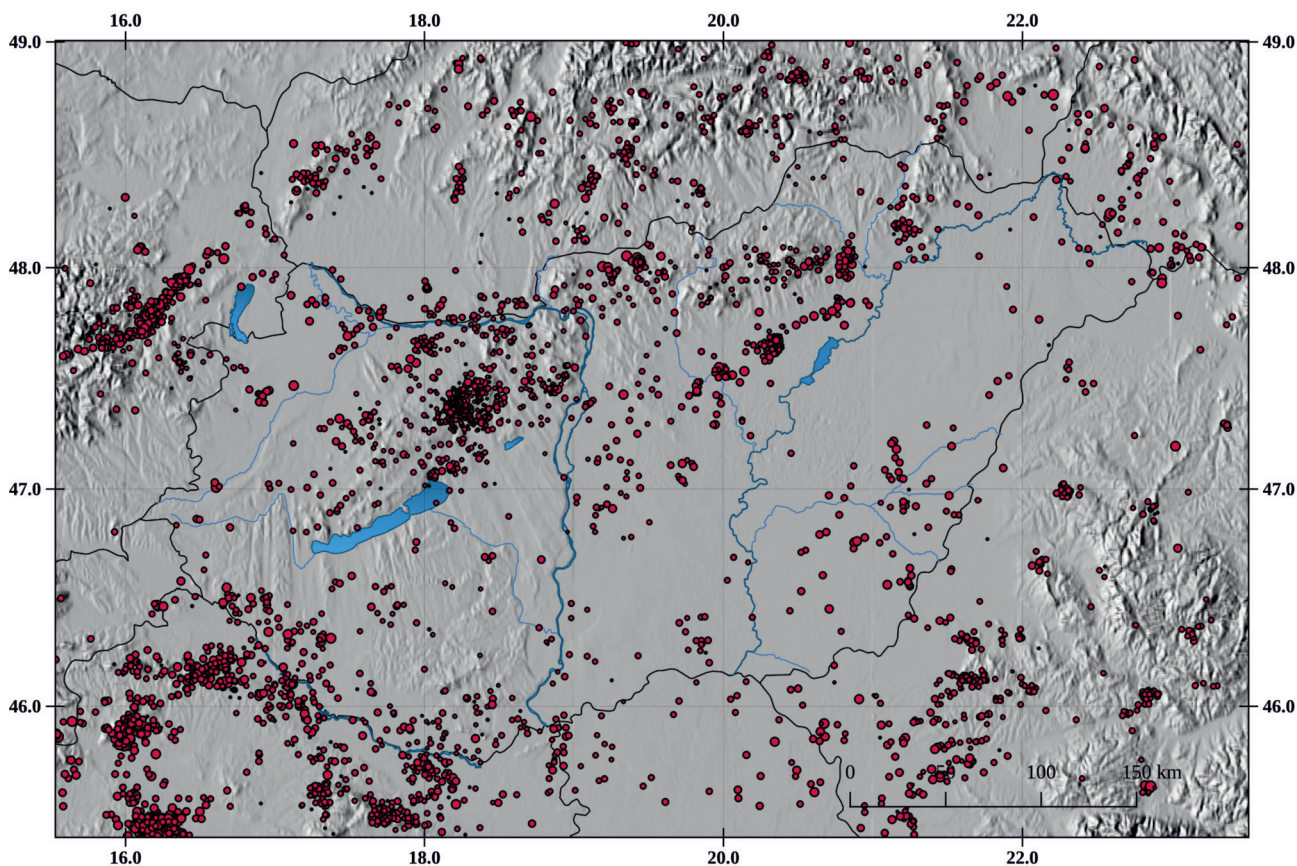
A felülvizsgált adatbázis tartalmazza a korábban sikeresen feldolgozott területeket is (BÉKÉSI et al. 2017, CZECZE et al. 2018, CZECZE & BONDÁR 2019, WÉBER et al. 2020)

Az 5a ábrán hazánk egyik legaktívabb területe látható, ahol az oroslányi földrendés és utórendései, valamint a gánti kőbánya robbantásai keverednek egymással. Míg az eredeti katalógusban nagy keveredés volt jellemző, addig az új katalógus eseményei klasztereződtek, köszönhetően a helymeghatározások pontosításának és a nagy mennyiségű antropogén esemény eltávolításának.

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

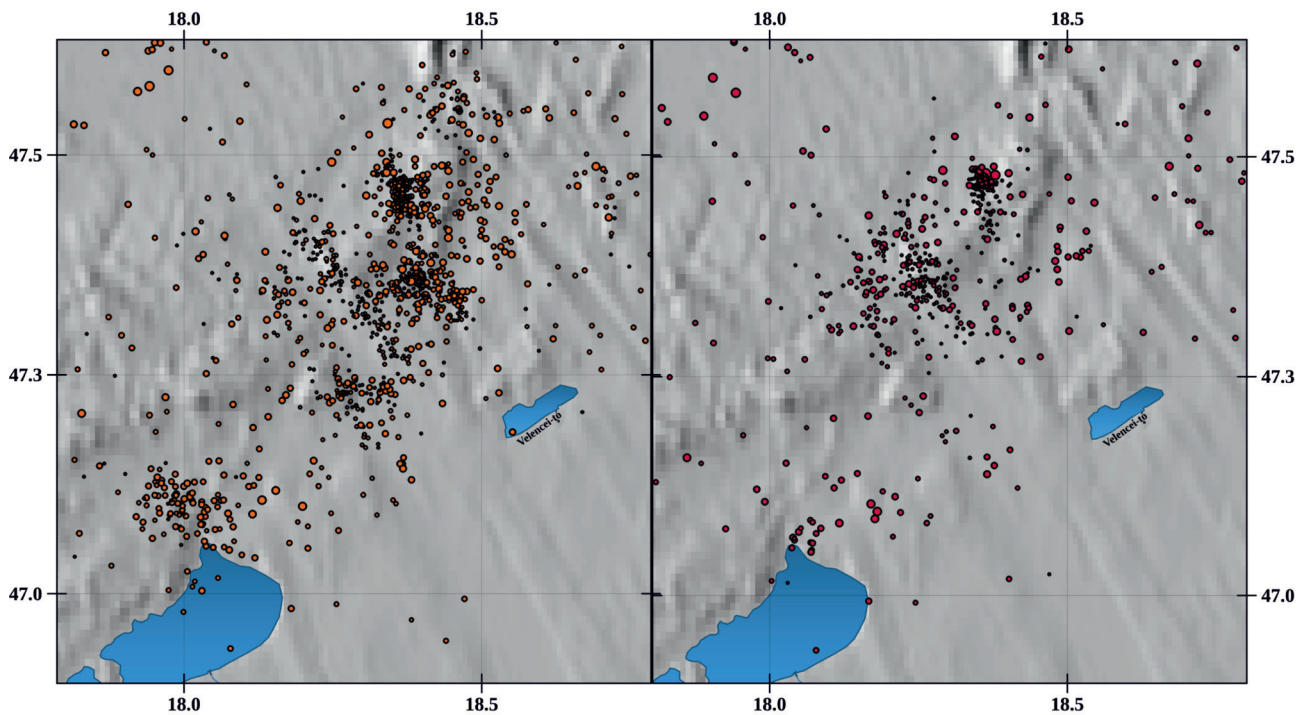
Ugyanez figyelhető meg az 5c ábrán is, mely a magyar–szlovák határ közelében található bányaterület Hidvérgárdótól mindössze 2,5 km-re. A bánya jelentős eseményklasztert generált az eredeti katalógusban (földrendésként nyilvántartva), az átdolgozott katalógus viszont jelentős szűrésen ment keresztül.

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



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

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

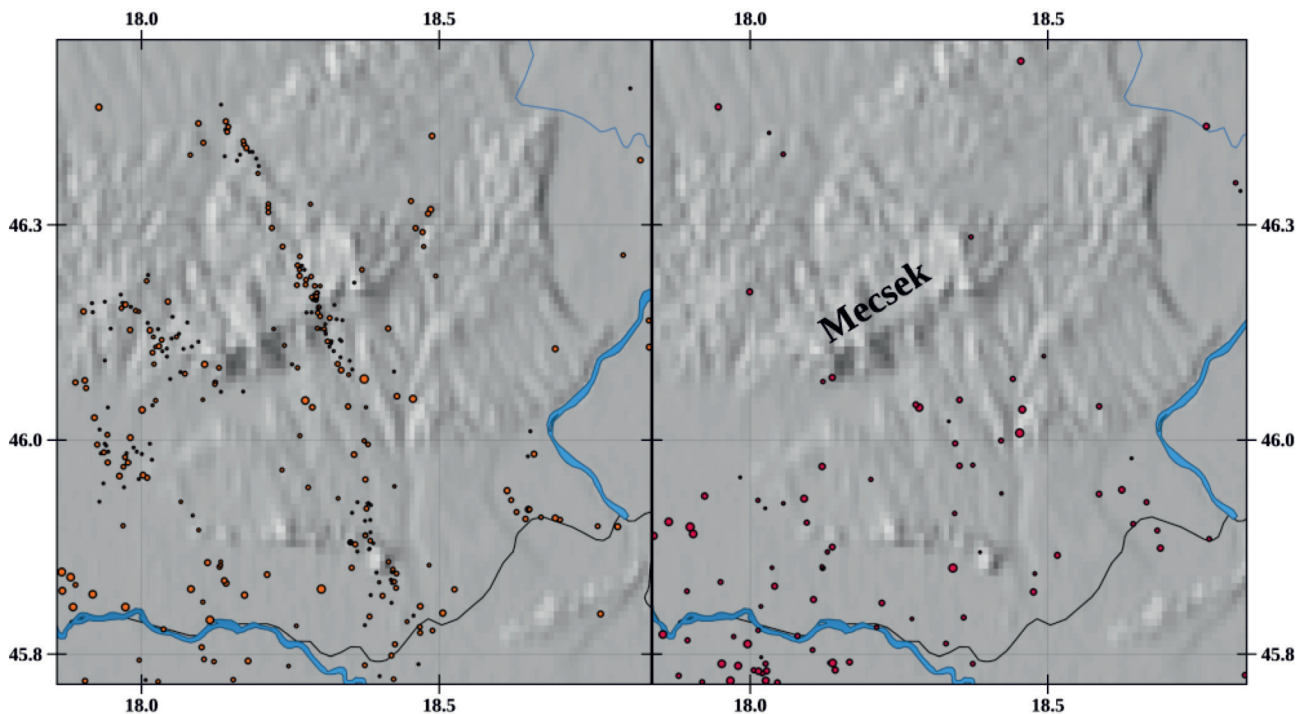


5a ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) a Vértesszőlős környékén  
 Figure 5a. The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) in the vicinity of the Vértesszőlős Hills

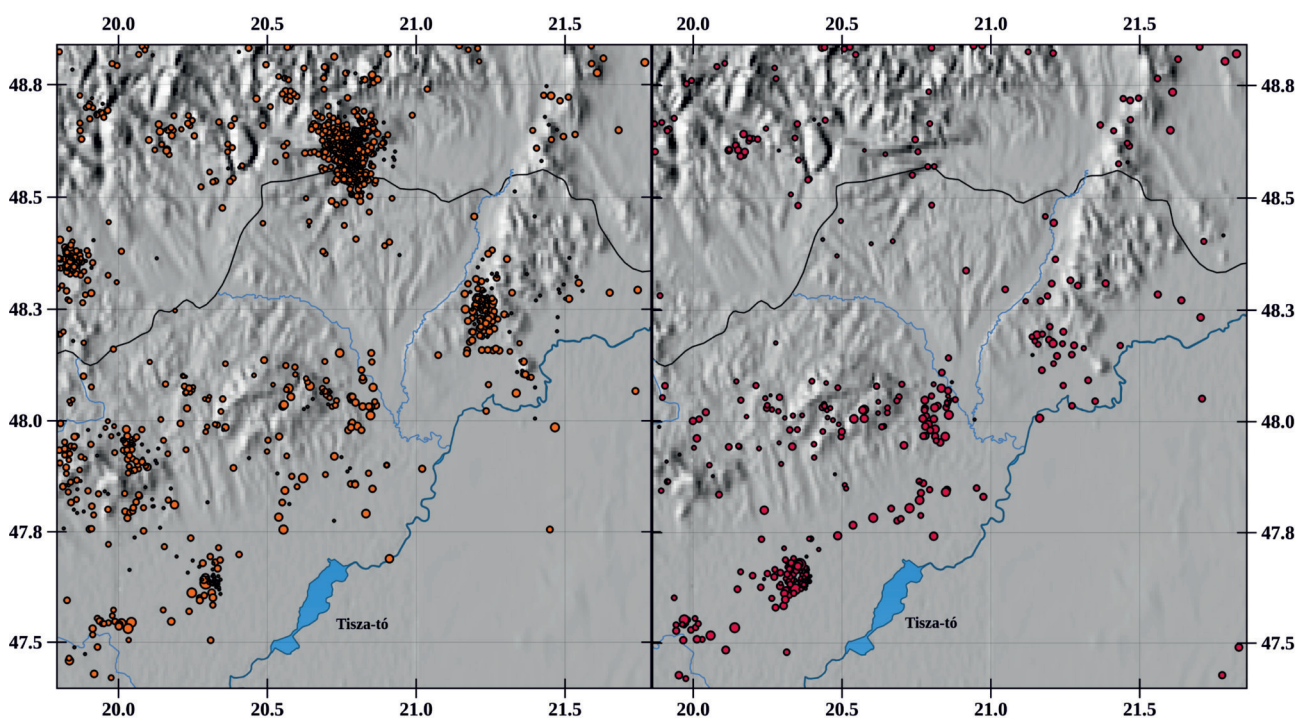
földrengés hipocentrumát sikerült megfelelő pontossággal meghatározni. Így jelentősen több esemény áll rendelkezésünkre a területről, és a Bécsi-medencén is áthúzódó Mur–Mürz vonalról is részletesebb képet kaptunk.

Magyarországon és közvetlen környezetében általában a sekély fészkelő földrengések jellemzők, melyek leggyakrab-

ban a 6–10 km közötti mélységtartományban keletkeznek, ahogy a 6. ábra eloszlása is mutatja. Amennyiben – pl. az éppen aktuális állomásgeometria miatt (1. ábra) – nem áll rendelkezésre elegendő mélységfázis a megbízható mélységmeghatározáshoz, a mélység nem szabad paraméter, így manuális rögzítése szükséges. Ekkor próbaként a leggyak-



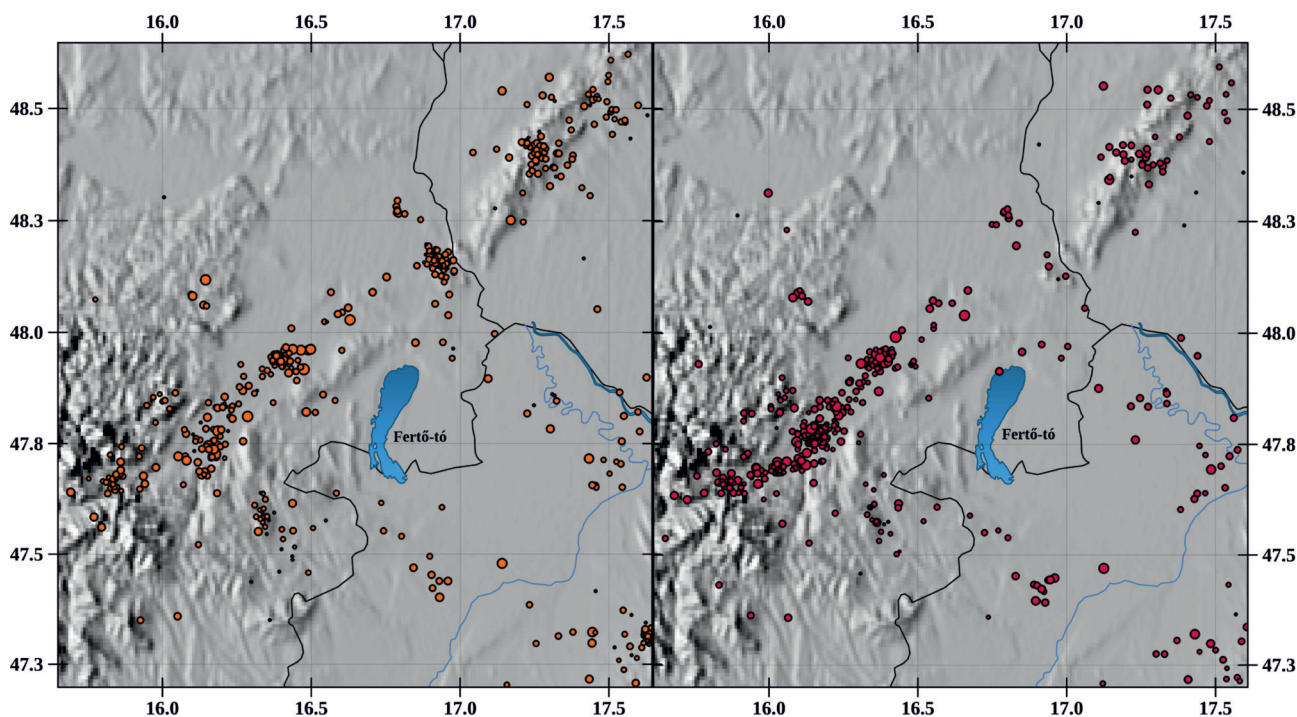
5b ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) Magyarország és Horvátország határán  
 Figure 5b. The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) at the border of Hungary and Croatia



5c ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) Észak-Magyarországon  
 Figure 5c. The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) in Northern Hungary

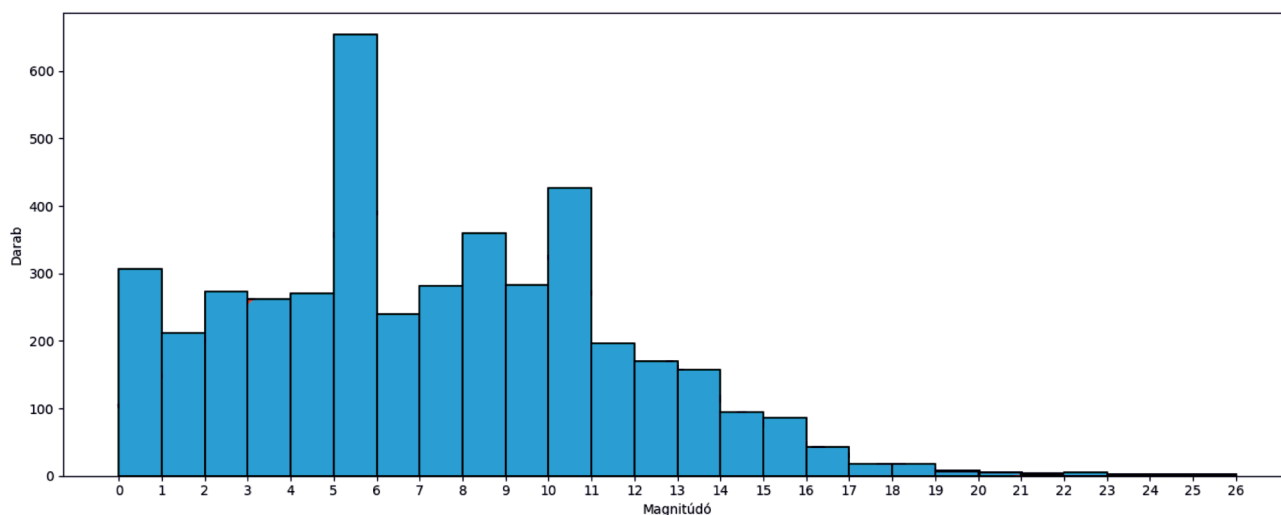
rabban előforduló mélységekben kerülnek rögzítésre az események, majd a legkisebb hibát eredményező megoldás preferált megoldásként kerül a katalógusba. Az 5 és 10 km-es mélységű kiugró értékek ezeket a rögzített mélységeket jelzik.

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



5d ábra. Az átdolgozás előtti, eredeti (Hypo71, SeisComp) katalógus és az átdolgozott, teljes katalógus (iLoc, hypoDD, ISC) a Bécsi-medence környékén  
 Figure 5d. The original pre-revision (Hypo71, SeisComp) catalog, and the comprehensive revised catalog (iLoc, hypoDD, ISC) in the vicinity of the Vienna Basin





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

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

### A Kárpát-Pannon régió teljes, kombinált földrengés-katalógusa

#### *A felhasznált adatok forrásai, a katalógus előállítása*

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

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

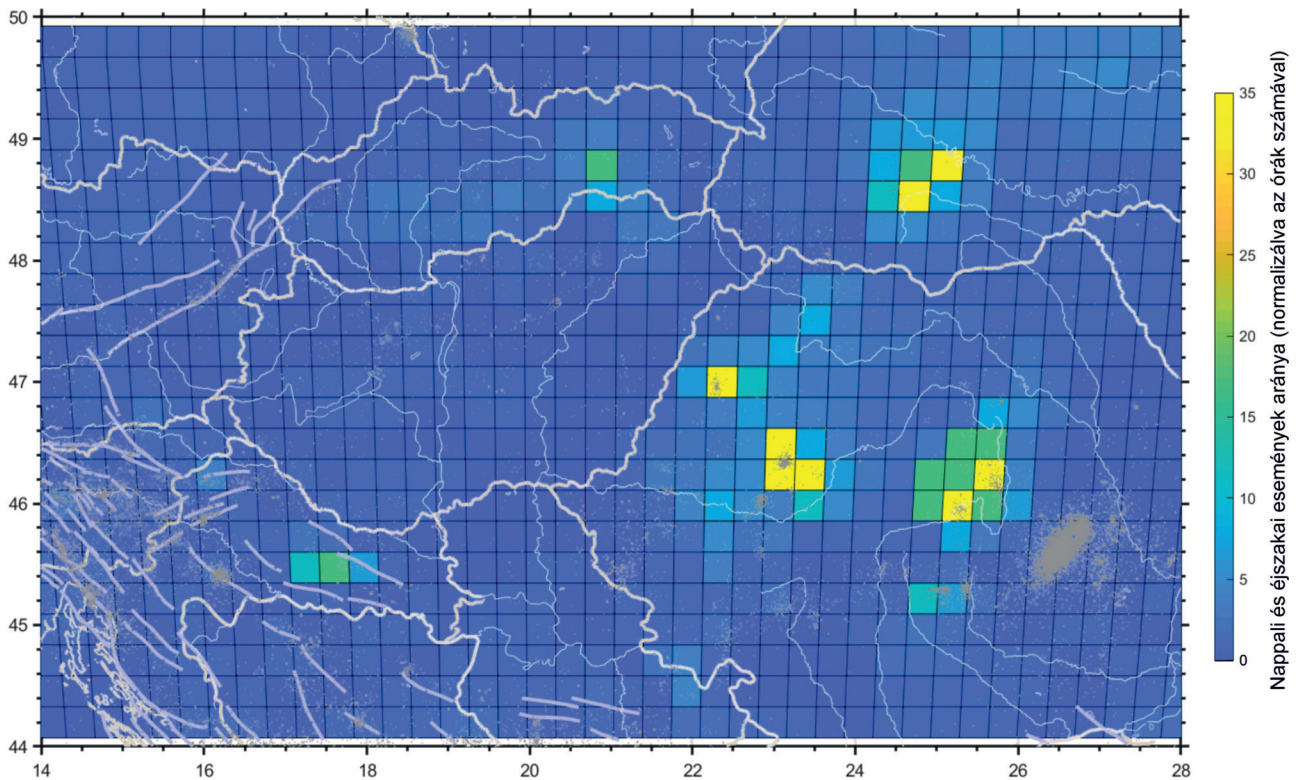
2011-ben az ISC új, továbbfejlesztett hipocentrum- és magnitúdómeghatározási eljárásra tért át (BONDÁR & STORCHAK 2011). Az új eljárással az 1964 és 2010 közötti időszak-

ra teljesen újraszámolták a rengések fészekparamétereit (STORCHAK et al. 2017, 2020), így a kezdeti (Zsírós 2014) katalógus egyes eseményeihez tartozó paramétereket felülírtuk a felülvizsgált ISC-katalógusban található paraméterekkel.

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

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

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



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

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

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

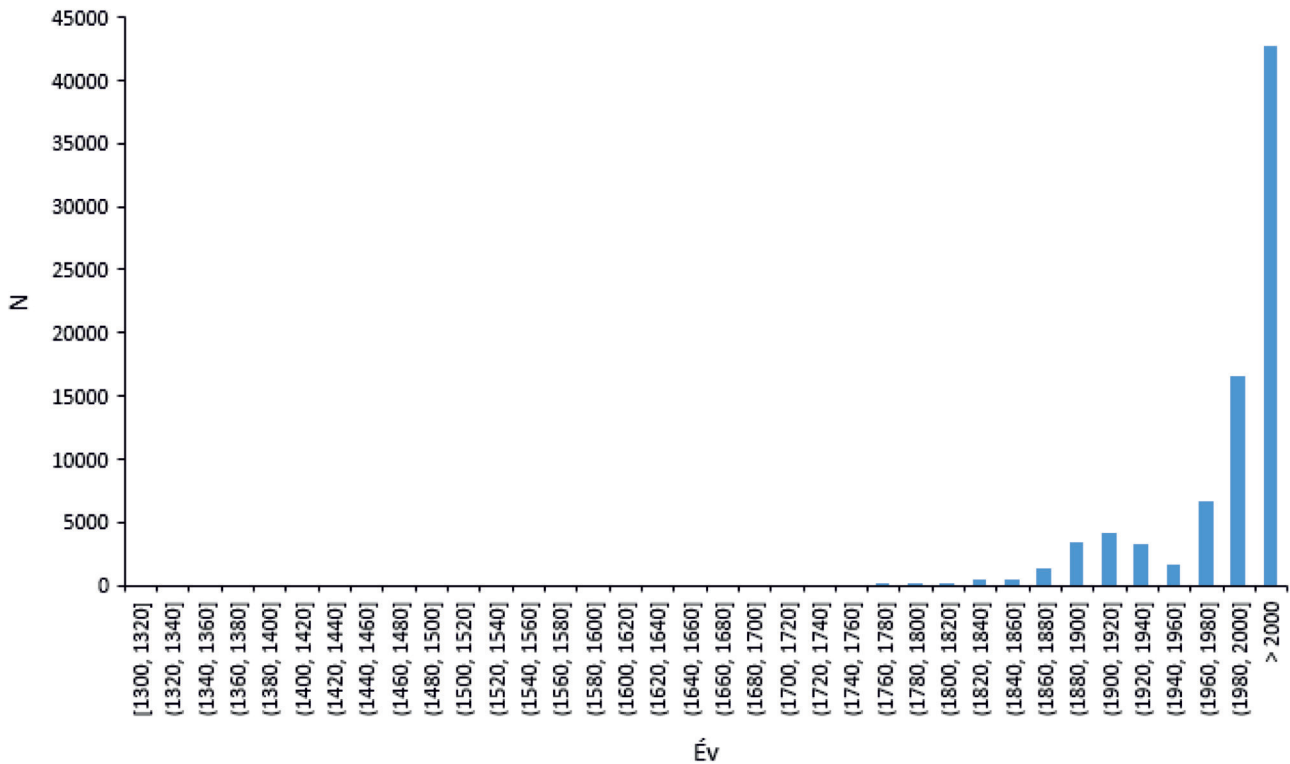
A földregés-veszélyeztetettség számításokhoz a momentummagnitúdók ismerete szükséges. Ezért az adatbázist kiegészítettük a saját spektrális számításainkból, félszekmechanizmus-megoldásainkból származó és a szakirodalomban megjelent momentummagnitúdókkal (SÜLE & WÉBER 2013; WÉBER et al. 2020, 2023). Így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

### A szeizmicitás jellemzői a teljes, kombinált katalógus alapján

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

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

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



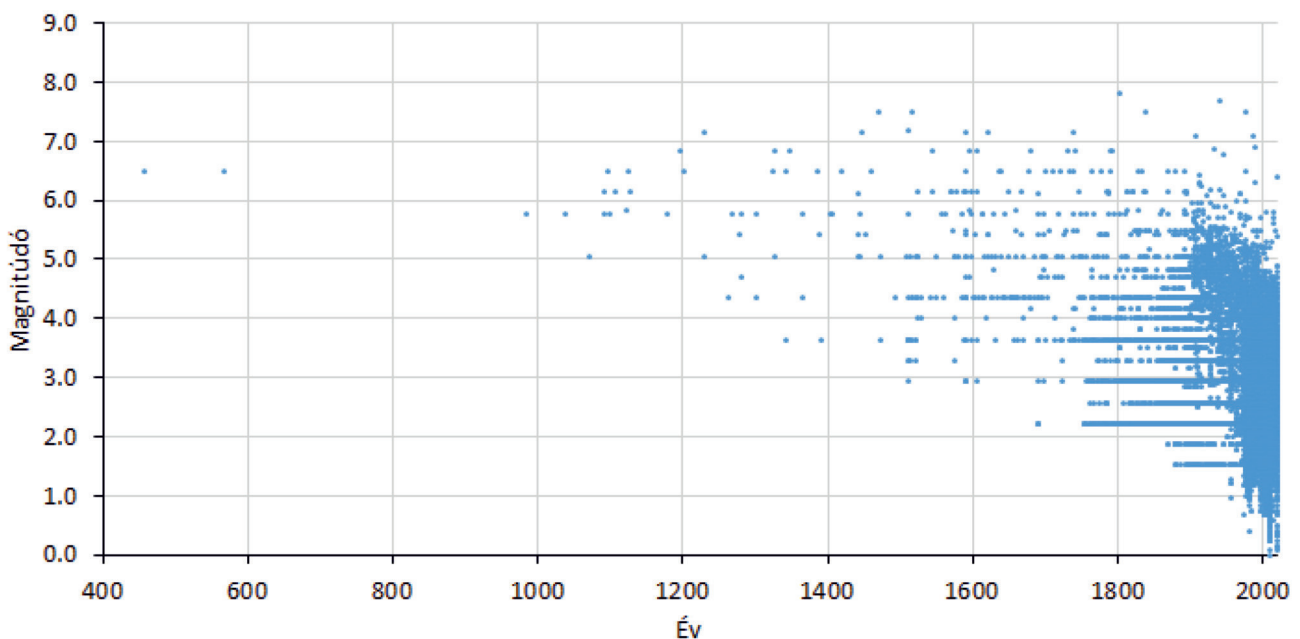
8. ábra. A teljes, kombinált katalógusban található események számának növekedése az idővel

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

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

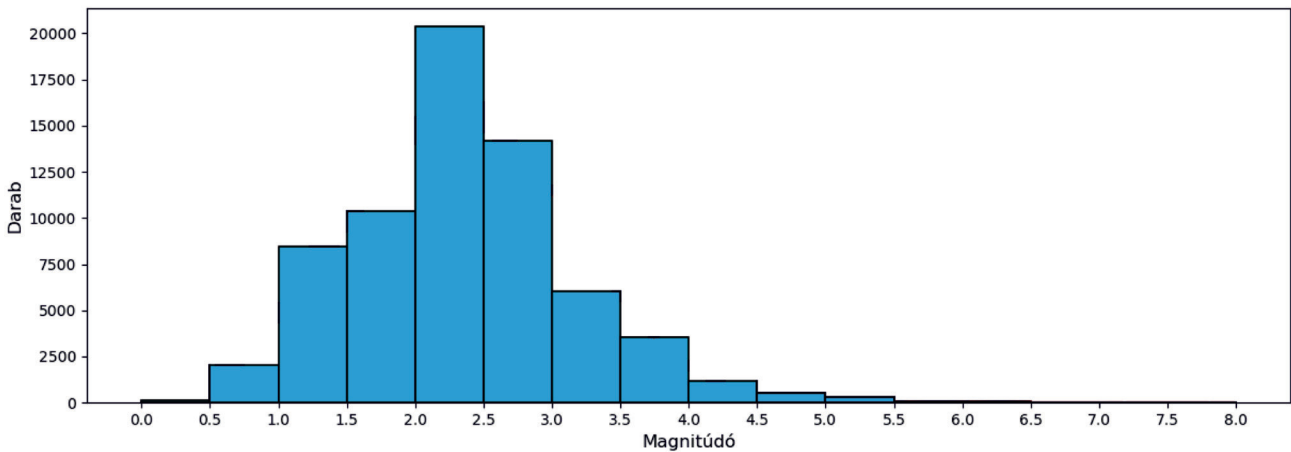
Ha ábrázoljuk az 1 rögzített magnitúdónál erősebb föld-

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



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

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



10. ábra. A teljes, kombinált katalógusra jellemző magnitúdóeloszlás

Figure 10. Magnitude distribution characteristic of the entire combined catalog

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

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

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

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

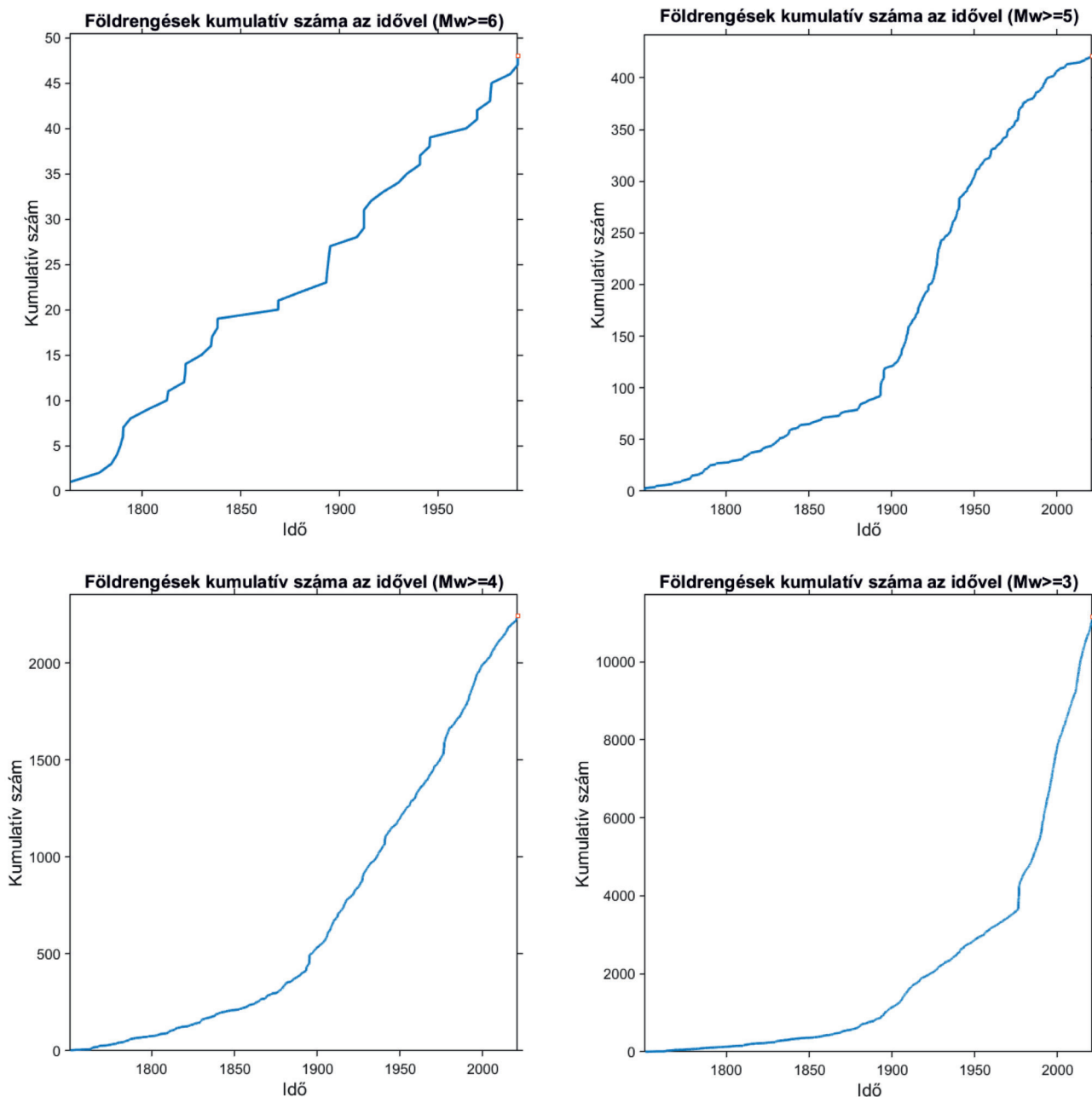
A fészekmélységek sok historikus rengés esetében egyáltalán nem határozhatók meg, másoknál pedig csak akkor, ha nagyobb számú intenzitásadat áll rendelkezésre, de akkor is csak nagy bizonytalansággal. A jelenlegi műszerek és számítási módszerek már egyre biztosabb mélységeket szolgáltatnak, így a katalógusban található események közel 60%-ának van mélységadata. A mélységeloszlás a teljes régióra a 12. ábrán, míg a Bulletin területére a 6. ábrán látható. A Kárpát-Pannon régióban kipattanó események mélysége

változó, de több jellemző mélységtartomány is felismerhető. Míg a Pannon-medence területén főleg sekély fészki rengések pattannak ki a kéreg felsőbb részében (5–15 km), addig néhány területen kifejezetten mély fészki rengések is előfordulnak – a Vrancea-zónában akár 150 km mély események is kipattanhatnak (ISMAEL-ZADEH et al. 2012, ENESCU et al. 2023).

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

## Következtetések

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



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

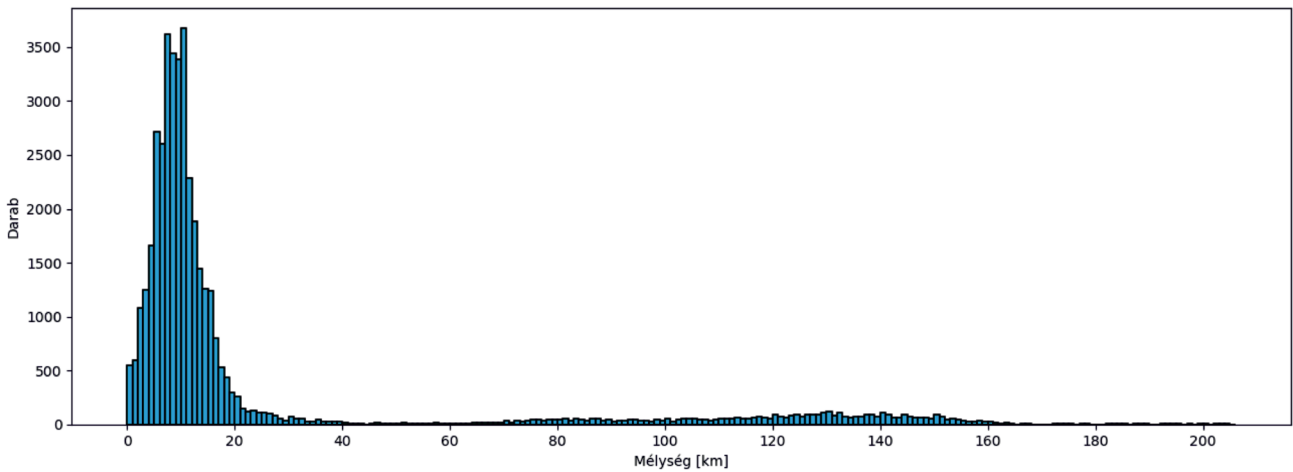
Figure 11. Summarized cumulative number of earthquakes in the complete catalog over time considering a) events with magnitude 6 and greater, b) events with magnitude 5 and greater, c) events with magnitude 4 and greater, and d) events with magnitude greater than 3

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

A kutatás során többféle módszerrel próbáltuk eltávolítani a katalógust szennyező antropogén eseményeket, eze-

ken belül főként a bányarobbantásokat. Magyarország területén ez nagyrészt sikerült, némi szennyezettség, vagyis földrengésnek vélt robbantás a Zempléni-hegységben és a magyar–szlovák határ közelében maradt, melyeket nem tudunk egyértelmű szabályok alapján kiszűrni az adatbázisból. A statisztikai vizsgálatok alapján erősebben szennyezett területeket az országhatáron kívül találtunk. Ezeket a területeket a bizonytalanságokat fontos figyelembe venni, hogy ne vezessenek téves szeizmotektonikai értelmezéshez az ott látható epicentrumok.

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



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

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

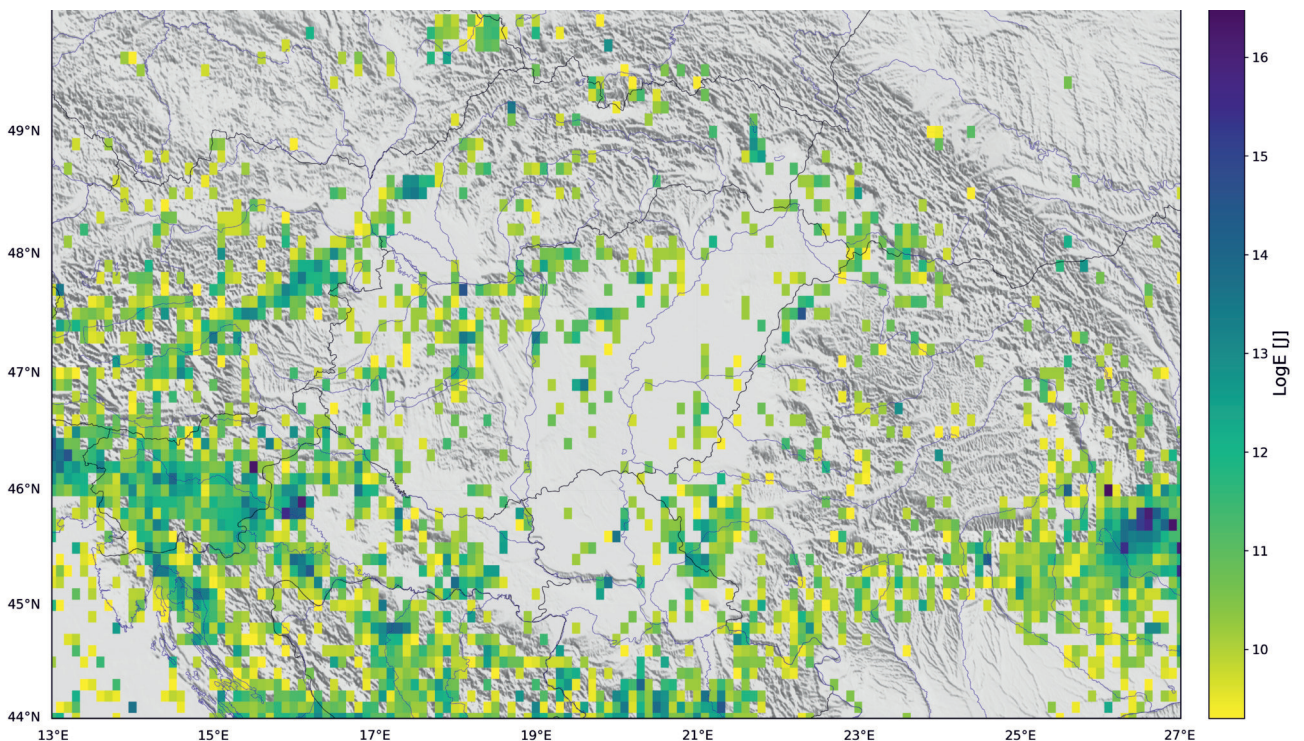
tűdójú események megfigyelése is lehetségessé vált. Egyes területeken már a nagyon kicsi, nullához közeli magnitűdűjű rengések detektálása is lehetséges, amelyek ugyan nem jelentenek veszélyt, de segítenek az egyes fókuszpontok aktivitásának megítélésében.

Vizsgáltuk a katalógus teljességét a teljes Kárpát-Pannon régióra és a Magyarországot magában foglaló kisebb, Bulletin-területre egyaránt, és meghatároztuk a földrengek előfordulási gyakoriságát leíró Gutenberg–Richter-egyenletet. Az egyenlet alapján a Kárpát-Pannon régióban ( $44^{\circ}$ – $50^{\circ}$ E;  $13^{\circ}$ – $28^{\circ}$ K) 5-ösnél nagyobb magnitűdűjű föld-

rengés évente átlagosan 2, míg 6-nál nagyobb 5 évente, 7-nél nagyobb pedig 54 évente fordul elő.

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

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



13. ábra. A földrengek során felszabadult, összegzett energia logaritmusja Joule-ban. A számítás az 1750 után kipattant,  $M_w \geq 3$  magnitűdűjű földrengek felhasználásával történt

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

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

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

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

## Köszönetnyilvánítás

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

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

## Elektronikus melléklet

GYÓRI, Erzsébet, CZECE, Barbara, TIMKÓ, Máté, BONDÁR, István, CZANIK, Csenge, CZIFRA, Tibor, FODOR, Csilla, GRÁCZER, Zoltán, GRIBOVSKAI, Katalin, GYARMATI, Anett, KALMÁR, Dániel, KISZELY, Márta, KOVÁCS, István János, MÓNUS, Péter, SÜLE, Bálint, SZANYI, Gyöngyvér, TÓTH, László, VARGA, Péter, ZSÍROS, Tibor, WÉBER, Zoltán: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020) (M>2). <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA>

## Irodalom – References

- BÉKÉSI, E., SÜLE, B., LENKEY, L., LENKEY-BÖGÉR, Á. & BONDÁR, I. 2017: Double-difference relocation of the 29 January 2011 ML 4.5 Oroszlány earthquake and its aftershocks and its relevance to the rheology of the lithosphere and geothermal prospectivity. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **52**, 229–242 <https://doi.org/10.1007/s40328-017-0195-7>
- BONDÁR, I. & STORCHAK, D. 2011: Improved location procedures at the International Seismological Centre. – *Geophysical Journal International* **186**, 1220–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x>
- BONDÁR, I. & McLAUGHLIN, K. 2009a: A new ground truth data set for seismic studies. *Seismological Research Letters* **80/3**, 465–472. <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.3.465>
- BONDÁR, I. & McLAUGHLIN, K. 2009b: Seismic location bias and uncertainty in the presence of correlated and non-Gaussian travel-time errors. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **99/1**, 172–193. <https://doi.org/10.1785/0120080922>
- BONDÁR, I., MÓNUS, P., CZANIK, Cs., KISZELY, M., GRÁCZER, Z., WÉBER, Z. & THE ALPARRAY WORKING GROUP 2018: Relocation of Seismicity in the Pannonian Basin Using a Global 3D Velocity Model. – *Seismological Research Letters* **89**, 2284–2293. <https://doi.org/10.1785/0220180143>
- BONDÁR, I., MYERS, S., ENGBAHL, E. & BERGMAN, E. 2004: Epicenter accuracy based on seismic network criteria. – *Geophysical Journal International* **156**, 483–496. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x>
- CARULLI, G., NICOLICH, R., REBEZ, A. & SLEJKO, D. 1990: Seismotectonics of the Northwest External Dinarides. – *Tectonophysics* **179**, 11–25. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90353-A](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90353-A)
- CZECE, B. & BONDÁR, I. 2019: Hierarchical cluster analysis and multiple event relocation of seismic event clusters in Hungary between 2000 and 2016. – *Journal of Seismology* **23**, 1313–1326. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09868-5>
- CZECE B., SÜLE B. & BONDÁR I. 2018: A 2013. évi Heves megyei földrengéssorozat helymeghatározása többeseményes algoritlussal (Multiple event relocation of the 22 April 2013, ML = 4.8 Tenk (Hungary) earthquake aftershocks). – *Magyar Geofizika* **58**, 162–174.
- CSONTOS, L. & NAGYMAROSY, A. 1998: The Mid-Hungarian line: A zone of repeated tectonic inversions. – *Tectonophysics* **297**, 51–71. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00163-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00163-2)
- EFRON, B. 1979: Bootstrap methods: Another look at the jackknife. – *Annals of Statistics* **7/1**, 1–26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- ENESCU, B., GHITA, C., MOLDOVAN, I. & RADULIAN, M. 2023: Revisiting Vrancea (Romania) Intermediate-Depth Seismicity: Some Statistical Characteristics and Seismic Quiescence Testing. – *Geosciences* **13**, 219. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070219>
- GRÁCZER, Z., SZANYI, G., BONDÁR, I., CZANIK, Cs., CZIFRA, T., GYÓRI, E., HETÉNYI, Gy., KOVÁCS, I., MOLINARI, SÜLE, B., SZUCS, E., WESZTERGOM, V., WÉBER, Z. & ALPARRAY WORKING GROUP 2018: AlpArray in Hungary: temporary and permanent seismological

- networks in the transition zone between the Eastern Alps and the Pannonian basin. – *Acta Geodaetica et Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0213-4>
- GYÓRI, E., CZECZE, B., TIMKÓ, M., BONDÁR, I., CZANIK, Cs., CZIFRA, T., FODOR, Cs., GRÁCZER, Z., GRIBOVSKI, K., GYARMATI, A., KALMÁR, D., KISZELY, M., KOVÁCS, I. J., MÓNUS, P., SÜLE, B., SZANYI, Gy., TÓTH, L., VARGA, P., ZSÍROS, T. & WÉBER, Z. 2023: Seismicity map of the Circum-Pannonian region (456–2020). Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron. – *Földtani Közlöny* **153/4**, p. 297. [doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA](https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.mapA)
- HAUSMANN, H., HOYER, S., SCHURR, B., BRÜCKL, E., HOUSEMAN, G. & STUART, G. 2010: New seismic data improve earthquake location in the Vienna Basin area, Austria. – *Austrian Journal of Earth Sciences* **103**, 2–14.
- HUNTER, J. D. 2007: Matplotlib: A 2D Graphics Environment. – *Computing in Science & Engineering* **9/3**, 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTRE 2022: On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- ISMAEL-ZADEH, A., MATENCO, L., RADULIAN, M., CLOETINGH, S. & PANZA, G. 2012: Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): Current state-of-the art. – *Tectonophysics* **530**, 50–79. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.016>.
- KOROKNAI B., KOVÁCS G., WÓRUM G., BÉKÉSI E., GYÓRI E., CZECZE B., WÉBER Z., PORKOLÁB K., BOZSÓ I., SZÁRNYA Cs., SZÜCS E., NÉMETH V., BALÁZS L., SZABÓ G. & TÓTH T. 2023a: Magyarország szeizmotektonikai viszonyai és veszélyeztetettsége. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 335–352. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.335>
- KOROKNAI, B., WÓRUM, G., TÓTH, T., KOROKNAI, Zs., FEKETE-NÉMETH, V. & KOVÁCS, G. 2020: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. – *Earth-Science Reviews* **211**, 103411. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103411>.
- KOROKNAI B., WÓRUM G., TÓTH T., KOROKNAI Zs., FEKETE-NÉMETH V. & KOVÁCS G. 2023b: Neotektonikus fázis deformációi Magyarországon. – *Földtani Közlöny* **153/4**, 313–334. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.4.313>
- LEE, W. K. & LAHR, J. C. 1972: HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes (p. 100). – *US Department of the Interior, Geological Survey, National Center for Earthquake Research*.
- MAGYARI, Á., MUSITZ, B., CSONTOS, L. & VAN VLIET-LANOË, B. 2005: Quaternary neotectonics of the Somogy Hills, Hungary (part I): Evidence from field observations. – *Tectonophysics* **410/1–4**, 43–62. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.044>
- MYERS, S., BEGNAUD, M., BALLARD, S., PASYANOS, M., PHILLIPS, W., RAMIREZ, A., ANTOLIK, M., HUTCHENSON, K., DWYER, J., ROWE, C. & WAGNER, G. S. 2010: A crust and upper-mantle model for Eurasia and North Africa for Pn travel-time calculation. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **100**, 640–656. <https://doi.org/10.1785/0120090198>
- POPA, M., CHIRCEA, A., DINESCU R., NEAGOE, C., GRECU, B. & BORLEANU, F. 2022: Romanian Earthquake Catalogue (ROMPLUS), Mendeley Data, V2. <https://doi.org/10.17632/tdfb4fgghy.2>
- RUSZKICZAY, Zs., FODOR, L. I., HORVÁTH, E. & TELBISZ, T. 2009: Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: a DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. – *Geomorphology* **104**, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014>
- SARAÑ, A., SUGAN, M., BRESSAN, G., RENNER, G. & RESTIVO, A. 2021: A focal mechanism catalogue of earthquakes that occurred in the southeastern Alps and surrounding areas from 1928–2019. – *Earth System Science Data* **13**, 2245. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2245-2021>.
- SCHLÖMER, A., WASSERMANN, J., FRIEDERICH, W., KORN, M., MEIER, T., RÜMPKER, G. & RITTER, J. 2022: UNIBRA/DSEBRA: The German Seismological Broadband Array and Its Contribution to AlpArray—Deployment and Performance. – *Seismological Society of America* **93/4**, 2077–2095. <https://doi.org/10.1785/0220210287>
- STEGENA, L. & SZEIDOVITZ, Gy. 1991: The 14 January 1810 earthquake in Mór, Hungary: the first isoseismal map. – *Tectonophysics* **193**, 109–115. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90192-U](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90192-U).
- STORCHAK, D. A., HARRIS, J., BROWN, L., LIESER, K., SHUMBA, B., VERNEY, R., DI GIACOMO, D. & KORGER, E. M. 2017: Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC), part 1: 1964–1979. – *Geoscience Letters* **4**, 32. <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0098-z>
- STORCHAK, D. A., HARRIS, J., BROWN, L., LIESER, K., SHUMBA, B. & DI GIACOMO, D. 2020: Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC)—part 2: 1980–2010. – *Geoscience Letters* **7**, 18. <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00164-6>
- SÜLE, B. & WÉBER, Z. 2013: Earthquake source parameters and scaling relationships in Hungary (central Pannonian basin). – *Journal of seismology* **17/2**, 507–521.
- SÜLE B., BONDÁR I., CZANIK Cs., GRÁCZER Z., GYÓRI E., SZANYI Gy., WÉBER Z. & KOVÁCS J. 2020: Így figyeljük hazánk földjének minden rezdülését. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium fejlődése és küldetése 2013-tól napjainkig. – *Magyar Tudomány* **181**, 1202–1215.
- TÓTH, L., MÓNUS, P. & ZSÍROS, T. 1989: The Berhida (Hungary) earthquake of 1985. – *Gerlands Beiträge zur Geophysik* **98**, 312–321.
- TÓTH, L., MÓNUS, P. & ZSÍROS, T. 1996: Hungarian Earthquake Bulletin – 1995. – Budapest, GeoRisk Kft.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., ZSÍROS, T. & KISZELY, M. 2002: A Pannon-medence szeizmicitása. – *Földtani Közlöny* **132**, 327–337.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., ZSÍROS, T., KISZELY, M. & CZIFRA, T. 2012: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2011. – Budapest, GeoRisk Kft.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., ZSÍROS, T., KISZELY, M. & CZIFRA, T. 2013: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2012. Budapest: *GeoRisk Kft.*
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M. & TÓTH, L. 2014: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2013. – Budapest, GeoRisk Kft.



- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M. & TÓTH, L. 2015: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2014. – Budapest, GeoRisk Kft.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M. & TÓTH, L. 2016: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2015. – Budapest, GeoRisk Kft. <http://doi.org/10.7914/SN/HM>
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M. & TÓTH, L. 2017: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2016. – Budapest, GeoRisk Kft. <http://doi.org/10.7914/SN/HM>
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M., TROSITS, D. & TÓTH, L. 2018: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2017. – Budapest, GeoRisk Kft. <http://doi.org/10.7914/SN/HM>
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M., TROSITS, D. & TÓTH, L. 2019: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2018. – Budapest, GeoRisk Kft.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M., TROSITS, D. & TÓTH, L. 2020: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2019. – Budapest, GeoRisk Kft.
- TÓTH, L., MÓNUS, P., KISZELY, M., TROSITS, D. & TÓTH, L. 2021: Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2020. – Budapest, GeoRisk Kft.
- Varga, P., Győri, E. & Timár, G. 2021: The Most Devastating Earthquake in the Pannonian Basin: 28 June 1763 Komárom. *Seismological Research Letters* **92**, 1168–1180. <https://doi.org/10.1785/0220200411>.
- VISNOVITZ, F., JAKAB, B., CZECZE, B., HÁMORI, Z., SZÉKELY, B., FODOR, L. & HORVÁTH, F. 2021: High resolution architecture of neotectonic fault zones and post-8-Ma deformations in western Hungary: Observations and neotectonic characteristics of the fault zone at the Eastern Lake Balaton. – *Global and Planetary Change* **203**, 103540. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103540>.
- WALDHAUSER, F. & ELLSWORTH, W. 2000: A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. – *Bulletin of the Seismological Society of America* **90**, 1353–1368.
- WÉBER, Z., CZECZE, B., SÜLE, B. & BONDÁR, I. 2020: Source analysis of the March 7, 2019 M-L=4.0 Somogyszob, Hungary earthquake sequence. – *Acta Geodaetica et Geophysica* **55/3**, 371–387. <https://doi.org/10.1007/s40328-020-00311-7>
- WÉBER Z., KOROKNAI B. & SZÁRNIA Cs. (szerk.) 2023: Magyarország szeizmotektonikai veszélyzettség térképének megalkotása és elemzése. Zárótanulmány. – Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet – Geomega Kft., Sopron–Budapest, 174 p.
- WIEMER, S. 2001: A software package to analyze seismicity: ZMAP. – *Seismological Research Letters* **72/3**, 373–382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- ZSÍROS T. 2000: *A Kárpát-medence szeizmicitása és földrengés veszélyessége: Magyar földrengés katalógus (456–1995)*. – MTA Földtudományi Kutatóközpont GGKI, Budapest, 495 p.
- ZSÍROS T. 2014: *Földrengések a Kárpát-medence térségében; Magyar földrengés katalógus (456–2010)*. – Budapest, számítógépes állomány
- ZSÍROS, T., MÓNUS, P. & TÓTH, L. 1988: *Hungarian Earthquake Catalog (456–1986)*. – Budapest, 182 p.
- Kézirat leadva: 2023. 08. 10.

## Függelék

### A momentummagnitúdók becslése

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

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

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

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

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

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