

Érsekvadkert, Iliny és Heves területén 2013 és 2015 között kipattant földrengések klaszterelemzése

KISZELY M.[@], MÓNUS P.⁺, TÓTH L.[#], GYÓRI E.

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, 1112 Budapest, Meredek u. 18.

[@]E-mail: kiszely.marta@csfk.mta.hu; ⁺E-mail: monus.peter@csfk.mta.hu; [#]E-mail: toth.laszlo@csfk.mta.hu

2013. és 2015. január között három térséget érintve (Heves, Iliny és Érsekvadkert) több közepes méretű földrengés és azokat követő utóregések pattantak ki. A legnagyobb főregések mérete $M_L = 4,1$, $M_L = 4,2$, ill. $M_L = 4,8$, a legkisebb regisztrált utóregésé pedig $M_L = 0,7$ volt. A földrengésekhez legközelebb a Cserhát hegységben levő pencsi (PENC) és a Mátra második legnagyobb csúcán található pizskéstetői (PSZ) szeizmológiai állomások működtek. Az ezeken az állomásokon regisztrált 88 földrengés hullámformáinak korrelációs elemzését végeztük el. Az utóregések mintegy 75%-a mindhárom területen a hullámformák hasonlósága alapján klaszterbe/klaszterekbe rendeződött. Vizsgálataink során ezek tulajdonságait elemeztük, és arra kerestük a választ, hogy milyen modell közelíti legjobban az utóregések sorozatát.

Kiszely, M., Mónus, P. Tóth, L., Győri, E.: Cluster analysis of earthquakes occurred in Érsekvadkert, Iliny and Heves, between 2013 and 2015

Medium-size earthquakes and subsequent aftershocks shocked three areas (Heves, Iliny and Érsekvadkert) between 2013 and January 2015. The maximum size of the main shocks were $M_L = 4.1$, $M_L = 4.2$, $M_L = 4.8$, respectively, the least size of recorded aftershock was $M_L = 0.7$. Two seismological stations were operated near to these earthquakes: Penc (PENC) in the Cserhát Mountains, and Pizskéstető (PSZ) on the second highest peak of Mátra Mountain. Waveform correlation analysis was performed for 88 earthquakes registered by these stations. On the basis of waveform similarities, about 75% of aftershocks were arranged in cluster/clusters in the three regions, and their characteristics are analyzed in the article. We try to answer which model approximates best the sequences of aftershocks.

Beérkezett: 2016. április 29.; *elfogadva:* 2016. június 10.

Bevezetés

Észak-Magyarországon 2013. és 2015. január között három $M_L > 4$ földrengés pattant ki Heves, Érsekvadkert és Iliny térségében, ezek kisebb károkat is okoztak. Több esetben előregések is megfigyelhetők voltak, de jellemzően sok utóregés követte a főregéseket. A fészkekhez közeli szeizmikus állomások korlátozott száma és a kisméretű utóregések miatt a legtöbb esetben az utóregések paramétereit csak nagy hibával (5–10 km) lehetett meghatározni. A hullámformák korrelációs elemzésével szerettünk volna a fészkek tulajdonságairól többet megtudni. A PSZ és a PENC állomások hullámformái alapján 88 földrengést elemeztünk. Az utóregések hullámforma-elemzése az utóregések

75%-át egy vagy több klaszterbe sorolta, amelyeknek elemei egymáshoz nagyon hasonló szeizmogrammal rendelkeztek.

Tektonikai háttér és szeizmicitás

A Kárpát-medence litoszféraeljzása nem egységes, északi és déli része jelentős tektonikai mozgások során kerültek egymás mellé. A Kárpát-medence aljzatának ÉNy-i része az Afrikai, DK-i területe az Eurázsiai lemezhez tartozott (Mészáros, Schweitzer 2002). A két területet a Közép-magyarországi főegység választja el, amely egy több 10 km széles és több 100 km hosszú nyírási zóna. Ezt északról a DNy–

ÉK-i csapású Balaton vonal határolja, amely a Zagyváróktól ÉK-re a Darnó vonalban folytatódik, délről pedig a Közép-magyarországi vonal. Ez utóbbi neotektonikailag aktív, amit most látványosan a hevesi földrengések epicentrumai is mutatnak. Az Ilinyi és Érsekvadkerti rengések pedig az Ógyalla–Diósjenő vonal aktivitását jelzik.

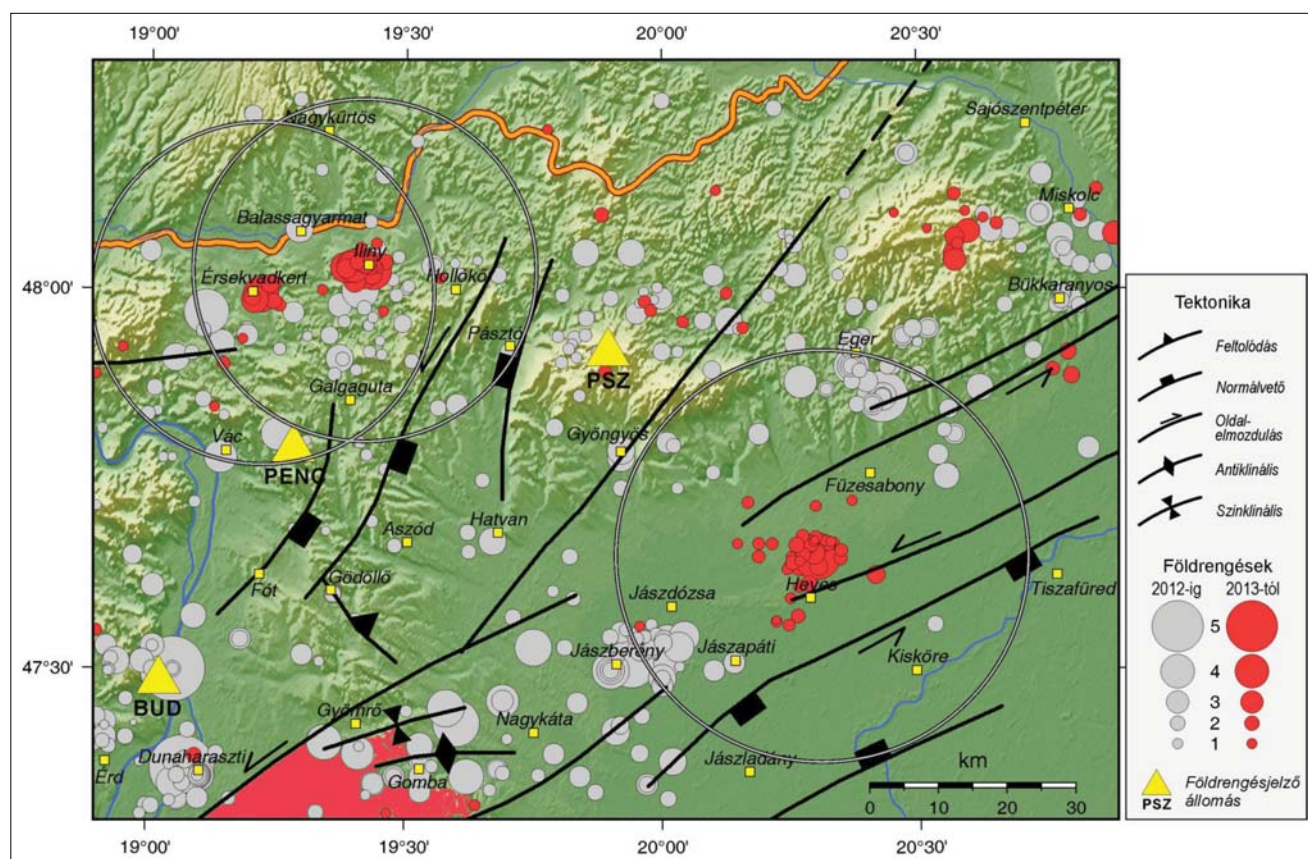
A vizsgált területen (47,3°–48,3°É; 18,9°–20,9°K) a Magyar Földrengés Katalógus alapján összesen 852 földrengést ismerünk. Az 1. ábrán látható a terület földrengéseinek epicentrumtérképe. A 2012 előtti földrengések epicentrumait, és a 2013–2015.01 között történt eseményeket eltérő színekkel jelöltük. E rengések több mint harmada még 1950 előtt pattant ki, ezért csak makroszkopikus magnitúdóval rendelkeznek, csak áttélesen lehet becsülni a Richter- (vagy lokális) magnitúdót. A becsült magnitúdók bizonytalanságát figyelembe véve $M_L > 5$ méretű rengésből 3 és $M_L > 4$ földrengésből 17 pattant ki. Az első ismert földrengés 1561-re keltezhető, valahol Budán lehetett a török megszállás alatt, mérete $M_L = 5,6$ körülire tehető. Az 1995 utáni földrengések paraméterei a bővülő digitális állomáshálózatnak köszönhetően egyre jobbakká lettek, és az egyre kisebb magnitúdójú események is a katalógusba kerülhettek.

Az 1. táblázat a Kárpát-medencében a főrengés méretének függvényében az elő- és utórengések várható területi és időbeli kiterjedését foglalja össze Zsíros Tibor (2000). A vizsgált ilinyi, érsekvadkerti és hevesi rengések elő-, fő- és utórengéseit ennek alapján minősítettük.

Három jelentősebb rengéssorozatot emelnénk ki a 2013 előtti eseményekből. Az egyik Jászapáti térségében történt 1868. június 21-én, amikor egy $M_L = 4,9$ -es földrengést 38 utórengés követett. A másik Bükkalján, Eger környékéhez köthető, ahol 1925. január 31-én az $M_L = 5$ főrengést követően ismereteink szerint 52 utórengés pattant ki. A harmadik, Dunaharaszti megrázó $M_S = 5,6$ földrengés 1956. január 12-én történt, amelyet kb. 300 utórengés követett, de előrengésről itt sem tudunk.

2002 és 2003 során 7, ill. 8 rengésből álló rengésraj rázta meg ismét Jászapáti környékét $M_L = 3,7$ és $M_L = 3,6$ főrengésekkel. 2010-ben pedig Bükkaranyos–Kistokaj környékén 16 kisebb földrengést regisztrált a hazai hálózat, a legnagyobb rengés mérete az $M_L = 3$ értéket érte el.

Több $M_L > 4$ földrengés esetében nem tudunk utórengésekről. Például Gomba községet 1908. március 15-én egy $M_L = 4,8$ földrengés rázta meg, de elő- és utórengéseket itt



1. ábra Észak-Magyarország vizsgált területének szeizmicitása (47,3°–48,3°É 18,9°–20,9°K) a neotektonikai szerkezetekkel (Horváth et al. 2015). A főrengések mérete alapján az utórengések várható területét mutatják a nagy körök. Zsíros (2000) szerint a hevesi $M_L = 4,8$ főrengés esetén 30 km, az ilinyi $M_L = 4,2$ és érsekvadkerti $M_L = 4,1$ rengéseknél 25 km-en belüli események tekinthetők utórengésnek. A 2013. és 2015.01 közötti időszak földrengései a Gráczner et al. (2014, 2015) és a Tóth et al. (2014, 2015, 2016) által kiadott katalógusokból származnak

Figure 1 Seismicity of the investigated area (47.3°–48.3°N 18.9°–20.9°E) with neotectonic structures (Horváth et al. 2015). Big circles show the expected areas of aftershocks based on mainshock magnitude. According to Zsíros (2000) events within a range of 30 km (Heves $M_L = 4.8$ earthquake); within a range of 25 km (Ilinyi $M_L = 4.2$ and Érsekvadkerti $M_L = 4.1$ earthquakes) can be regarded as aftershocks. (Source of earthquake data: Gráczner et al. 2014, 2015; Tóth et al. 2014, 2015, 2016)

1. táblázat | A Kárpát-medencében kipattant elő- és utórendések várható területi és időbeli kiterjedése a főrendés méretének függvényében
Table 1 | Expected areal and temporal distribution of fore- and aftershocks in the Carpathian basin as a function of main shock size

Főrendés magnitúdója	Érintett terület sugara (km)	Utórendés várható (napig)	Előrendés megelőzi (nappal)
<1,8	5	1	1
1,9–2,7	10	2	1
2,8–3,3	15	5	1
3,4–4,0	20	30	2
4,1–4,7	25	130	4
4,8–5,4	30	260	10

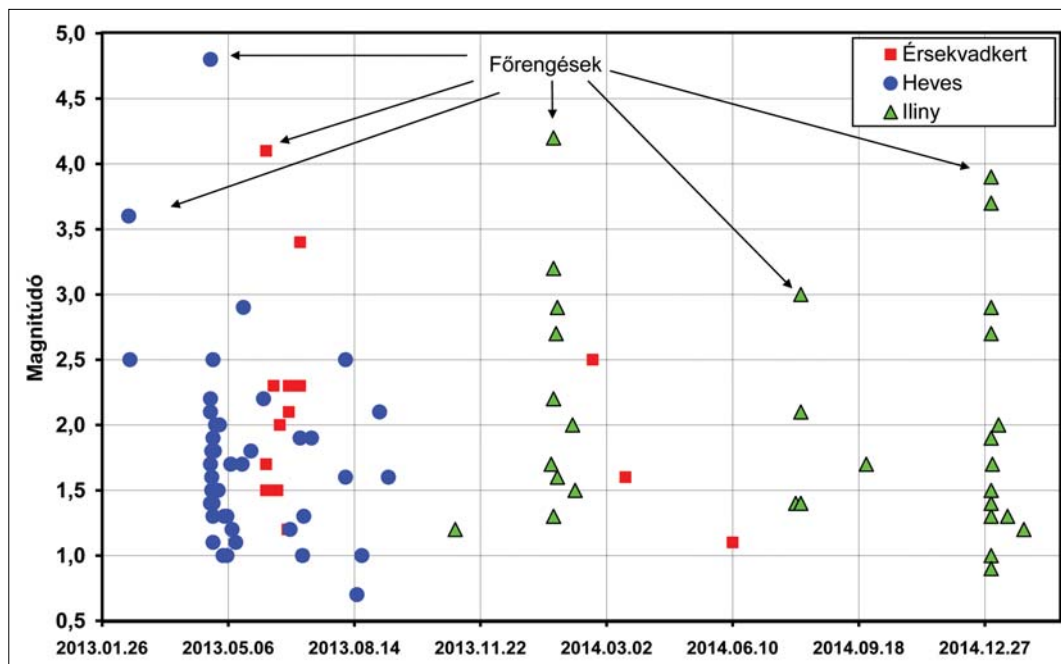
nem figyeltek meg. Gyömrőn 2006. december 31-én regisztráltunk $M_L = 4,1$ földrendést, amelyet 3 nappal később egyetlen utórendés követett.

A hevesi $M_L = 4,8$ főrendés és az azt követő utórendések azért érdekesek, mert ezt megelőzően Heves 10 km-es sugarú környezetében nem volt ismert rengés a teljes, 456-tól keltezett magyarországi katalógusban. Ezek a 2013-as hevesi rendések a Hevestől ÉK-re Eger és Miskolc környékét, illetve a tőle DNy-ra Jászapátit érintő nagyobb rengéssorozatok között foglalnak helyet.

Az 1. ábra alapján Érsekvadkert és Iliny közvetlen közelében neotektonikus aktív szerkezet nem ismert. A rendések kis fészkmélységűek voltak (2–8 km), és minden bizonynyal az Ógyalla–Diósjenő vonalhoz köthetők. Sokat elárulhatnak még a tektonikus viszonyokról a rendések fészkméchanizmusai is.

A rendések idő- és térbeli eloszlása

Az utórendések időbeli történetét a 2. ábra szemlélteti. Érdekes megfigyelés, hogy az ilinyi fészkek rendesei 3 rajban pattantak ki, amelyek főrendéseit előrendések is megelőzték. Heves és Érsekvadkert esetében nincs tudomásunk előrendésekről. A hevesi $M_L = 4,8$ főrendés esetén 30 km, az ilinyi $M_L = 4,2$ és érsekvadkerti $M_L = 4,1$ főrendések esetén 25-25 km sugarú területen belüli rendések tekinthetők utórendéseknek. A hevesi utórendések várható kiterjedése nem érte el Iliny és Érsekvadkert területét, és bár időben a hevesi és érsekvadkerti utórendések átfedésben voltak, e két fészkek rendesei független eseményeknek tekinthetők. Iliny és Érsekvadkert utórendéseinek várható területe viszont nagymértékben átfedték egymást, de az utó-



2. ábra | A rengéssorozatok időbeli története. Iliny három rengéssorozatához előrendések is tartoztak
Figure 2 | Time history of aftershock sequences. In the case three Iliny earthquakes foreshocks also happened

2. táblázat | Az utóregések jellemzői
Table 2 | The characteristics of aftershocks

Főregés helye	Kipattanási idő, magnitúdó	Előregések száma és legnagyobb előregés ideje és mérete	Utóregések száma és a legnagyobb utóregés ideje és mérete
Heves	2013.02.16: $M_L = 3,6$	–	1 2013.02.17: $M_L = 2,5$
Heves	2013.04.22: $M_L = 4,8$	–	40 2013.05.18: $M_L = 2,9$
Érsekvadkert	2013.06.05: $M_L = 4,1$	–	11 2013.06.11: $M_L = 2,5$
Érsekvadkert	2014.02.19: $M_L = 2,5$	–	–
Érsekvadkert	2014.03.17: $M_L = 1,6$	–	–
Érsekvadkert	2014.06.10: $M_L = 1,1$	–	–
Iliny	2014.01.19: $M_L = 4,2$	2 2014.01.17: $M_L = 1,7$	8 2014.01.22: $M_L = 2,9$
Iliny	2014.08.03: $M_L = 3,0$	3 2014.08.03: $M_L = 2,1$	–
Iliny	2014.09.24: $M_L = 1,7$	–	–
Iliny	2015.01.01: $M_L = 3,9$	3 2015.01.01: $M_L = 3,7$	10 2014.01.22: $M_L = 2,9$

regések időpontja alapján e két fészek eseményei is függetlennek vehetők.

Mindhárom fészek esetében elmondható, hogy sokkal kisebb területre terjedtek ki az utóregések, mint ami az *1. táblázat* alapján várható lett volna. A *2. táblázat* a vizsgált utóregés sorozatok néhány jellemzőit összegzi. A hevesi regések egy nagy sorozatot alkottak, a főregést egy gyorsan lecsengő utóregés sorozat követte. A Zsíros-féle elő- és utóregés osztályozást követve elég furcsa, hogy pl. a 2014.06.10-es $M_L = 1,1$ esemény főregésnek minősül, nem pedig a 2013.06.05-ös $M_L = 4,1$ utóregésének. Lehet, hogy az utóbbi 10 évben megnövekedett számú műszeres megfigyelés birtokában újra kell értékelni az osztályzás kritériumait.

A három fészek regéseinek hullámforma-elemzése

Általános tapasztalat, hogy egy nagyobb regést követő utóregések, illetve ugyanabból a fészekből származó földregések rajokba, „klaszterekbe” sorolhatók (Massa et al. 2006; Hage, Joswig 2009; Aster, Scott 1993). Jellemzők még a páros események, a „dublettek”, amelyek szinte teljesen egyformák, és gyakran másodperces vagy esetleg órás késéssel követik egymást. Negatív dubletteket is megfigyeltünk 2008–2011 közötti kínai (Wenchuan) utóregések során (Ma, Wu 2013), amelyek mindhárom csatornán a párjuktól teljesen ellentétes beérkezéseket mutattak. Kialakulásukra egyelőre nincs magyarázat.

A *Magyar Geofizika* hasábjain (Kiszely, Győri 2013) már foglalkoztunk a hullámforma-elemzés módszerével és be-

mutattuk annak eredményeit az Északi-középhegység és Szlovákia déli részén levő bányák robbantásainak és a terület földregéseinek elkülönítése esetében. Akkor a PSZ állomás szeizmométerének 3 komponense közül csak egy, a horizontális (É–D-i) csatornát vizsgáltuk. Jelen munkában már két állomás, a PSZ és PENC esetében a vertikális (SHZ) és a 2 horizontális, É–D (SHN) és K–Ny (SHE) csatorna szeizmogramjain is elvégeztük a hullámformák korrelációs elemzését a Heves, Iliny és Érsekvadkert szűk környezetében kipattant 88 földregés regisztrátumain.

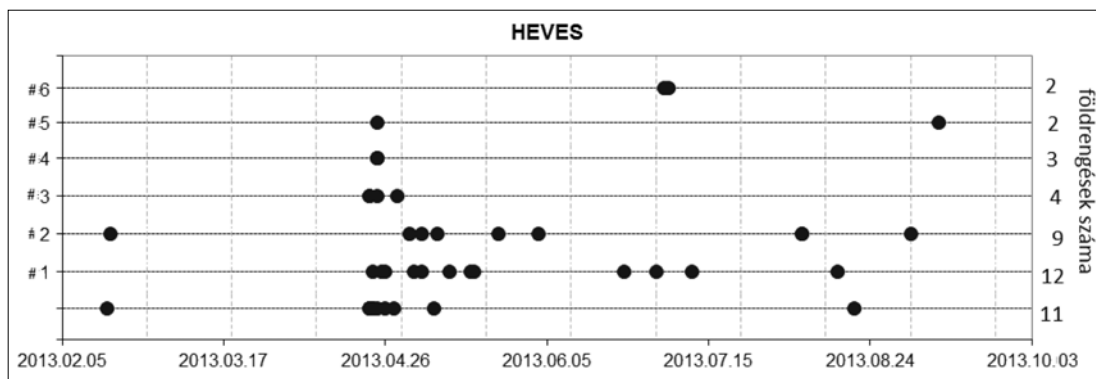
A hullámforma korrelációs elemzése során a piszkástetői és penci állomás minden hullámformáját összehasonlítottuk az adott állomáson rögzített minden más esemény hullámformájával. A hasonlóságot két x és y hullámforma között a c_{xy} korrelációs együtthatóval jellemeztük. Hasonlónak tekintettünk két eseményt, ha egy kritikus paraméter értéke felett kaptuk (pl. $c_{xy} > 0,5$, ami egy nem túl szigorú feltétel). A korrelációs paraméter, mint „távolság” alapján a hullámformák rokonsági ágakba, csoportokba rendezhetők, ezt az egymásra épülő megjelenítést dendrogramnak nevezik. A csoportokba rendezett események száma és a csoportok összetétele változik a kritikus korrelációs együttható értékének változtatásával. A legérdekesebbek a szoros klaszterek esete, amelyek nagyon hasonló fészekmechanizmusú események, és epicentrumaiknak igen közel – pár 100 m-en belül – kell lenniük egymáshoz képest. Ezt a pontosságot a magyarországi állomáshálózat nem teszi lehetővé, általában 1-2 km-es hibával terhelt az epicentrum meghatározása. Jelentős átfedéssel mindkét állomás esetében – eltérő c_{xy} együtthatót alkalmazva – ugyanazok a regések alkottak csoportokat, ami arra utal, hogy a klaszterek elemei állomástól függetlenül összetartoznak. A választott

kritikus korrelációs együtthatót $0,5 < c_{xy} < 0,85$ között változtattuk.

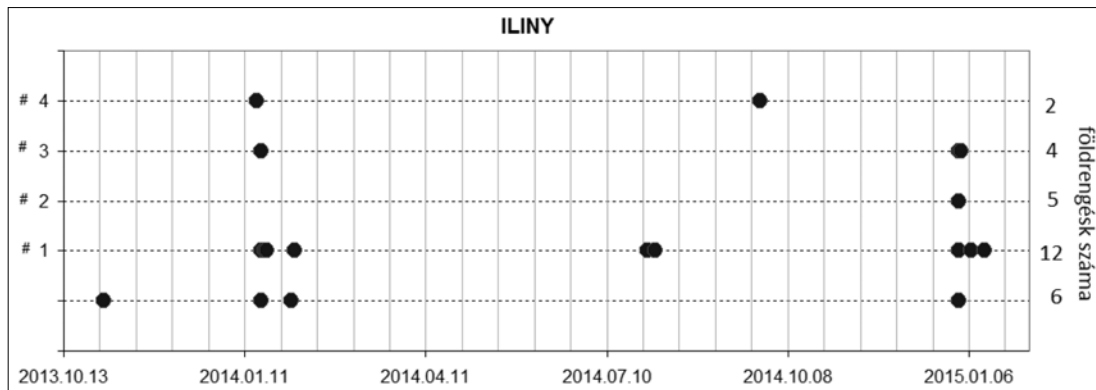
Az állomások 3 komponensének (SHZ, SHN, SHE) szeizmogramjai esetében kapott klaszterek elemei között is nagy volt az átfedés. Az SHZ csatornán azonban kevesebb esemény mutatott hasonlóságot, mint a két horizontális csatorna esetében, ill. több kisebb klaszterre bomlottak fel a horizontális csatornára kapott klaszterek. Ennek oka az lehet, hogy a vertikális csatornán jelentkező P-hullámhoz képest az S-hullám jellemzően 5-ször nagyobb amplitúdóval jelentkezik a horizontális csatornákon, ezért jobban használhatók ez utóbbi szeizmogramok az analízis során. A három fészek utóregései rendkívül hasonló hullámformákkal bírtak, részletes elemzésük szerint 75% egy vagy több klaszterbe rendezhető.

A hevesi, ilinyi és érsekvadkerti rengések epicentrum paramétereit és klaszterbesorolását (sorszámát) az 1–3 Mellékletek táblázatai tartalmazzák. Mivel az S-hullám nagyobb amplitúdóval jelentkezik a horizontális csatornákon, a hullámformák részletes elemzésére az egyik, nevezetesen az É–D-i horizontális csatornát választottuk ki (e választásnak nincs különösebb oka, akár a K–Ny-it is választhattuk volna). Az 1–3 Mellékletekben a PSZ és PENC állomásokra kapott klaszter sorszáma is látható. A PENC hullámformái alapján kapott eredmények megerősítették, hogy a klaszterek elemei biztosan összetartoznak, mert nagy átfedéssel ugyanazok a rengések alkották itt is csoportokat, mint a PSZ hullámformái esetében.

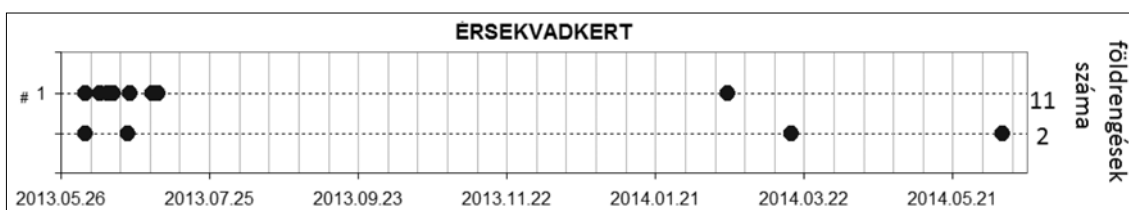
Az 3–5. ábrán a 3 fészek klaszterelemeinek időtörténete látszik ($c_{xy} > 0,5$ feltétel esetén). A legelső vonalon azok az



3. ábra | A hevesi klaszterek elemeinek időtörténete. A klaszterek jelölése #1 és #6 között az ábra bal oldalán látható. A klaszterbe nem kerülő események a legelső vonalon sorakoznak
Figure 3 | The time history of aftershock sequences of Heves. The designation of clusters between #1 and #6 can be seen on the left side of the picture. Events not belonging to any cluster are signed on the bottom line of the figure



4. ábra | Az ilinyi klaszterek elemeinek időtörténete
Figure 4 | The time history of aftershock sequences of Iliny



5. ábra | Az érsekvadkerti klaszter elemeinek időtörténete. Itt néhány rengést kivéve egyetlen klaszterbe rendeződtek az utóregések
Figure 5 | The time history of aftershock sequences of Érsekvadkert. Here all but a few events belong to a single cluster

3. táblázat | Heves, Iliny és Érsekvadkert utó rengéseinek alapvető paraméterei
Table 3 | Main parameters of Heves, Iliny and Érsekvadkert aftershocks

Földrengés helye	Utó rengések valódi kiterjedése (sugarú kör, km)	Földrengések száma és magnitúdója (legkisebb–legnagyobb)	Klaszterek száma ($c_{xy} > 0,5$)	Klaszterek elemeinek száma (%) ($c_{xy} > 0,5$)	Klaszterek száma ($c_{xy} > 0,85$)	Klaszterek elemeinek száma (%) ($c_{xy} > 0,85$)
Heves	15	43, $M_L = 0,7-4,8$	6	32 (74%)	3	6 (14%)
Iliny	5	30, $M_L = 0,9-4,2$	4	23 (76%)	4	10 (30%)
Érsekvadkert	5	15, $M_L = 1,1-4,1$	1	11 (73%)	1	2 (13%)

események maradtak, amelyek egyetlen klaszterbe sem tartoztak bele. A klaszterek '#1', '#2', ... jelölése a függőleges tengelyen, a bal oldalon látható, a jobb oldalon pedig a klaszterbe eső rengések száma olvasható. Érdekes, hogy a hevesi és ilinyi fészkek esetében voltak olyan klaszterek, amelyek rövid ideig tartottak: hevesi #4 (3 óra) és ilinyi #2 (10 óra), de megfigyelhetők voltak olyanok is, amelyek elemei hosszú időtartamot, több hónapot öleltek át (pl. hevesi #1 és ilinyi #1 klaszterek). Érsekvadkert esetében az utó rengések közül 11 alkotott egyetlen klasztert.

Nagyon kevés rengés fészkekmechanizmusa ismert, mivel kis méretük miatt kevés állomás regisztrálta azokat. Az ismert fészkekmechanizmus-megoldásokat a *Melléklet* táblázatainak utolsó oszlopa (FM) tartalmazza. Azt mondhatjuk, ha egy szoros klaszterben van egy ismert fészkekmechanizmusú elem, akkor a többi esemény fészkekmechanizmusának is ehhez hasonlóknak kell lennie.

A 3. táblázatban a három fészkek jellemzőit összegeztük a $c_{xy} > 0,5$ és $c_{xy} > 0,85$ kritériumok etében. A klaszterekbe rendeződött események magnitúdója között akár 2 fokozat különbség is előfordult, és időbeli kiterjedésük több hónapot, egy esetben majdnem 1 évet is kitett (Iliny #1). Ez arra utal, hogy a korábbi fészkek körüli szűk területen egy újabb, a korábbihoz hasonló mechanizmusú elmozdulás okozott ismét földrengést.

A 4. táblázatban a szigorúbb feltételeknek ($c_{xy} > 0,85$) megfelelő rengések időpontját és méretét listáztuk. Egy 4 elemű ilinyi csoportot leszámítva 2-2 elemből állnak a kapott klaszterek. A dublettek nagyon kis idő- és magnitúdó-különbséggel jelentkező ($\Delta M_L = 0,4$ és $\Delta t = 2$ nap), feltűnően hasonló hullámformával rendelkező rengéspárok. Keletkezésük mechanizmusa még nem tisztázott (Kagan et al. 1999). Itt is található azonban olyan pár, amelynek idő-különbsége kevesebb, mint 1 nap, de méretük a kritériumnál jobban eltért. Majdnem 1 év volt viszont néhány hasonló méretű pár időpontja között a különbség. Ez az eseménypár a nagy időkülönbség miatt nem tekinthető dublettnak.

Viszont a $c_{xy} > 0,85$ feltételnek megfelelő események között van két olyan rengés, amelynek sikerült meghatározni a fészkekmechanizmusát. Ezeket pirossal jelöltük a 4. táblázatban, és az elmélet szerint az ezekkel egy klaszterben levő további rengés(ek)nek is az ismerthez nagyon hasonló a fészkekparaméterekkel kell rendelkeznie. Az érsekvadkerti utó rengések esetében egy dublett sem tartalmazott ismert fészkekmechanizmusú rengést.

Érdekes megfigyelés, hogy a $M_L > 4$ főrengések nem kerültek bele egy klaszterbe sem. Ezek a főrengések egyedi hullámformát mutattak.

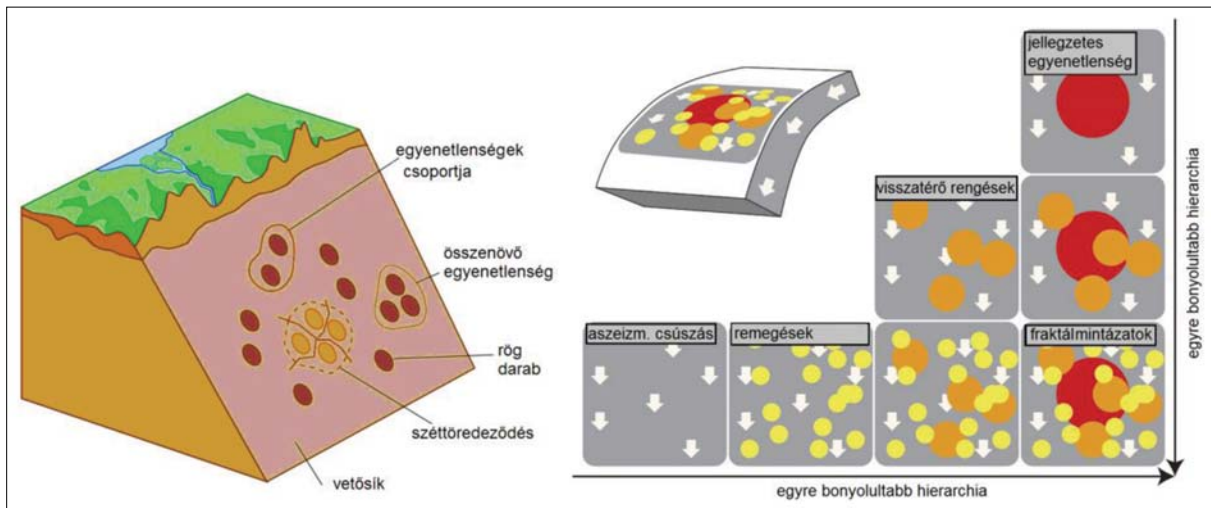
4. táblázat | A dublettek paraméterei ($c_{xy} > 0,85$) és egy 4-es csoport Iliny esetében (a pirossal jelölt eseményeknek ismert a fészkekmechanizmusa)
Table 4 | The parameters of doublets ($c_{xy} > 0.85$) and a class with four events in the case of Iliny (events indicated with red have focal mechanism solutions)

Földrengés helye	#1 Δt	#2 Δt	#3 Δt	#4 Δt
Iliny	2014.01.22 12:13 $M = 2,9$	2014.08.03 1:10 $M = 2,1$	2014.01.17 4:22 $M = 1,7$	2014.01.19 16:40: $M = 2,2$ 2014.01.19 19:36: $M = 1,3$ 2015.01.01 11:55: $M = 1,4$ 2015.01.02 1:44: $M = 1,7$ $\Delta t = 176$ perc; 346 nap; 13,8 h
	2014.01.22 12:49 $M = 1,6$ $\Delta t = 36$ perc	2014.08.03 1:13 $M = 1,4$ $\Delta t = 3$ perc	2014.09.24 16:38 $M = 1,7$ $\Delta t = 250$ nap	
Heves	2013.05.05 20:59 $M = 1,3$	2013.05.17 4:23 $M = 1,7$	2013.05.02 20:07 $M = 1,0$	
	2013.06.24 23:06 $M = 1,1$ $\Delta t = 50$ nap	2013.07.02 17:44 $M = 1,9$ $\Delta t = 46$ nap	2013.09.03 4:29 $M = 2,1$ $\Delta t = 124$ nap	
Érsekvadkert	2013.06.23 3:47 $M = 2,3$			
	2013.07.02 19:47 $M = 2,3$ $\Delta t = 9,6$ nap			

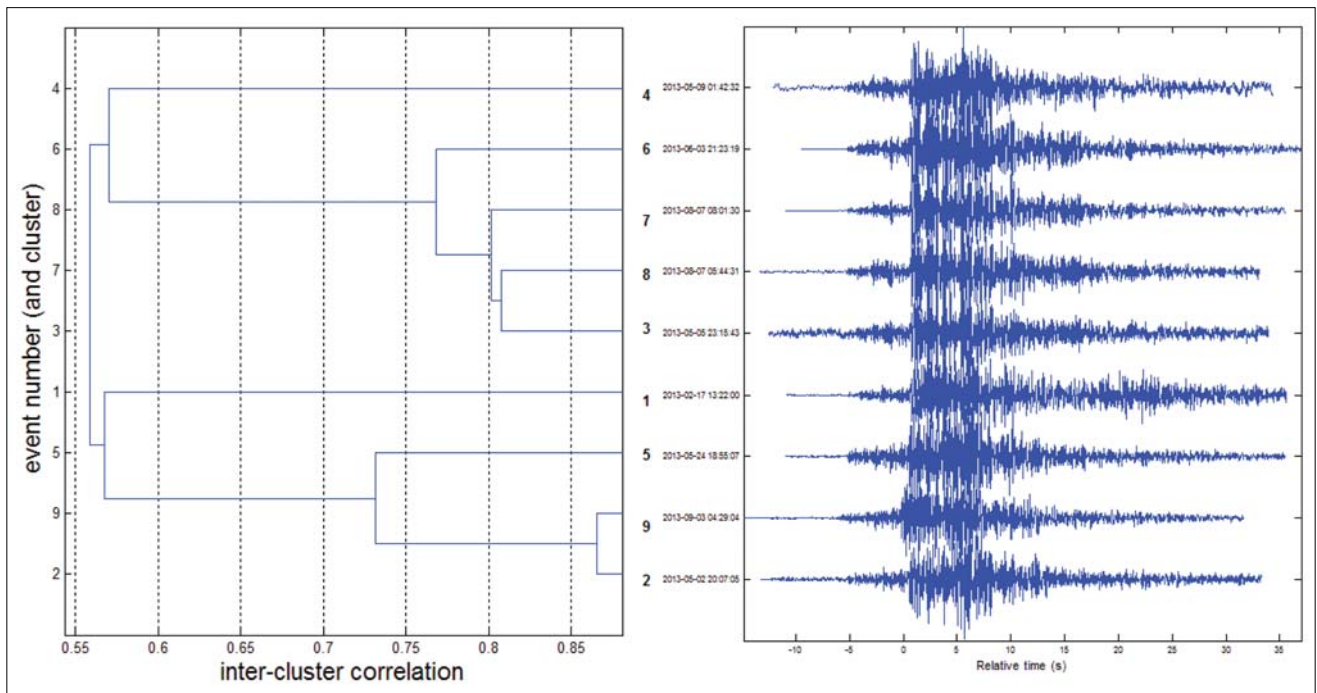
A klaszterek szemléltetése vetők egyenetlenségeivel

A rengéssorozatok jellemzőit másként is szemléltethetjük (6. ábra). Ennek alapja a vetőfelület egyenetlenségeinek összenövő–felszakadó (fusion–fission) modellje, amelyet a szubdukciós lemezek esetében használnak (Matsuzawa et al. 2004; Cheong et al. 2014). A vetőfelület egyenetlenségeinek modellje feltételezi, hogy vetősík számtalan elemből (egyenetlenségből „asperity”) rakódik össze, amelyek egymás mellett elcsúsznak, és szétoszlatják az ütköző tektoni-

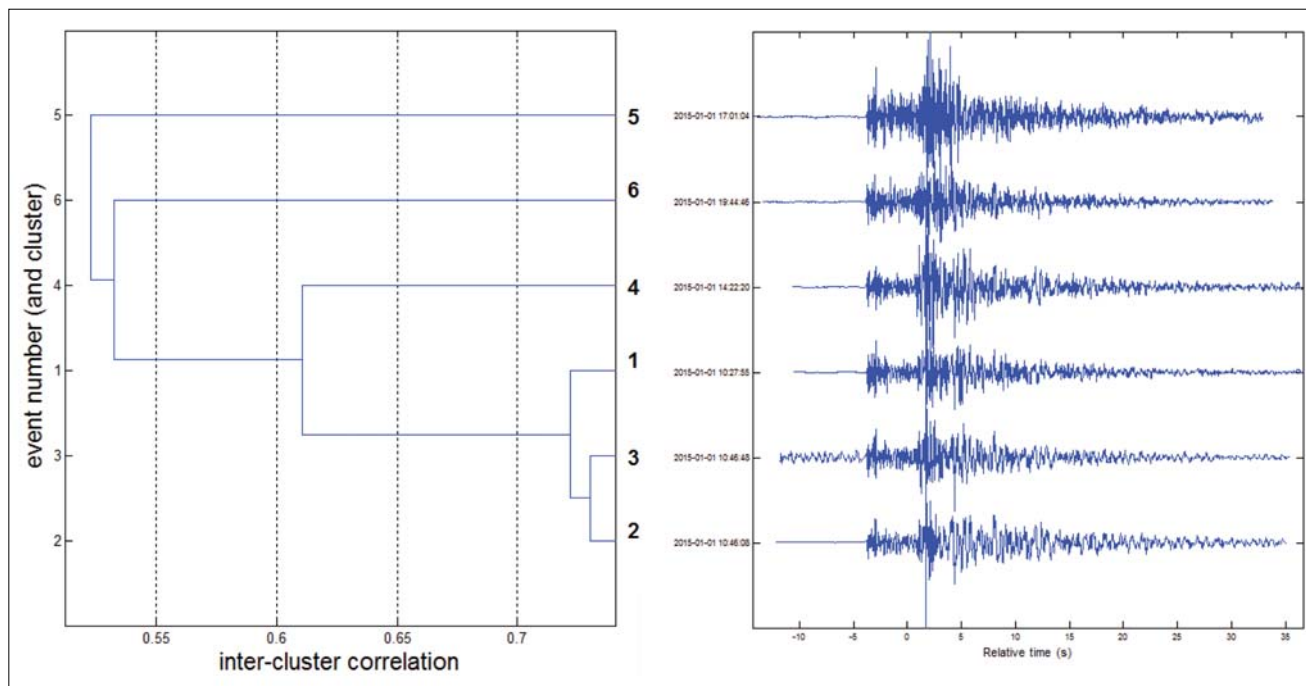
kai lemezek energiáját. Néha ezek az egyenetlenségek megakadnak, ami nagy kompressziós vagy nyírófeszültségek felhalmozódását okozzák. Erős erőhatás következtében a kisebb elakadt darabok nagyobbakká állnak össze. Amikor két jelentős darab végül elcsúszik egymás mellett, a kényes egyensúly felbomlik, a felakadt egyenetlenségek elemekre bomlanak, és a felhalmozódott energia földregés formájában szabadul fel. A szerzők feltételezése szerint a vető felületének ugyanazon egyenetlenségei mentén történő, ugyanolyan irányú elmozdulások okozzák az egymáshoz hasonló hullámformájú földregéseket. Vannak hosszabb időszakot



6. ábra | A vetőegyenetlenség és a rengéssorozatok fraktáljellemezőinek szemléltetése
 Figure 6 | Illustration of the asperity and the fractal properties of fault



7. ábra | A hevesi $c_{xy} > 0,5$ #2 klaszter dendrogramja és az azoknak megfelelő szeizmogramok. A számok sorrendjében követték egymást a földregések. Az egymást követő események egyre jobban hasonlítottak egymáshoz, ami az „összenövő egyenetlenség” jelenségével magyarázható
 Figure 7 | The dendrogram of $c_{xy} > 0.5$ #2 cluster and their seismograms. Numbers represent the temporal order of earthquakes. The successive events are becoming more and more similar to each other, which is explained by the “coalescing asperity” phenomenon



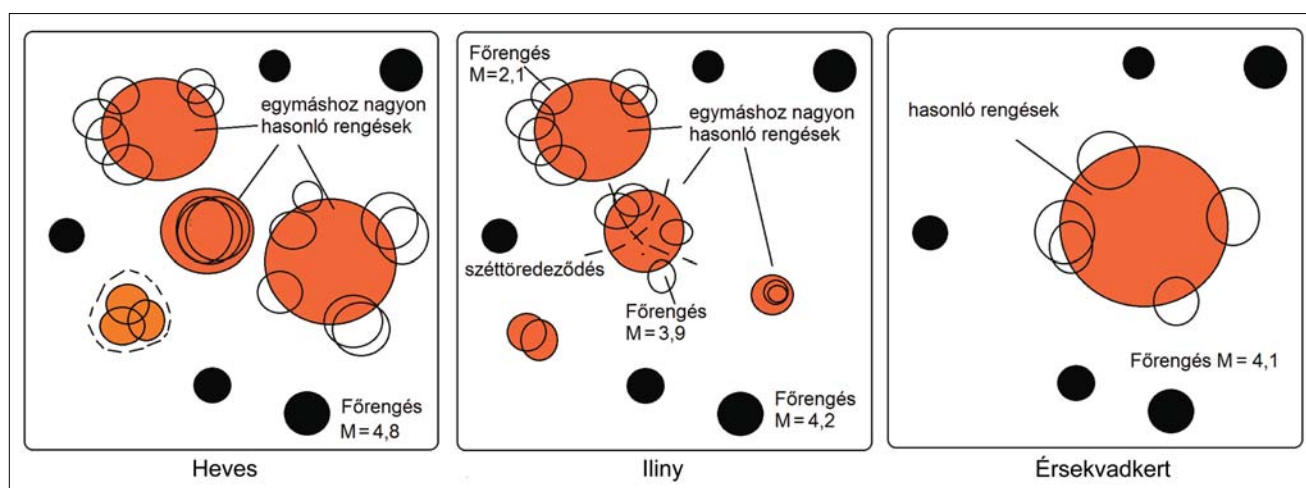
8. ábra | Az illyi $c_{xy} > 0,5$ #2 klaszter dendrogramja és az azoknak megfelelő szeizmogramok. A számok sorrendjében követték egymást a rengések. Az egymást követő események egyre kisebb mértékben hasonlítottak egymáshoz, ami „széttöredezős”-re utal
Figure 8 | The dendrogram of $c_{xy} > 0,5$ #2 Illy cluster and their seismograms. The numbers represent the temporal order of earthquakes. The successive events are becoming less and less similar to each other, which is explained by the “fragmenting asperity” phenomenon

(hónapokat) átölő klaszterek, ezek állandó vetőegyenletlenségekre vezethetők vissza, és észlelhetők csak rövidebb ideig (1-2 napig) aktív egyenletlenségek.

Nagy merészség volna részünkről ezt a modellt a Kárpát-medence sekély fészku rengéseire alkalmazni, de a korrelációs elemzés alapján ennek az „asperity” modellnek egyes elemei felismerhetők a vizsgált rengéssorozatok esetében. Megfigyeltünk a hevesi #2 klaszter esetében egy „összenő-

vő” egyenletlenséget, amikor az egymást követő rengések egyre jobban hasonlítottak egymáshoz (7. ábra). Az illyi #2 klaszter esetében pedig az elváló, távolodó egyenletlenséget, azaz széttöredezősést lehetett megfigyelni a hullámformák hasonlósága alapján (8. ábra).

A vizsgált 3 fészku klasztereinek tulajdonságait szemléltető összefoglaló 9. ábra pedig a különálló (magányos) és klaszterbe sorakozó események eltérő jellegét szemlélteti.



9. ábra | A klaszterek tulajdonságait szemléltető ábrák Heves, Illy és Érsekvadkert esetében. A fekete körök magányos, egyszeri eseményt szemléltetnek, a nagyobb narancssárga körök olyan vetőrészek, ahol ismétlődően földrengés keletkezett. Heves esetében egy „összenővő egyenletlenség” és Illy esetében „széttöredezősés”

Figure 9 | Illustrations of clusters in the case of Heves, Illy and Érsekvadkert. The black circles indicate the lonely, single events, the larger orange circles indicate the area of fault where earthquakes occurred repeatedly. In case of Heves “fragmenting asperity” while in case of Illy “coalescing asperity” could be observed

A klaszterek szemléltetése az elő- és utó-rengések, valamint a magányos események számarányával

Számtalan munka született, amely a klaszterek tulajdonságait elemzi és próbálja a kéreg valamilyen fizikai tulajdonságához kötni. Klasztereknek tekinthetjük a homogén Poisson-eloszlásnak megfelelő független események mellett kipattant, nem független eseményeket. (Ebben az esetben a klaszter kritériuma nem a hasonló hullámforma.) Zaliapin és Ben-Zion (2013a, 2013b) Baja kaliforniai földrengés-katalógusa alapján elemezték a klaszterek számát, területi kiterjedését. Azt találták, hogy az alacsony és magas hőáramú kéreg területein eltérő a klaszterek megjelenése. Magyarországon a hőáram sűrűsége 80–100 mW/m² körüli, és több eltérő hőáramú terület rajzolódik ki (Horváth et al. 2005). Érsekvadkert és Iliny utórengései egy alacsonyabb, míg a hevesi rengéssorozat valamivel magasabb hőáramú területen pattantak ki.

A raj (*swarm*) jellegű klaszterek magasabb hőáramú (csökkent effektív viszkozitású) területen gyakoribbak. Ezeket nagyszámú rengéssorozat jellemzi, nagyobb területi és elnyújtottabb időbeli kiterjedéssel. Az előrengések aránya is nagy.

A robbanásszerű (*burst*) sorozatok hidegebb kéregrészek (megemelkedett effektív viszkozitású) területeken gyakoribbak. Jellemzően kisebb arányban jelentkeznek itt előrengések, rövid időtartamban és kisebb területi kiterjedésben, mint az előbb ismertetett rajok.

Hazai viszonylatban nagyon óvatosan lehet a sokkal kisebb számú utórengések tulajdonságairól bármit mondani. Míg Érsekvadkert esetében nem volt előrengés és nagyon gyorsan lecsengtek az utórengések, addig Iliny esetében voltak előrengések, de jellemző volt az itt megfigyelt 3 sorozat gyors lecsengése (ennek oka a főrengés kisebb mérete is). A hevesi $M_L = 4,8$ főrengéshez kapcsolódó utórengések kis területre kiterjedő, gyorsan lecsengő események voltak.

Összefoglalás

2013. és 2015.01 között Iliny, Érsekvadkert és Heves térségében közepes méretű rengések és azokat követő utórengések pattantak ki. A két legközelebbi állomáson regisztrált hullámformák elemzése az alábbi eredményeket adta.

- 1) A PSZ és PENC állomás hullámformái által alkotott klaszterek elemei nagyrészt ugyanazokat a rengéseket tartalmazták, mint a PENC állomás hullámformái által kapott klaszterek. Esetleg a PSZ állomás egyik klasztere több kisebbre bomlott a PENC hullámformái esetében.
- 2) A legnagyobb $M_L > 4$ főrengések hullámformái egyediek voltak, nem kerültek bele egyik klaszterbe sem.
- 3) Két olyan esemény került 1-1 klaszterbe, amelynek epicentrumát korábban a kevés észlelési adat miatt nem sikerült meghatározni. A hullámformák korrelá-

ciója révén ezeket az eseményeket is az utórengések rájáához lehetett kapcsolni.

- 4) A földrengések kis mérete miatt az epicentrum horizontális hibája nagy, és a mélység meghatározás is pontatlan. A szoros dublettek ($c_{xy} > 0,85$) kiegészítő információt adtak az epicentrumok térbeli elhelyezkedéséről és fészekmechanizmusokról.
- 5) A rengések spektrumaira elvégzett korrelációs elemzés a hullámformák klasztereivel nagyrészt megegyező csoportokat mutatott ki. (Ennek részletes elemzése még folyamatban van.)
- 6) A rengéseknek mintegy 75%-a mindhárom területen a hullámformák hasonlósága alapján klaszterekbe rendeződött.
- 7) A Kárpát-medence földrengéseinek elő-, fő- és utórengés-besorolása megérett egy revízióra a megnövekedett számú, kisméretű esemény megfigyelés birtokában.

Köszönetnyilvánítás

A cikk a 105399. számú OTKA pályázat keretében végzett kutatás része. Szeretnénk megköszönni a GeoRisk Földrengés Mérnöki Irodának, hogy a PENC állomás hullámformáit a korrelációs vizsgálatban felhasználhattuk.

A tanulmány szerzői

Kiszely Márta, Mónus Péter, Tóth László, Győri Erzsébet





Hivatkozások

- Aster R. C., Scott J. (1993): Comprehensive characterization of waveform similarity in microearthquakes data set. BSSA 83, 1307–1314
- Cheong S. A., Tan T. L., Chen C.-C., Chang W.-L., Liu Z., Chew L. Y., Sloot P. M. A., Johnson N. F. (2014): Short-term forecasting of Taiwanese earthquakes using a universal model of fusion-fission processes. Scientific Reports 4, 3624, 10 January 2014
- Grácz Z. (szerk.), Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T. (2014): Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2013. Budapest: MTA CSFK GGI p. 466
- Grácz Z. (szerk.), Czifra T., Czanik Cs., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T. (2015): Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2014. Budapest: MTA CSFK GGI p. 563.
- Hage M., Joswig M. (2009): Mapping local microseismicity using short-term tripartite small array installations – Case study: Coy region (SE Spain), Tectonophysics 471, 225–231
- Horváth F., Bada G., Windhoffer G., Csontos L., Dövényi P., Fodor L., Grenerczy Gy., Síkhegyi F., Szafián P., Székely B., Timár G., Tóth L., Tóth T. (2005): A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza. T034928. sz. OTKA, http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin_atlas.htm
- Kagan Y. Y., Jackson D. D. (1999): Worldwide doublets of large shallow earthquakes. BSSA 89, 1147–1155
- Kiszely M., Győri E. (2013): Az Északi-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése. Magyar Geofizika 54/4, 185–203


- Ma X. J., Wu Z. L. (2013): Negative repeating doublets in an after-shock sequence. *Earth Planets Space* 65/8, 923–927, DOI: 10.5047/eps
- Massa M., Eva E., Spallarossa D., Eva C. (2006): Detection of earthquake clusters on the basis of waveform similarity: An application in the Monferrato region (Piedmont, Italy). *Journal of Seismology* 10, 1–22
- Matsuzawa T., Uchida N., Igarashi T., Okada T., Hasegawa A. (2004): Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan. *Earth Planets Space* 56, 803–811
- Mészáros E., Schweitzer F. (2002): *Magyar tudománytár 1. – Föld, víz, levegő.* MTA Kossuth Kiadó: Budapest, p. 512
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2014): *Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2013.* GeoRisk: Budapest, 136 o.
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2015): *Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2014.* GeoRisk: Budapest, 140 o.
- Tóth L., Mónus P., Kiszely M. (2016): *Magyarországi földrengések évkönyve – Hungarian Earthquake Bulletin – 2015.* GeoRisk: Budapest, 132 o.
- Zaliapin I. V., Ben-Zion Y. (2013a): Spatio-temporal evolution of seismic clusters in southern and central California, American Geophysical Union. Fall Meeting, abstract
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. (2013b): Earthquake clusters in southern California II: Classification and relation to physical properties of the crust. *J. Geophys. Res.* 118, 2865–2877, DOI: 10.1002/jgrb.50178
- Zsíros T. (2000): *A Kárpát-medence szeizmicitása és földrengés veszélyessége: Magyar földrengés katalógus (456–1995).* MTA GGKI: Budapest

Melléklet





1. táblázat Heves község környezetében kipattant földrengések paraméterei és a klaszterek besorolása PSZ és PENC hullámformái alapján (A PSZ és PENC állomásokra vett kritikus korrelációs együttható értéke eltérő. PENC esetében szigorúbb feltétel esetén váltak több klaszterre a földrengések)

N	Dátum	Óra	Perc	Szél.	Hossz.	h (km)	M_L	PSZ $c_{xy} > 0,5$	PENC $c_{xy} > 0,75$	FM
1	2013.02.16	17	18	47,643	20,269	10	3,6			
2	2013.02.17	13	21	47,647	20,3	1	2,5	#2		
3	2013.04.22	22	28	47,650	20,302	10	4,8			
4	2013.04.22	22	33	47,650	20,187	10	1,7			
5	2013.04.22	22	37	47,667	20,188	17	1,4			
6	2013.04.22	23	1	47,614	20,285	10	2,1	#3	#2	
7	2013.04.22	23	24	47,637	20,304	5	2,2	#3	#2	
8	2013.04.23	3	30	47,667	20,309	10	1,6			
9	2013.04.23	4	23	47,667	20,214	10	1,5			
10	2013.04.23	13	31	47,667	20,291	14	1,8	#1	#1	
11	2013.04.24	1	9	47,667	20,333	10	1,4	#4	#3	
12	2013.04.24	1	40	47,667	20,146	10	1,1	#4	#3	
13	2013.04.24	3	39	47,636	20,304	3	2,5	#4	#3	
14	2013.04.24	15	53	47,667	20,318	10	1,9	#5		
15	2013.04.24	21	2	47,595	20,25	6	1,3			
16	2013.04.24	22	39	47,571	20,264	10	1,8	#3	#2	
17	2013.04.25	13	42	47,667	20,324	10	1,8	#1		
18	2013.04.26	9	14	47,667	20,323	10	2,0	#1		
19	2013.04.26	18	57	47,610	20,267	6	1,5			
20	2013.04.28	7	1	47,721	20,167	10	1,5			
21	2013.04.29	13	58	47,667	20,304	10	2,0	#3	#2	
22	2013.05.02	20	6	47,723	20,369	1	1,0	#2		
23	2013.05.03	17	52	47,67	20,317	10	1,3	#1		
24	2013.05.05	20	58	47,716	20,299	4	1,3	#1	#1	




1. táblázat | (folyt.)

N	Dátum	Óra	Perc	Szél.	Hossz.	h (km)	M _L	PSZ c _{xy} > 0,5	PENC c _{xy} > 0,75	FM
25	2013.05.05	23	15	47,649	20,251	4	1,0	#2	#4	
26	2013.05.08	20	49	47,647	20,347	13	1,7			
27	2013.05.09	1	42	47,669	20,327	10	1,2	#2		
28	2013.05.12	21	10	47,639	20,248	6	1,1	#1		
29	2013.05.17	4	23	47,675	20,298	16	1,7	#1	#1	
30	2013.05.18	20	34	47,654	20,296	10	2,9	#1	#1	
31	2013.05.24	18	54	47,663	20,286	0	1,8	#2		
32	2013.06.03	21	23	47,667	20,289	1	2,2	#2		
33	2013.06.24	23	6	47,669	20,295	0	1,2	#1		
34	2013.07.02	17	44	47,652	20,274	1	1,9	#1	#1	
	2013.07.04	2	28	?	?			#6		
35	2013.07.05	19	34	47,633	20,243	1	1,3	#6		
36	2013.07.11	6	10	47,641	20,254	1	1,9	#1	#1	
37	2013.08.07	5	44	47,677	20,273	1	1,6	#2		
38	2013.08.07	8	1	47,626	20,415	6	2,5	#2	#4	
39	2013.08.16	0	55	47,671	20,296	2	0,7	#1		
40	2013.08.20	9	48	47,644	20,268	0	1,0			
41	2013.09.03	4	28	47,665	20,261	3	2,1	#2		
42	2013.09.10	2	7	47,658	20,348	10	1,6	#5		



2. táblázat | Iliny község környezetében kipattant földrendések alapvető paraméterei és a klaszterek besorolása (PSZ és PENC állomásokra vett kritikus korrelációs együththató értéke megegyezik)

N	Dátum	Óra	Perc	Szél.	Hossz.	h (km)	M _L	PSZ c _{xy} > 0,65	PENC c _{xy} > 0,65	FM
1	2012.07.16	9	36	47,964	19,435	14	1,3			
2	2013.11.02	4	36	47,972	19,455	10	1,2			
3	2014.01.17	4	22	48,039	19,438	10	1,7	#4	#3	
4	2014.01.19	1	34	48,025	19,435	2	4,2			
5	2014.01.19	1	48	48,017	19,418	4	3,2		#1	
6	2014.01.19	16	40	48,037	19,458	0	2,2	#2	#2	
7	2014.01.19	19	36	48,061	19,442	10	1,3	#2	#2	
8	2014.01.21	1	6	48,021	19,433	4	2,7	#1	#1	
9	2014.01.22	12	13	48,011	19,399	3	2,9	#1	#4	
10	2014.01.22	12	49	48,043	19,427	8	1,6	#1	#4	
11	2014.02.03	23	57	48,037	19,417	0	2,0			
12	2014.02.05	12	28	48,037	19,432	1	1,5	#1	#5	
13	2014.07.30	1	52	48,030	19,443	7	1,4			
14	2014.08.03	1	10	48,039	19,397	1	2,1	#1	#1	

2. táblázat | (folyt.)

N	Dátum	Óra	Perc	Szél.	Hossz.	h (km)	M_L	PSZ $c_{xy} > 0,65$	PENC $c_{xy} > 0,65$	FM
15	2014.08.03	1	12	48,034	19,404	8	1,4	#1	#1	
16	2014.08.03	1	48	48,033	19,397	2	3,0	#1	#1	
17	2014.09.24	16	38	48,032	19,438	8	1,7	#4	#3	
18	2015.01.01	6	43	48,029	19,381	3	3,7	#1		
19	2015.01.01	7	8	48,048	19,398	5	1,0			
20	2015.01.01	10	27	48,030	19,429	7	1,9	#3		
21	2015.01.01	10	45	48,032	19,396	4	3,9	#3		
	2015.01.01	10	46	?	?					
22	2015.01.01	11	0	48,035	19,409	5	0,9			
23	2015.01.01	11	5	48,056	19,411	1	1,3			
24	2015.01.01	11	55	48,029	19,421	5	1,4	#2	#2	
25	2015.01.01	14	22	48,036	19,390	2	2,9	#3		
26	2015.01.01	17	0	48,040	19,420	5	1,5			
27	2015.01.01	19	44	48,042	19,382	3	2,7			
28	2015.01.02	1	44	48,042	19,420	4	1,7	#2	#2	
29	2015.01.07	13	48	48,036	19,404	3	2,0			
30	2015.01.14	8	54	48,040	19,426	5	1,3		#5	
31	2015.01.27	22	35	48,000	19,336	7	1,2			

3. táblázat | Érsekvadkert község környezetében kipattant földrendések paraméterei és a klaszterek besorolása (PENC esetében is csak egyetlen klaszterbe kerültek az események)

N	Dátum	Óra	Perc	Szél.	Hossz.	h (km)	M_L	PSZ $c_{xy} > 0,5$	FM
1	2013.06.05	18	45	47,993	19,216	4	4,1		
2	2013.06.05	20	46	47,98	19,252	6	1,7	#1	
3	2013.06.05	22	0	47,992	19,228	2	1,5	#1	
4	2013.06.11	5	31	47,995	19,226	5	2,3	#1	
5	2013.06.14	6	35	48,009	19,244	10	1,5	#1	
6	2013.06.16	15	10	48,000	19,236	5	2,0	#1	
7	2013.06.22	15	32	47,846	19,127	10	1,2		
8	2013.06.23	3	47	47,989	19,208	2	2,3	#1	
9	2013.06.23	15	47	47,985	19,242	5	2,1	#1	
10	2013.07.02	19	7	47,987	19,204	4	3,4	#1	
11	2013.07.02	19	47	47,990	19,198	5	2,3	#1	
	2013.07.04	15	22	?	?			#1	
12	2014.02.19	15	54	48,007	19,233	6	2,5	#1	
13	2014.03.17	7	22	47,903	19,144	0	1,6		
14	2014.06.10	3	41	47,935	19,181	8	1,1		