

Földrengésrajok a Móri-árokban

BONDÁR I.^{1,2,@}, KALMÁR D.³, CZECZE B.^{3,4}, KISZELY M.³

¹Földtani és Geokémiai Intézet, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, ELKH

²CSFK, MTA Kiváló Kutatóhely

³Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, ELKH

⁴ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

@E-mail: bondar.istvan@csfk.org

Ebben a cikkben a Móri-árok recens szeizmikus aktivitásáról számolunk be. Felfedeztük, hogy a Móri-árokban rendszeresen előfordulnak kis magnitúdójú földrengésrajok. A Móri-árok szeizmikus aktivitásának tanulmányozására 2020. márciusában három ideiglenes szeizmológiai állomást telepítettünk a területre, amelyek 2022. január elejéig, mintegy 20 hónapon keresztül működtek. Az ideiglenes hálózat, valamint a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium és a GeoRisk Kft. állandó állomásainak segítségével 6 földrengésrajt detektált, ahol a földrengésrajok egyes eseményei közül sok szabad szemmel nem is látható a regisztrátumokon. Az eredmények azt mutatják, hogy a Móri-árok, ahol a néhány legnagyobb magyarországi földrengés pattant ki a múltban, jelenleg is aktív.

Bondár, I., Kalmár, D., Czece, B., Kiszely, M.: Earthquake swarms in the Mór Graben, Hungary

We have discovered recent activity in the Mór Graben, Hungary. We found that earthquake swarms occur in the graben quite regularly. To further study the phenomena, we deployed a temporary seismic network that operated for 20 months. Using the temporary network stations as well as permanent stations from the Kövesligethy Radó Seismological Observatory and the GeoRisk, Ltd. networks we identified six distinct swarms of small magnitudes. Our results show that the Mór Graben, where some of the largest earthquakes occurred in Hungary in the past, is still active.

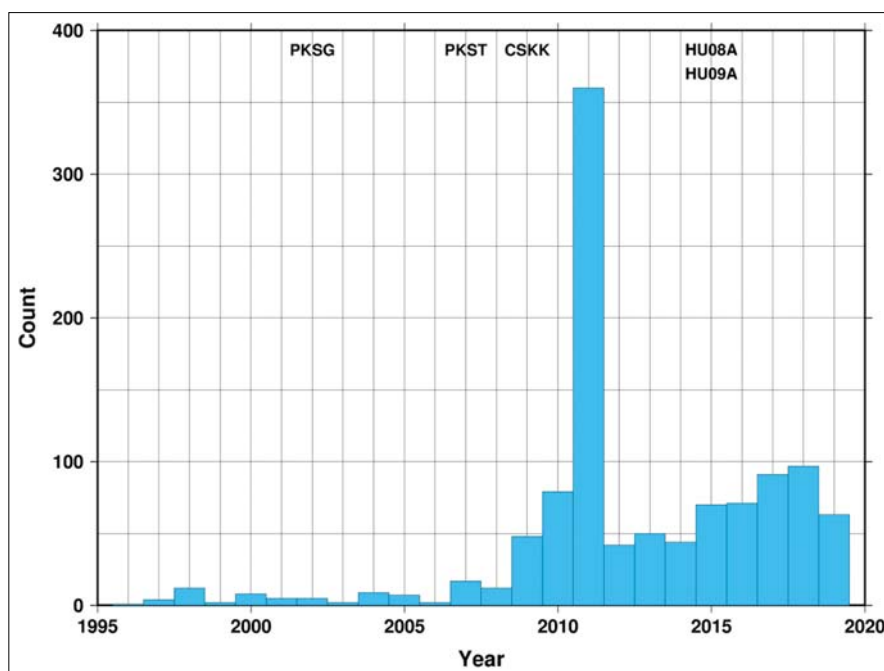
Beérkezett: 2022. április 19.; *elfogadva:* 2022. június 14.

Bevezetés

Magyarországot kis–közepes szeizmicitás jellemzi. A Balaton északkeleti részétől Komáromig húzódó sáv földrengések szempontjából az egyik legveszélyeztetettebb területe hazánknak, amelybe beletartozik a Móri-árok térsége is. Móron pattant ki az egyik legnagyobb ismert 5,4 magnitúdójú magyarországi földrengés 1810-ben (Varga et al. 2015), valamint a jelentős károkat okozó 2011-ben Oroszlányban kipattant $M = 4,5$ magnitúdójú földrengés (Wéber, Süle 2014). Ugyanakkor jelentős bányászati tevékenység is folyik a vidéken, a környékbeli kőfejtők robbantásait rendszeresen regisztrálják a szeizmológiai állomások. A természetes és mesterséges eredetű események elkülönítése fontos ahhoz, hogy a földrengésveszélyeztetettség számításokhoz szükséges földrengés-katalógusban ne szerepeljenek antropogén események. Az elmúlt néhány évben a magyarországi infrahangállomás-hálózat létrehozásával (Czanik, Bondár 2017) a szeiz-

mikus diszkrimináció (Kiszely et al. 2021) mellett fontos szerepet játszik a szeizmo-akusztikus diszkrimináció is (Czanik et al. 2021).

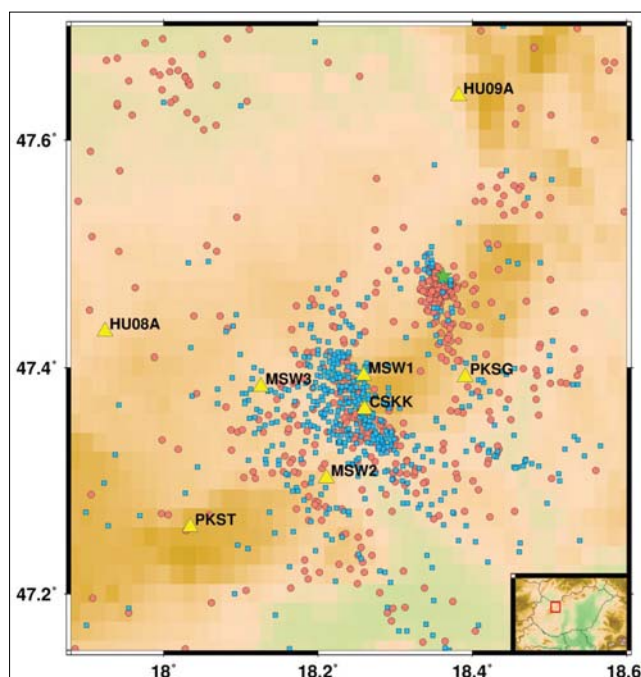
A magyar szeizmológia kezdetei a múlt század elejére nyúlnak vissza az első szeizmográfok telepítésével 1902-ben Budapesten és Ógyallán (Varga 2016). 1914-re a magyar szeizmológiai hálózat 10 állomásból állt, beleértve a zágrábi állomást is Andrija Mohorovičić vezetésével. A két világháború maradandó károkat okozott, még az 1990-es évek elején is csak három szeizmológiai állomás működött az országban. Az első digitális szélessávú állomást német adományból Pizskés-tetőn (Bondár, Tóth 1992) telepítették. A Paksi Atomerőmű szeizmikus monitorozására a GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda kezelésében korszerű digitális állomáshálózat jött létre 1994-ben, és ezzel a magyarországi szeizmológiai állomások száma 14-re nőtt (Mónus, Tóth 2013). A 2000-es években az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet (GGKI) Varga Péter vezetése alatt elkezdte az intézet saját szeizmológiai



1. ábra | A Móri-árok környezete földrengéseinek éves gyakorisága. Az egyes állomások telepítésének idejét is feltüntettük
Figure 1 | Annual number of earthquakes in the Mór Graben

hálózatának fejlesztését. Az MTA GGKI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium (KRSZO, www.seismology.hu) és a GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda (www.georisk.hu) 1995 és 2011 között közösen adta ki a

magyar földrengésbulletint. 2011-től kezdődően a GGKI KRSZO megkezdte a saját bulletinjének publikálását, amely már nem tartalmazza a GeoRisk állomásokat, vagyis a magyarországi állandó szeizmológiai állomások mint-



2. ábra | A Móri-árok környezete földrengéseinek epicentrumtérképe 1996–2020 között. A KRSZO-bulletin és az abban nem szereplő GeoRisk-meghatározásokat piros körökkel, illetve kék négyzetekkel jelöltük. A zöld csillag a 2011-es oroszlányi $M = 4,5$ erősségű földrengés epicentrumát jelzi k éves gyakorisága. Az egyes állomások telepítésének idejét is feltüntettük

Figure 2 | Epicentral map of earthquakes in the Mór Graben and its vicinity between 1996 and 2020. Events in the KRSZO bulletin are denoted by red circles, events that are not in the KRSZO but found in the GeoRisk bulletin are marked with blue squares. The green stars indicates the $M = 4.5$ Oroszlány main shock in 2011

egy felét. Azóta is két, egymást részlegesen átfedő földrengésbulletin létezik, a KRSZO által kiadott *Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin* (<http://www.seismology.hu/index.php/hu/szeizmicitas/foeldrengesek-evkoenye>), valamint a GeoRisk Földrengés Mérnöki Iroda által kiadott *Magyar Földrengések Évkönyve* (<http://www.georisk.hu/Bulletin/bulletinh.html>).

A Móri-árokban csak egy állandó szeizmológiai állomás működik, amelyet a KRSZO 2009-ben telepített Csókakőn (CSKK). A Móri-árok környezetében ezenkívül még két állandó GeoRisk-állomás található, Gánt (PKSG) 2002 és Tés (PKST) 2007 óta. Az állomások térbeli elhelyezkedése nem ideális, mert nagyjából egy vonalba esnek, emiatt a helymeghatározás hibája igen nagy is lehet. 2011-ben Oroszlányt rázta meg egy $M = 4,5$ méretű földrengés, amelyet több mint 280 utóregés követett (Békési et al. 2017), melyeket a KRSZO által telepített ideiglenes állomások Bokod (BOKD), Vértessomló (VSOM), valamint a közeli PKST, CSKK és PKSG állomások regisztráltak. Az 1. ábra a Móri-árok környezetében 1996 óta előfordult földrengések időbeli eloszlását mutatja azt követően, hogy a robbantásokat eltávolítottuk a katalógusból (Kiszely et al. 2021).

A csókakői állomás az egyik legfontosabb szeizmológiai állomás a helyi földrengések és bányarobbanások megkülönböztetésére a Móri-árok környezetében. Az állomás időről időre regisztrál kisméretű földrengéseket a Móri-árokban, és ezek egy része, amelyek meghatározhatók voltak a CSKK, PKSG és PKST állomások segítségével, szerepel a *GeoRisk Magyar Földrengések Évkönyvében* (<http://www.georisk.hu/Bulletin/bulletinh.html>). Az azonban csak napjainkban vált világossá, hogy ezek egy része valójában földrengésrajokat alkot.

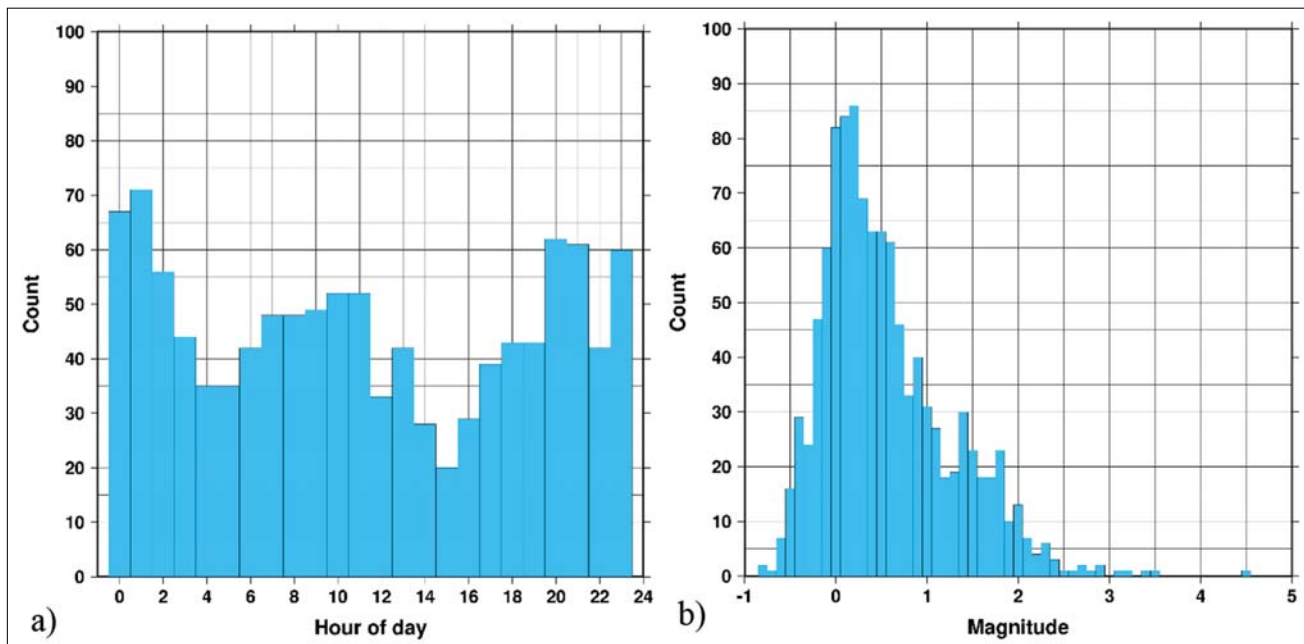
A 2. ábra a Móri-árok környezetében 1996 óta kipattant földrengések epicentrumát mutatja. A földrengések hipocentrumadatai a KRSZO *Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin* iLoc módszerrel újrameghatározott listájából (Bondár et al., 2018), valamint a Móri-árokra vonatkozóan teljesebb *GeoRisk Magyarországi Földrengések Évkönyvéből* származnak.

A 3. ábra a Móri-árok környezete eseményeinek napi és magnitúdó szerinti eloszlását mutatja. A Vértés-hegység kőbányáiban általában nappal, helyi idő szerint 7–12 óra között robbantanak. A terület földrengéseinek napi eloszlása arra utal, hogy a robbantások túlnyomó többségét sikeresen kiszűrjük az események listájából.

Földrengésrajok a Móri-árok területén

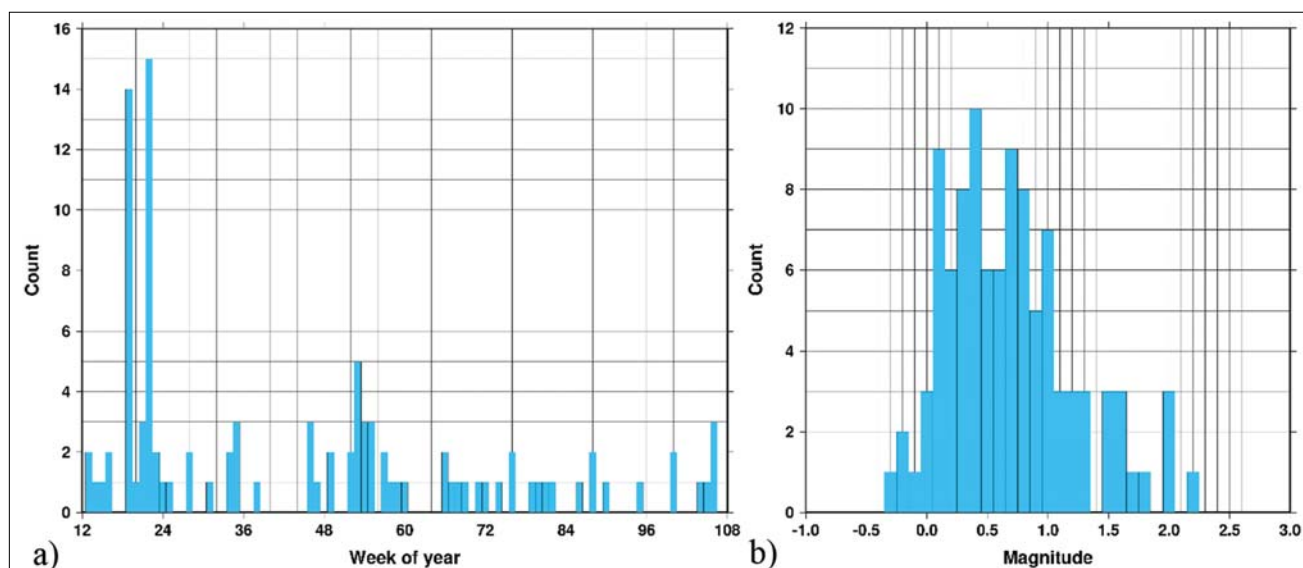
Ideiglenes hálózat

Tekintve, hogy 2015-ben az AlpArray program (Hetényi et al. 2018, Gráczter et al. 2018) keretében telepített legközelebbi AlpArray ideiglenes állomások (HU08A, HU09A) is túl messze vannak ahhoz, hogy a Móri-árok kisebb rengéseit regisztrálni tudják, 2020. márciusában a KRSZO három ideiglenes állomást telepített a csókakői állomás közelébe, az MSW1 (Mór, Vértés Tábor), MSW2 (Fehérváracsurgó, Bársony István Emlékház) és MSW3 (Mór, Tímári Vadaskert) állomásokat. Az ideiglenes állomások helyének kiválasztásánál az volt az elsődleges szempont, hogy az állomások közrefogják a Móri-árkot, és a rengések kis méretére való tekintettel CSKK 10 km-es körzetében legyenek. Az ideiglenes hálózat, amely



3. ábra | A Móri-árok és környezete földrengéseinek a) napi és b) magnitúdó szerinti eloszlása a robbantások kiszűrése után 1996 és 2020 között. Az események túlnyomó többsége kis magnitúdójú

Figure 3 | a) Hour of day and b) magnitude distribution of earthquakes in the Mór Graben and its vicinity after the removal of quarry blasts between 1996 and 2020. The magnitude of the vast majority of events is small



4. ábra | A Móri-árok hálózat által regisztrált földrengések a) időbeli (hetenkénti bontásban, 2020.03.26. és 2022.01.10. között) és b) magnitúdó szerinti eloszlása

Figure 4 | a) Week of year and b) magnitude distribution of earthquakes recorded by the Mór Graben network between 2020-03-26 and 2022-01-10

2020.03.26. és 2022.01.10. között, mintegy 20 hónapon át üzemelt, a KRSZO és GeoRisk állandó állomásokkal együtt már alkalmas volt arra, hogy pontosan meghatározzuk a földrengések helyét.

A Móri-árok területére telepített hálózat működése alatt 102 földrengést regisztráltunk. Ezenkívül számos robbantást is észleltünk a környező bányákból, de itt csak a természetes eredetű eseményekkel foglalkozunk. A 4. ábra a rengések időbeli és magnitúdó szerinti eloszlását mutatja. Megjegyezzük, hogy a földrengések túlnyomó többségének a magnitúdója olyan kicsi volt, hogy az ideiglenes állomások nélkül csak a rengések kis, mintegy 18 százaléka került volna be a KRSZO *Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletinbe*.

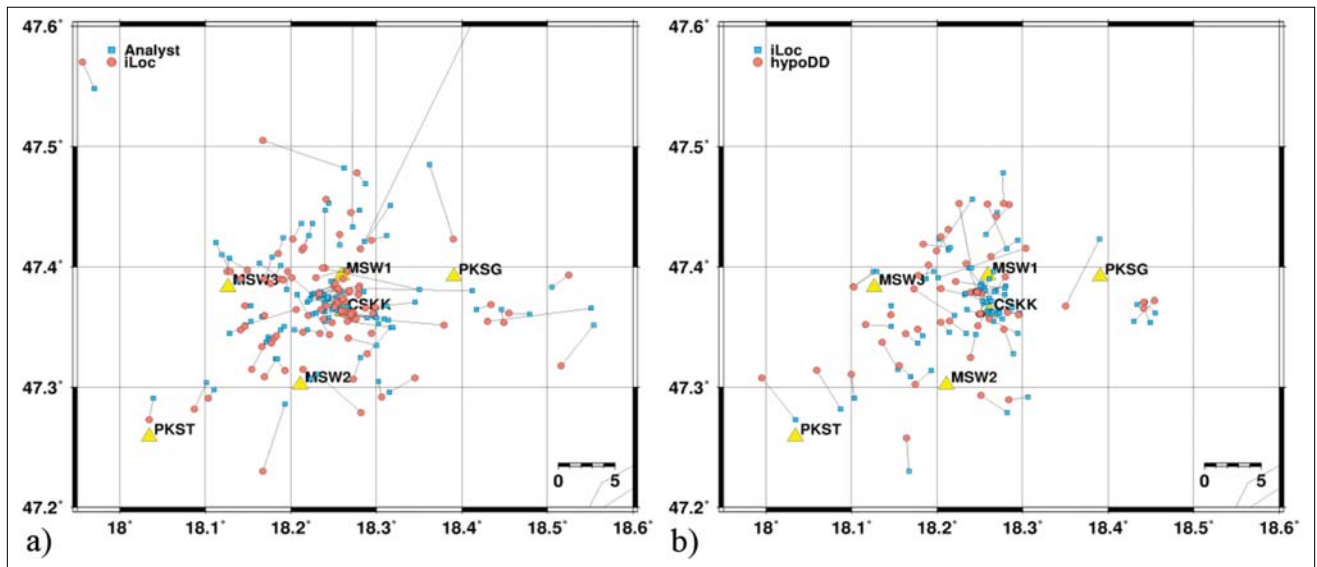
Helymeghatározás

A Móri-árok hálózat által regisztrált események hipocentrumait az iLoc helymeghatározó algoritmus (Bondár, Storchak 2011, Bondár et al. 2018) segítségével, az RSTT globális háromdimenziós sebességmodell (Myers et al. 2010, Begnaud et al. 2021) használatával számítottuk ki. Az iLoc hipocentrumok képezték a double-difference, egy többeseményes helymeghatározó algoritmus (Waldhauser, Ellsworth 2000) bemenetét. Az algoritmus egy egész eseményklaszter szimultán helymeghatározását végzi, és a földrengések egymáshoz képesti helyzetének nagy pontosságú meghatározását eredményezi. A módszer lehetővé teszi nemcsak az abszolút menetidők, hanem a hullámforma-korrelációs eljárással kinyert differenciális idők egyidejű felhasználását is, így a jó minőségű adatok mennyiségét jelentősen növelhettük. Bár a földrengéseket viszonylag kisszámú állomáson tudtuk detektálni, a hullámforma-korrelációnak köszönhetően az adatok száma elégséges a megbízható helymeghatározáshoz.

A keresztkorrelációt minden egyes állomáson minden földrengéspárra elvégeztük. A hullámformák közötti időbeli eltolás, mely maximalizálja a korrelációs függvényt, az események térbeli távolságáról hordoz információt. Kizárólag olyan korrelációkat fogadtunk el, amelyeknél a korrelációs koefficiens legalább 0,7 volt. A kombinált adatokkal alkalmaztuk a double-difference módszert úgy, hogy a hypoDD (Waldhauser, 2001) programmal végzett iterációk során különböző súlyokkal vettük figyelembe a katalógusban szereplő kiméréseket, valamint a differenciális időket. Az iterációk addig folytatódtak, míg teljesültek a konvergenciakritériumok, vagyis amíg a változás a hipocentrumok paramétereiben minimálissá vált (Czece, Bondár 2019).

A helymeghatározások során néhány eseményt elvesztettünk, ugyanis azok az események, melyek csak gyengén kapcsolódnak a klaszterhez, az iterációk során elveszítik a kapcsolatukat, vagy negatív mélységre kerülhetnek, légréngésekké válhatnak. Mivel ezen események helymeghatározása egyébként is bizonytalan, nem rögzítettük ezeket fix mélységre. Az adathalmazban csak a jól meghatározott, stabil megoldással rendelkező hipocentrumok maradtak, így a 102 földrengésből 72 hipocentrumát tudtuk a többeseményes algoritmusmal meghatározni. A földrengések mindegyike sekély mélységben pattant ki, a fészekmélységek 3–5 km közé estek.

Az 5. ábra a manuális (SeisComp), iLoc és a hypoDD helymeghatározások összehasonlítását mutatja. Az iLoc helymeghatározások drámaian csökkentették a manuális (SeisComp) helymeghatározások szóródását, az események klaszterekbe tömörítésével. Az iLoc helymeghatározásokat a double-difference módszer még tovább tömörítette. Ez különösen látszik a CSKK és MSW1 között elhelyezkedő klaszter esetében, amelyet a double-difference algoritmus szinte ponttá zsugorított. Mivel az ál-



5. ábra A Móri-árok hálózat által regisztrált földrengések helymeghatározása a) a manuális (kék négyzet) és iLoc (piros kör), valamint b) iLoc (kék négyzet) és hypoDD (piros kör) megoldások összehasonlítása. A double-difference algoritmus jelentősen tömöríti az eseményklasztert

Figure 5 a) Manual (blue squares) and iLoc (red circles) and b) iLoc (blue squares) and hypoDD (red circles) determinations of hypocenters by the Mór Graben network. The hypoDD algorithm makes the iLoc determinations even better clustered by further tightening the seismicity

lomások a földrengések közvetlen közelében helyezkedtek el, és teljesen körbefogták azokat, a double-difference módszer nemcsak a relatív, hanem az abszolút helymeghatározásokat is jelentősen javította.

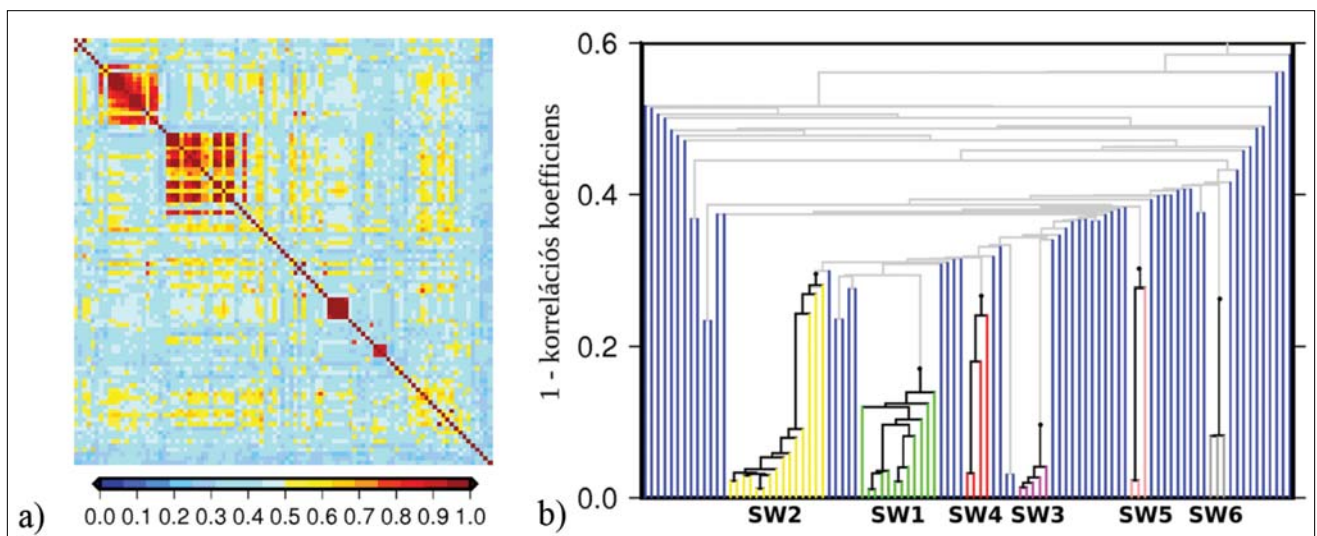
Földrengésrajok

A földrengésraj kis, hasonló méretű és időben gyors lefutású földrengések sorozata, melyekben nem szerepel sem domináns főrengés, sem utórengések. Egy földrengésraj eseményei hasonló hullámformával jelentkeznek, de az egyes földrengésrajok nem feltétlenül hasonlítanak

egymáshoz. Más szóval, az egyes földrengésrajokon belüli események hasonlóak egymáshoz, de a hullámformáik nem feltétlenül hasonlóak más földrengésrajok eseményeihez.

Az egyes földrengésrajokat a double-difference módszer differenciális időit meghatározó hullámforma-korreláció számításából származó, a 6. ábrán látható korrelációs mátrix alapján, illetve az ehhez kapcsolódó hierarchikus nearest neighbour klaszteranalízis alapján határoztuk meg.

A földrengések hullámformáin a legnagyobb jel/zaj aránnyal megjelenő események double-difference mód-



6. ábra a) Az első P-beérkezések hullámformáinak korrelációs mátrixa az MSW1 állomáson és b) a korrelációs koefficiens alapján készült dendrogram. Mindkét ábrán jól kijelölhetők a földrengésrajok

Figure 6 a) Correlation matrix of first-arriving P waveforms at MSW1 and b) the dendrogram based on the correlation coefficients. Swarms can be identified in both figures

1. táblázat | Mesteresemények paraméterei

Földrengésraj	Azonosító	Kipattanási idő	Szélesség	Hosszúság
SW1	bud2020gpmj	2020.04.03 20:29:45	47,3831	18,1023
SW2	bud2020izml	2020.05.07 18:58:50	47,3789	18,2454
SW3	bud2020wgdg	2020.11.10 20:17:55	47,3605	18,2953
SW4	bud2020kgtl	2020.05.25 23:59:20	47,3614	18,2502
SW5	bud2020zray	2020.12.31 02:11:21	47,3711	18,4415
SW6	bud2021cbdh	2021.01.30 01:51:50	47,4521	18,2587

szer helymeghatározásait választottuk ki mestereseményeknek (1. táblázat).

Hullámforma-korrelációs detektor

A Móri-árok hálózat által regisztrált földrengések mind kis magnitúdójúak voltak, a rengések csak mintegy 20%-a volt nagyobb $ML = 1$ -nél, és a legnagyobb is csak $ML = 2,4$ volt. Ezért azt gyanítottuk, hogy a földrengésrajok tartalmaznak olyan rengéseket is, amelyek szabad szemmel nem vagy alig láthatók a hullámformákon. A földrengésrajokra a nagyon hasonló hullámforma és a rövid időtartam jellemző. A mi esetünkben is a rengések mintegy fele egy napon belül, gyorsan követte az előzőt, és a földrengésrajok csak két-három napig tartottak.

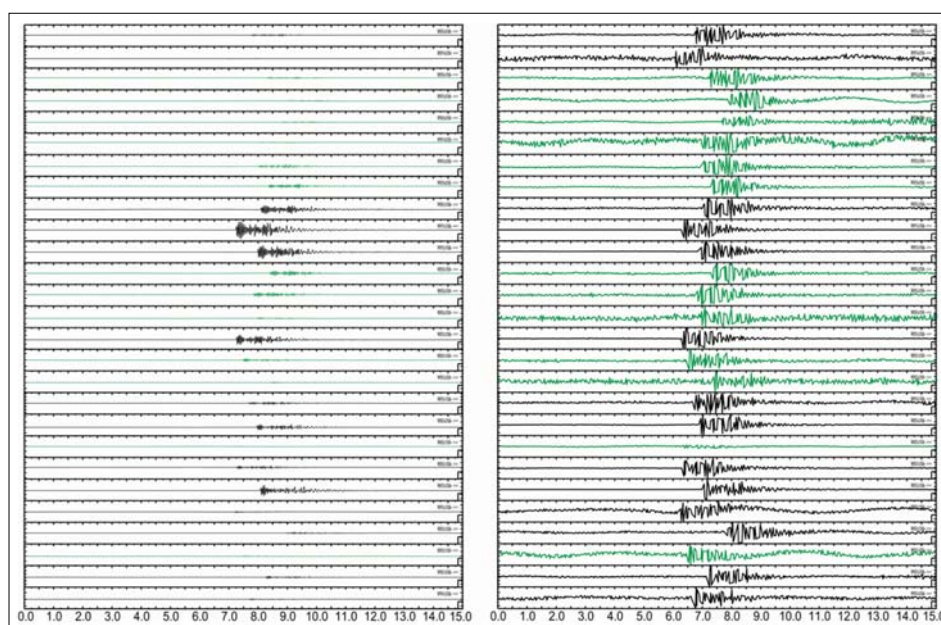
A földrengésrajok hullámformáinak hasonlósága lehetővé teszi a hullámforma-korrelációs módszer alkalmazá-

sát a háttérzajba merült kis földrengések detektálására. A korrelációs detekcióhoz szükség van egy mestereseményre, amelynek a hullámformájával korreláljuk a teljes időtartamra vonatkozó hullámformát.

A mesteresemények mintául szolgáló hullámformáit 1–5 Hz között szűrtük meg. Ezt a mintát csúsztattuk végig az állomás ugyanolyan paraméterekkel szűrt hullámformája mentén a mestereseményt körülvevő három napnyi időtartamon. Eseményeket ott detektáltunk, ahol a hullámforma keresztkorrelációja a mesteresemény hullámformájával meghaladta a konvencionálisan használt 0,7 értéket.

Subspace detektor

A korrelációs detektor egyik hátránya, hogy különböző földrengésrajok nem feltétlenül produkálnak egymáshoz



7. ábra a) Az első P-beérkezések hullámformáinak korrelációs mátrixa az Manuálisan (fekete) és a subspace detektor által (zöld) azonosított események az SW2 földrengésrajban az MSW1 állomáson a) a raj legnagyobb amplitúdója szerint, illetve b) csatornánként normalva. A subspace detektor szabad szemmel nem látható eseményeket is detektál MSW1 állomáson és b) a korrelációs koefficiensek alapján készült dendrogram. Mindkét ábrán jól kijelölhetők a földrengésrajok

Figure 7 Manually identified events (black traces) and those identified only by the subspace detector (green traces) in the SW2 swarm at MSW1 a) normalized by the global maximum amplitude of the swarm and b) normalized at individual traces. The subspace detector is able to detect events that cannot be seen by the naked eye

hasonló hullámformákat, így minden egyes földrengés-rajon belül ki kell jelölni egy mestereseményt. Ezt a problémát oldja meg a subspace detektor, amely olyan esetekre használható, amikor több ismétlődő forrás generál eseményeket (Harris 2006, Harris, Dodge 2011). A módszer a mesteresemények lineáris kombinációját használva lehetővé teszi kis események rendkívül érzékeny detektálását (Skoumal et al. 2016). A subspace detektor egy folyamatos adatfolyamból kiemelt adatok csúszó ablakát vetíti egy vektorjelalteredre, amely egy adott forrás által várhatóan generált jelek gyűjteményét öleli fel. A subspace detektorhoz az előző fejezetben felsorolt mestereseményekkel az EQcorrscan (Chamberlain et al. 2018) python programot használtuk. A hullámformákat 2–4 Hz között szűrtük, és a teljes, 20 hónapnyi időszakot végigpásztáztuk a subspace detektorral.

A 7. ábra az egyik legtöbb eseményt számláló földrengésraj esetében szemlélteti a subspace detektor hatékonyságát. Fekete színnel rajzoltuk azokat az eseményeket, amelyeket a manuális analízis során azonosítottunk, zölddel pedig azokat, amelyeket csak a subspace detektor azonosított. A 7a. ábrán a földrengésraj hullámformáit a teljes klaszter legnagyobb amplitúdójával normáltuk, így látszik, hogy a legtöbb esemény szabad szemmel alig vagy egyáltalán nem látható. A 7b. ábrán a földrengésraj hullámformáit egyenként normáltuk, itt pedig az látszik, hogy az események hullámformái valóban hasonlóak.

Összefoglalás

A Móri-árok területére telepített ideiglenes állomáshálózat segítségével sikerült 94 földrengés hipocentrumát meghatározni az iLoc algoritmussal, melyek közül 72 földrengés helyét a hypoDD többeseményes algoritmus-sal nagy pontossággal tudtuk meghatározni. A rengések fészekmélysége sekély, 3–5 km volt. A földrengések kivétel nélkül kis magnitúdójúak voltak, és csak a Móri-árok hálózat állomásai regisztrálták ezeket. Ez azt is jelenti, hogy az ideiglenes és GeoRisk állomások nélkül nem kerülneek bele a KRSZO *Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletinbe*.

Kimutattuk, hogy a földrengések egy része rajokat alkot, melyek számossága 2–30 között mozog. Visszamenőleg kiértékelve a csókakői hullámformákat azt találtuk, hogy a Móri-árok szinte minden évben produkál földrengésrajokat, más néven swarmokat. A 2. táblázat mutatja a csókakői állomás 2009-es telepítése óta megfigyelt nagyobb, legalább hat rengésből álló földrengésrajok paramétereit.

A Móri-árok hálózat által regisztrált földrengések között 6 földrengésrajt találtunk, ezekre alkalmaztuk a korrelációs és subspace detektor módszert, hogy a háttérzaj miatt szabad szemmel nem látható földrengéseket is detektáljuk. Mindkét módszer igényel mestereseményeket, ezeket a hypoDD helymeghatározások közül jelöltük ki. A várakozásoknak megfelelően subspace

2. táblázat| A CSKK állomáson azonosított jelentősebb földrengésrajok 2009–2019 között

A rengésraj kezdete	A rengésraj vége	Manuálisan azonosított rengések
2009/11/21 00:21	2009/11/22 19:21	6
2010/01/10 02:36	2010/01/10 15:13	8
2012/02/14 16:15	2012/02/15 06:14	12
2012/04/06 00:05	2012/04/15 09:09	7
2013/07/01 12:28	2013/07/02 14:10	20
2015/06/16 23:16	2015/06/18 02:09	10
2015/09/29 04:49	2015/09/30 18:58	10
2015/11/03 11:47	2015/11/06 13:50	12
2016/01/19 02:51	2016/01/19 04:38	6
2017/02/20 08:23	2017/02/20 12:10	11
2017/03/16 01:09	2017/03/19 10:33	11
2018/04/21 07:58	2018/04/23 18:54	15
2018/10/27 11:10	2018/10/27 11:49	7
2019/03/08 22:25	2019/03/09 09:27	20
2019/05/06 04:19	2019/05/06 16:11	7

3. táblázat | A Móri-árok hálózat által regisztrált földregésrajok

Elnevezés	Régésraj		Azonosítás módja	
	Kezdet – vége	Manuális	Korrelációs detektor	Subspace detektor
SW1	2020/03/27 19:51 – 2020/04/03 20:29	3	0	5
SW2	2020/05/04 00:26 – 2020/05/07 20:36	14	17	27
SW3	2020/05/22 21:20 – 2020/06/04 23:44	19	14	33
SW4	2020/11/10 19:33 – 2020/11/10 21:36	3	0	5
SW5	2020/12/31 02:11 – 2020/12/31 06:04	5	10	14
SW6	2021/01/30 01:51 – 2021/02/06 05:02	3	0	3

detektor nyújtotta a legjobb teljesítményt. A 3. táblázat az egyes módszerek által talált események összehasonlítását mutatja.

Tekintve, hogy a Móri-árokra csak egy kis, mintegy 10 km-es szakaszt monitoroztuk a Móri-árok hálózattal, következtéseink nem vonatkozathatóak a Móri-árok teljes kiterjedésére. Ugyanakkor feltételezhetjük, hogy a Móri-árok egésze aktív, és évente több földregésraj produkál. Földregés-veszélyeztetettségi szempontból nem lenne ésszerűtlen a Móri-árok mentén egy állandó állomáshálózat telepítése a Móri-árok aktivitásának monitorozására.

Köszönetnyilvánítás

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával, K128152 projekt, „Természetes és mesterséges eredetű események elkülönítése szeizmikus és infrahang adatok együttes analízisével” keretében történt. Köszönet az ideiglenes állomások üzemeltetésében nyújtott támogatásért a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézetnek és a GeoRisk Földregés Mérnöki Irodának a paksi mérőállomások adatainak rendelkezésre bocsátásáért. Hálásak vagyunk a Vértes-tábor, Bársony István Em-lékház és a Tímári Vadaskert épületei üzemeltetőinek, hogy befogadták az ideiglenes állomásokat. Köszönet illeti az ismeretlen bírálót, akinek megjegyzései jelentősen javítottak mind a cikk tartalmán, mind a nyelvhelyességen.

A tanulmány szerzői

Bondár István, Kalmár Dániel, Czece Barbara, Kiszely Márta

Hivatkozások

- Békési E., Süle B., Lenkey L., Lenkey-Bogér 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 Geod. Geophys.*, 52, 229–242.
- Begnaud M. L., Myers S. C., Young B., Hipp J. R., Dodge D., Phillips W. S. (2021): Updates to the Regional Seismic Travel Time (RSTT) model: 1. Tomography. *Pure Appl. Geophys.*, 178, 2475–2498. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02619-5>.
- Begnaud M. L., Anderson D. N., Myers S. C., Young B., Hipp J. R., Phillips W. S. (2021): Correction to: Updates to the Regional Seismic Travel Time (RSTT) model: 2. Path-dependent travel-time uncertainty. *Pure Appl. Geophys.*, 178, 2499–2525. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02696-0>.
- Begnaud M. L., Anderson D. N., Myers S. C., Young B., Hipp J. R., Phillips W. S. (2021): Updates to the Regional Seismic Travel Time (RSTT) model: 2. Path-dependent travel-time uncertainty. *Pure Appl. Geophys.*, 178, 313–339. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02657-7>.
- Bondár I., Tóth L. (1992): Az első magyar szélessávú digitális szeizmológiai állomás (Pizskétető, PSZ). *Magyar Geofizika*, XXXIII, 151–161.
- Bondár I., Storchak D. (2011): Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophys. J. Int.*, 186, 1220–1244.
- Bondár I., Mónus P., Czanik Cs., Kiszely M., Grácz Z., Wéber Z. and the AlpArray Working Group (2018): Relocation of seismicity in the Pannonian Basin using a global 3D Velocity Model. *Seismol. Res. Lett.*, 89, 2284–2293.
- Chamberlain C. J., Hopp C. J., Boese C. M., Warren-Smith E., Chambers D., Chu S. X., Michailos K., Townend J. (2018): EQ-corrscan: Repeating and near-repeating earthquake detection and analysis in Python. *Seismol. Res. Lett.*, 89, 173–181.
- Czanik Cs., Bondár I. (2017): The first infrasound array in Hungary. In: CTBT: Science and Technology Conference, Book of Abstracts, p. 9, 26–30 June 2017, Vienna, Austria.

- Czanik C., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Bondár I. (2021): Identification of quarry blasts aided by infrasound data. *Pure Appl. Geophys.*, 178, 2287–2300.
- Czecze B., Bondár I. (2019): Hierarchical cluster analysis and multiple event relocation of seismic event clusters in Hungary between 2000 and 2016. *J. Seismol.*, 23, 1313–1326.
- GeoRisk Szeizmológiai Hálózat, HM, <https://doi.org/10.7914/SN/HM>.
- GeoRisk, *Magyar Földrengések Évkönyve*, <http://www.georisk.hu/Bulletin/bulletinh.html>.
- Grácz Z., Szanyi G., Bondár I., Czanik Cs., Czifra T., Gyori E., Hetényi Gy., Kovács I., Molinari I., 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 Geod. Geophys.*, 53, 221–245.
- Harris D. (2006): *Subspace Detectors: Theory*. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-222758.
- Harris D. B., Dodge D. A. (2011): An autonomous system for grouping events in a developing aftershock sequence. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101, 763–774.
- Hetényi Gy., Molinari I., Clinton J., Bokelmann G., Bondár I., Crawford W. C., Dessa J.-X., Doubre C., Friederich W., Fuchs F., Giardini D., Grácz Z., Handy M. R., Herak M., Jia Y., Kissling E., Kopp H., Korn M., Margheriti L., Meier T., Mucciarelli M., Paul A., Pesaresi D., Piromallo C., Plenefisch T., Plomerová J., Ritter J., Rumpker G., Sipka V., Spallarossa D., Thomas C., Tilmann F., Wassermann J., Weber M., Wéber Z., Wesztergom V., Zivcic M., AlpArray Seismic Network Team, AlpArray OBS Cruise Crew, AlpArray Working Group, The AlpArray Seismic Network (2018): A large-scale European experiment to image the Alpine orogen. *Surv. Geophys.*, 39, 1009–1033.
- Kiszely M., Süle B., Mónus P., Bondár I. (2021): Discrimination between local earthquakes and quarry blasts in the Vértes Mountains, Hungary. *Acta Geod. Geophys.*, 56, 523–537.
- Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, *Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin*, <http://www.seismology.hu/index.php/hu/szeizmicitas/foeldrengesek-evkoenyve>.
- Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat, HU, <https://doi.org/10.14470/UH028726>.
- Mónus P., Tóth L. (2013): A magyar szeizmológiai hálózat fejlődése és jelenlegi helyzete. *Magyar Tudomány*, 174, 1, 53–64.
- Myers S. C., Begnaud M. L., Ballard S., Pasyanos M. E., Phillips W. S., Ramirez A. L., Antolik M. S., Hutchenson K. D., Dwyer J. J., Rowe C. A., Wagner G. S. (2010): A crust and upper-mantle model for Eurasia and North Africa for Pn travel-time calculation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 640–656.
- Skoumal R. J., Brudzinski M. R., Currie B. S. (2016): An efficient repeating signal detector to investigate earthquake swarms. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 5880–5897.
- Varga P., G. Timár, M. Kiszely, Two Hundred Years Ago the Dissertation de terrae motu Mórensi and the First Isoleismic Map Appeared. *Seismol. Res. Lett.*, 86, 1432–1437, 2015.
- Varga P. (2016): A Földrengési Observatóriumtól a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumig. *Magyar Tudomány*, 177, 1192–1217.
- Waldhauser F., Ellsworth W. L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353–1368.
- Waldhauser F. (2001): hypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations. *US Geol. Surv. Open File Report*, 01-113.
- Wéber Z., Süle B. (2014): Source properties of the 29 January 2011 ML 4.5 Oroszlány (Hungary) mainshock and its aftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 104, 113–127.