

A 2013. évi Heves megyei földrengéssorozat helymeghatározása többeseményes algoritmussal

CZECZE B.^{1,@}, SÜLE B.², BONDÁR I.²

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

²Magyar Tudományos Akadémia, Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont,
Geodéziai és Geofizikai Intézet, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium,
1112 Budapest, Meredek u. 18.

@E-mail: czece.barbara@gmail.com

2013. április 22-én Heves megye területén, Tenk közelében kipattant egy 4,8-as lokális magnitúdójú földrengés. A két kisebb előrengés ($M_L = 3,6; 2,5$) utáni főrengést további 27 utórengés követte 0,7 és 2,9 közötti magnitúdóval. A rutinszerűen meghatározott hipocentrumok paraméterei gyakran nagy hibával terhelt eredményeket szolgáltatnak, ezért a régió szeizmotektonikájának jobb megismerése érdekében relatív helymeghatározó algoritmus segítségével ismételt kiszámítottuk a hipocentrumok paramétereit, valamint növeltük a felhasznált adatbázis minőségét. A Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletinben (HNSB) szereplő beérkezési időket újra kimértük az eredeti hullámformákból, ezzel növelve az adatok megbízhatóságát és pontosságát. Hullámforma-korrelációs eljárást alkalmaztunk a differenciális időadatok kinyerése érdekében. A kettős differencia (*double-difference*) többeseményes helymeghatározó módszert különböző bemeneti adatokkal alkalmaztuk annak érdekében, hogy láthatóvá váljon a megismételt fáziskimérések, kezdeti hipocentrumok, különböző sebességmodellek jelentősége a végső megoldásban. Az új hipocentrumokra vetősíkot illesztve jó egyezést kaptunk a főrengés egyik fészekmechanizmus megoldásával. Az eredmények minden bemutatott lépéssel javultak, összehasonlítva a rutinszerűen meghatározott hipocentrumokkal. Az eredmények megmutatják, hogy a többeseményes algoritmus alkalmazása jelentősen növeli a szeizmicitásról alkotott képet kis utórengéssorozat esetén is.

Czece, B., Süle, B., Bondár, I.: Multiple event relocation of the 22 April 2013, $M_L = 4.8$ Tenk (Hungary) earthquake aftershocks

The Tenk (Hungary) earthquake ($M_L = 4.8$) occurred on 22 April 2013. The mainshock was preceded by two minor foreshocks ($M_L = 3.6, 2.5$) and was followed by 27 aftershocks with magnitudes between $M_L = 0.7-2.9$. The routinely determined locations (single-event location method) often suffer from high uncertainty and location bias. Thus, these parameters are rarely capable to reveal the seismotectonic behavior of a region. We reduced the location errors by multiple-event relocation methods, and improved the quality of the dataset. The routinely picked arrival times in the Hungarian National Seismological Bulletin (HNSB) were manually repicked to increase the consistency and accuracy of the P and S arrivals. Waveform cross-correlation was used to obtain differential times. We applied the double-difference method with different datasets to investigate the influence of repicked P and S arrival times, initial hypocenters and different velocity models on the relocation process. The best fitting plane to the new hypocenters shows a good agreement with the focal mechanism solutions. The results improved after each step, compared to the original, routinely determined locations. The results show that the multiple event location procedure significantly enhances the picture of seismicity even in this earthquake sequence.

Beérkezett: 2017. szeptember 4.; elfogadva: 2017. december 5.

1. Bevezetés

A gyakorlati szeizmológia egyik legfontosabb feladata a földrengések helyének nagy pontosságú meghatározása. Mivel a földrengések előrejelzése nem lehetséges, az egyes régiók veszélyeztetettségére a szeizmológusok becslése-

ket, illetve kockázatszámításokat készítenek, amihez elengedhetetlen a múltbéli rengések pontos helyének ismerete, melyek kirajzolják a terület alatt húzódó törésvonalakat, szeizmoaktív vetőket. A földrengések hipocentrum-paramétereinek segítségével körvonalazódnak a tektonikus lemezhatárok és aktív vetősíkok, ezek mozgásának vizs-

gálatában, az aktív vetők felkutatásában a hipocentrum-koordináták nélkülözhetetlenek. A szeizmikus események helyének meghatározására több módszer áll a rendelkezésünkre. A gyakorlatban a meghatározás közvetlenül a földrengés kipattanása után az adott szeizmikus eseményre vonatkozólag történik, mely általában olyan nagymértékű hibával terhelt, hogy nem vagy csak nagyon ritkán teszi lehetővé a régió szeizmotektonikájának megismerését. A helymeghatározás hibája jelentősen csökkenthető a különböző többeseményes algoritmust használó módszerek segítségével, vagyis nem egy, hanem több múltbeli esemény paramétereinek egyidejű meghatározásával. Az egyik ilyen a jelen cikkben bemutatott legkorszerűbb módszer a kettős differencia (*double-difference*) algoritmus (Waldhauser, Ellsworth 2000).

2. Helymeghatározási probléma

A földrengés helymeghatározásának témakörét részletesen Bondár és mtsai (2014) írják le, ezért itt csak a helymeghatározási probléma rövid összefoglalását adjuk. Egy földrengés hipocentruma magában foglalja a szeizmikus esemény földrajzi hosszúságát, szélességét, mélységét, valamint a kipattanás idejét (x, y, z, τ). Az egyes szeizmológiai állomásokon az általunk mért fázisbeérkezési idők, valamint a jósolt beérkezési idők különbsége a reziduál (d_i , ahol $i = 1, \dots, N$ és N a mért beérkezési idők száma). A hipocentrum és az állomás közötti menetidő kiszámítása különböző globális vagy lokális sebességmodellek segítségével történik. A helymeghatározási probléma alatt azt értjük, hogy meg kell találni az esemény helyét, mélységét és idejét úgy, hogy az minden állomáson minimalizálja a reziduálokat. A menetidő az esemény pontos helyének nemlineáris függvénye, így a földrengés helyének meghatározása egy nemlineáris inverziós probléma.

Geiger (1910, 1912) feltételezésével élve, ha van egy kezdeti becslés a földrengés hipocentrumára, és ez elegendően közel van a valódi hipocentrumhoz, akkor a reziduálok Taylor-sorba fejthetők, majd az elsőrendűnél magasabb rendű tagok elhanyagolhatók. Ezzel a közelítéssel a helymeghatározási probléma lineárisra vezethető vissza és ekként kezelhető. Ekkor a d_i menetidő-reziduál:

$$d_i = \frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \Delta \tau_i, \quad (1)$$

ahol t a hullámfázis menetideje, az x, y, z koordináták szerinti parciális deriváltak a lassúság- (*slowness*) vektor komponensei (a sebesség reciproka), τ pedig az esemény kezdeti kipattanási idejére vonatkozó becslés. Az (1) egyenletet különböző szeizmikus eseményekre és mérésekre felírva kapunk egy N egyenlethől álló lineáris egyenletrendszert M ismeretlennel (M a modellparaméterek száma, amely ≤ 4). Mivel mindvégig feltesszük, hogy a kezdeti hipocentrum eléggé közel van a valódi hipocentrumhoz, az ilyen linearizált helymeghatározó algoritmusok érzékenyek a becsült kezdeti hipocentrumokra. Ahhoz, hogy elő-

álljon a méréseket kielégítő legvalószínűbb megoldás, a likelihood függvényt kell maximalizálni. Független, normális eloszlású adatot feltételezve ez ekvivalens a

$$\mathbf{WGm} = \mathbf{Wd} \quad (2)$$

mátrixegyenlet megoldásával, ahol \mathbf{G} a modellparaméterek szerinti parciális deriváltakat tartalmazó $N \times M$ -es designmátrix, \mathbf{m} a modellvektor, \mathbf{d} a menetidő-reziduálok vektora, \mathbf{W} pedig diagonális súlymátrix, mely az adatok bizonytalanságát tartalmazó kovarianciamátrixból áll elő.

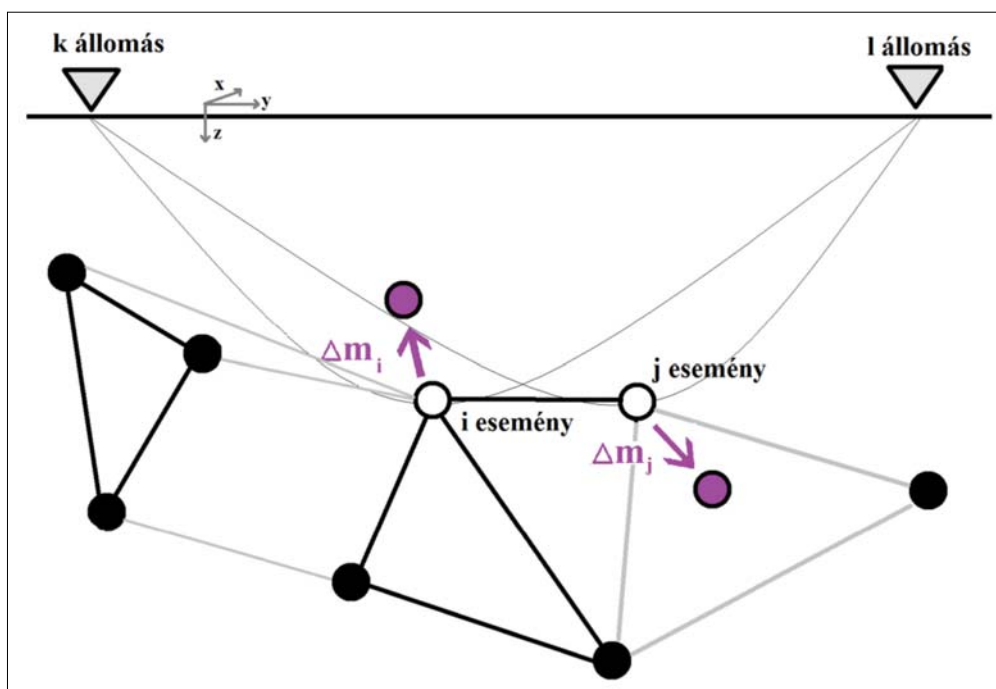
3. Hibaforrások

A helymeghatározás során a felmerülő hibák jelentős része a mérési hibákból, illetve a használt modell hibáiból ered, az ezekből fakadó bizonytalanságokat az adat-kovarianciamátrix írja le. A mérési hiba alatt az egyes fázisok beérkezési idejének kimérési hibáját értjük, melyet általában normális eloszlású, zero átlagú folyamatként jellemeznek (Billings et al. 1994, Pavlis 1986). A valóságban ez sokkal bonyolultabb, mivel a kimérés pontosságánál a jel-zaj arány a kritikus, vagyis minél kisebb a szeizmikus esemény, annál nagyobb hibával terhelt a kimérés pontossága, így az egyben a magnitúdó függvénye is (Kværna 1996). Felmerülhetnek fázismeghatározási hibák is, amikor komplexebb hullámforma esetén nem egyértelmű, hogy melyik fázis első beérkezése látható a szeizmogramon. A helymeghatározás során használt modellek a gyorsaság érdekében szinte mindig 1D-s modellek, melyek bonyolultabb tektonika esetén nem elég pontosak: bizonyos hullámutak mentén szisztematikus hibával terhelt eredményt adnak, mivel nem modellezhető kielégítően a sebességstruktúra (Bondár, McLaughlin 2009b). A hibáknak csak jóval kisebb hányada származik a Taylor-sorfejtés magasabb rendű tagjainak elhagyásából.

4. A többeseményes helymeghatározás, kettős differencia algoritmus

A többeseményes helymeghatározáson egy szeizmikus eseményklaszter egyidejű analízisét értjük, vagyis egy teljes utóregés-sorozat együttes helymeghatározását. A relatív meghatározás fő feltevése, hogy amennyiben két földrengés hipocentrumainak távolsága kicsi az állomások távolságához képest, a hullámutak hasonlóak, kivéve a forrás régióját. Így a menetidő-különbség összefügg az események térbeli távolságával.

A kettős differencia algoritmus egy olyan relatív földrengés-helymeghatározó módszer, amelyben a helymeghatározás elvégzéséhez mind az abszolút menetidőmérések, mind a hullámformák keresztkorrelációjából származó P és S hullám differenciális menetidőadatai alkalmazhatóak együttesen, és önállóan is. A módszer a hullámformakeresztkorrelációval meghatározott differenciális időket, valamint a katalógusadatokból számított egyes fázisok



1. ábra A kettős differencia módszer szemléltetése 2 állomás (k és l), és két, körrel jelölt esemény (i és j) segítségével. A fekete gömbök az abszolút kezdeti hipocentrumok, melyek a szomszédos eseményekhez kapcsolódnak a katalógusadattal (fekete vonal) vagy kereszt-korrelációval (szürke vonal). Az állomások és az események közötti hullámutakat vékony vonallal jelöltük. A lila nyilak az i és j eseményből számított relokáció-vektort mutatják

Figure 1 Illustration of the double-difference earthquake relocation algorithm with 2 stations (k and l), and 2 events (i and j). The black balls represent initial hypocenters that are linked to neighboring events by cross-correlation (grey lines) or catalog (black lines) data. Ray paths from the sources to the stations are indicated with thin lines. Purple arrows indicate the relocation vector for events i and j

beérkezési idői közötti különbségeket kombinálja úgy, hogy minden eseménypárra minimalizálja a reziduálokat (*double-difference*), ezzel pontosítva a hipocentrumok közötti vektorkülönbségeket. A módszer előnye ebből következően épp az, hogy nincs szükség a kipattanási hely és az állomás közötti hullámútra, sem állomáskorrekciók használatára. A módszer a korreláló események közötti távolságot a differenciális idők pontosságával, a nem korreláló események közöttit pedig az abszolút menetidők pontosságával határozza meg.

A kettős differencia algoritmus *i* és *j* esemény között konstans lassúságvektor feltételezése mellett:

$$dt_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{mért}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{jóslt}}, \quad (3)$$

ahol *k* az állomás futóindexe (1. ábra). Az egymáshoz közel levő események esetében feltételezhetjük, hogy konstans, azonban ha nő a távolság a hipocentrumok között, pontosabb eredményt kapunk, ha minden esemenynél a valódi lassúságvektort és kipattanási időt alkalmazzuk. Ekkor a következő egyenletrendszert kapjuk:

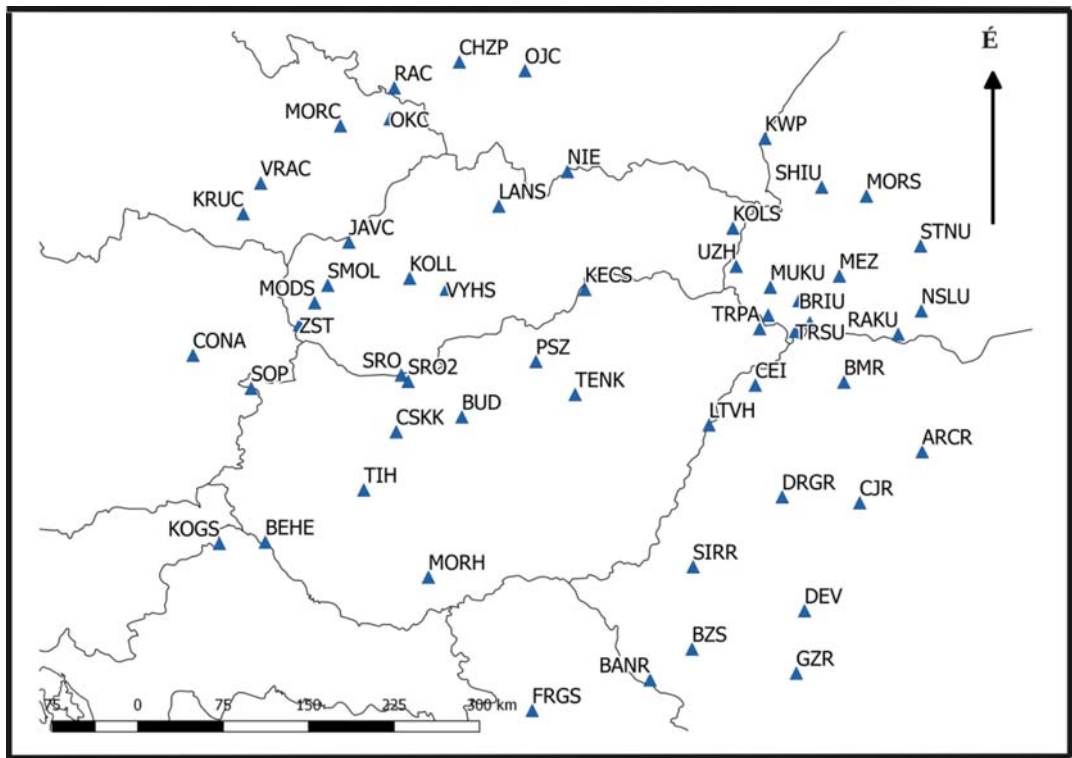
$$\begin{aligned} dt_k^{ij} = & \frac{\partial t_k^i}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y_i} \Delta y_i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z_i} \Delta z_i + \Delta \tau_i \\ & - \frac{\partial t_k^j}{\partial x_j} \Delta x_j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y_j} \Delta y_j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z_j} \Delta z_j - \Delta \tau_j. \end{aligned} \quad (4)$$

Ez az egyenlet minden szeizmikus eseménypárra és állomásra létrehoz egy lineáris egyenletrendszert ugyanabban a formában, mint a (2) egyenlet, de ekkor a *G* mátrix már $M \times 4N$ dimenziójú (*M* a kettősdifferencia-mérések száma, *N* az események száma), és tartalmazza a parciális deriváltakat. A *d* vektorban a kettősdifferencia-értékek szerepelnek, *m* a $4N$ hosszúságú vektor, amely a meghatározandó hipocentrum paramétereiben számolt változásokat tartalmazza, *W* pedig a diagonális súlymátrix.

5. A vizsgált eseménysorozat, szeizmikus állomások

A relokációban felhasznált földrengések 2013. 02. 16. és 2013. 08. 07. között, Heves megye területén pattantak ki. Két kisebb előregés ($M_L = 3,6; 2,5$) után a főregés 2013. április 22-én 22:28 (UTC) perckor pattant ki Tenken 4,8 lokális magnitúdóval, mely a lakosság által is jól érezhető, kisebb károkat okozó, hazai viszonylatban jelentősnek számító földrengés volt. Később további 27 utóregés követte 0,7 és 2,9 közötti magnitúdóval.

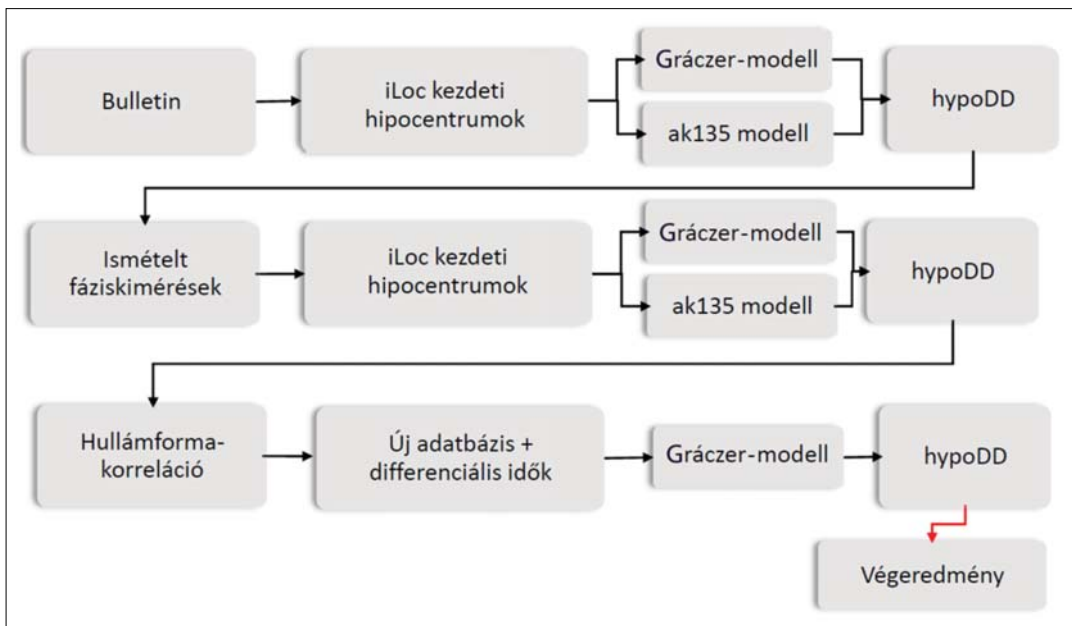
Ekkor az MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium (KRSZO) által üzemeltetett Nemzeti Szeizmológiai Hálózatot (2. ábra) több széles sávú, valamint egy rövid periódusú állomás alkotta. A főregés után több hónapig működött egy ideiglenes állomás Tenken, az utóregések vizsgálatánál az itt rögzített adatokat is fel-



2. ábra | A Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat állomásai 2013-ban, valamint a dolgozatban bemutatott földrengés-sorozatot észlelő, környező országokhoz tartozó szeizmológiai állomások
Figure 2 | The Hungarian National Seismological Network in 2013, and the stations in neighbouring countries which detected the earthquakes

használtuk. A magyar állomásokon túl a közeli országok (Románia, Szlovákia, Csehország, Ukrajna, Lengyelország, Szerbia és Ausztria) regisztrátumait is felhasználtuk. A hipocentrumok legpontosabb meghatározása érdekében számos próbafuttatásra, több sebességmodell hasz-

nálatára, valamint különböző adatfeldolgozási lépés beiktatására volt szükség. Az esettanulmányban felvázolt és bemutatott relokalizáció folyamatábrája (3. ábra) összefoglalja a stabil megoldás eléréséhez vezető utat, melyeket a továbbiakban részletezünk.



3. ábra | A bemutatott esettanulmány folyamatábrája
Figure 3 | Flowchart of the presented case study

6. Kezdeti hipocentrumok előállítása, az iLoc abszolút helymeghatározó algoritmus

A többeseményes helymeghatározáshoz szükségesek az abszolút kezdeti hipocentrumok koordinátái, melyeket iLoc algoritmussal hoztunk létre. Az iLoc abszolút helymeghatározó algoritmus az ISC lokátor (Bondár, Storchak 2011) továbbfejlesztett változata. Az iLoc az iterációs linearizált inverziót úgy hajtja végre, hogy egy kezdeti becslést alkalmaz az adatok kovarianciamátrixára (Bondár, McLaughlin 2009b), figyelembe véve a korrelált hibákat. A menetidőbecslések korrelált hibáinak figyelmen kívül hagyása a helymeghatározás hibáinak (hibaellipszis) alulbecsléséhez vezet, és a helymeghatározás szisztematikus torzítását (*location bias*) eredményezheti. Jelenleg az ISC lokátor és az iLoc az egyedüli két olyan algoritmus, amely figyelembe veszi a menetidőbecslések korrelált hibáit. A fáziskimérés hibáira vonatkozó becslés a ground truth alapesemények (vagyis olyan szeizmikus események, robbantások, melyek helye, kipattanási ideje nagy pontossággal ismert) reziduáljainak eloszlásából ered (Bondár, McLaughlin 2009a). A kezdeti hipocentrumokat különböző sebességmodellekkel állítottuk elő annak érdekében, hogy megtaláljuk a legjobban használható megoldást, és egyértelműen látható legyen a különböző sebességmodellekkel számított kezdeti hipocentrumok hatása a relokálizáció végeredményére. Két 1D-s sebességmodellt alkalmaztunk, a lokális Gráczer-féle (Gráczer, Wéber 2012), valamint a globális ak135 (Kennett et al. 1995) modellt, melyek eltérő rétegvastagságokhoz eltérő hullámterjedési sebességeket feltételeznek. A munkafolyamat első fázisában a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin (HNSB, Gráczer et al. 2014) adatait használtuk fel a kezdeti hipocentrumok létrehozásánál. Összesen 30 szeizmikus esemény állt a rendelkezésünkre. Az iLoc abszolút helymeghatározó algoritmus elvetette azokat az eseményeket, melyeket csak két állomás regisztrált, mivel a rendelkezésre álló fázisok száma nem volt elegendő a megbízható helymeghatározáshoz, így 12 esemény maradt a többeseményes meghatározáshoz.

7. HypoDD-relokálizáció folyamata

A hypoDD-vel (Waldhauser 2001) végzett relokálizáció kétlépcsős folyamat. Az első lépés magában foglalja a fázisadatok analízisét, létrehozva a földrengéspárok menetidő-különbségét, majd a második lépés a kettős differencia egyenletrendszer megoldása. A fázisadatok analízise során közös állomáson mért menetidőkkel rendelkező eseménypárokat hoztunk létre a hypoDD kiegészítő alkalmazásával, mely ideális esetben egy egész hálózatot hoz létre a fázisadatokból. Az előállt adatrendszert befolyásolják az általunk megszabott kritériumok, melyek a földrengéssorozat sajátosságaitól függenek, így az eseménypárok és az állomások közötti maximálisan megengedett távolság (400 km), az eseménypárok közötti maxi-

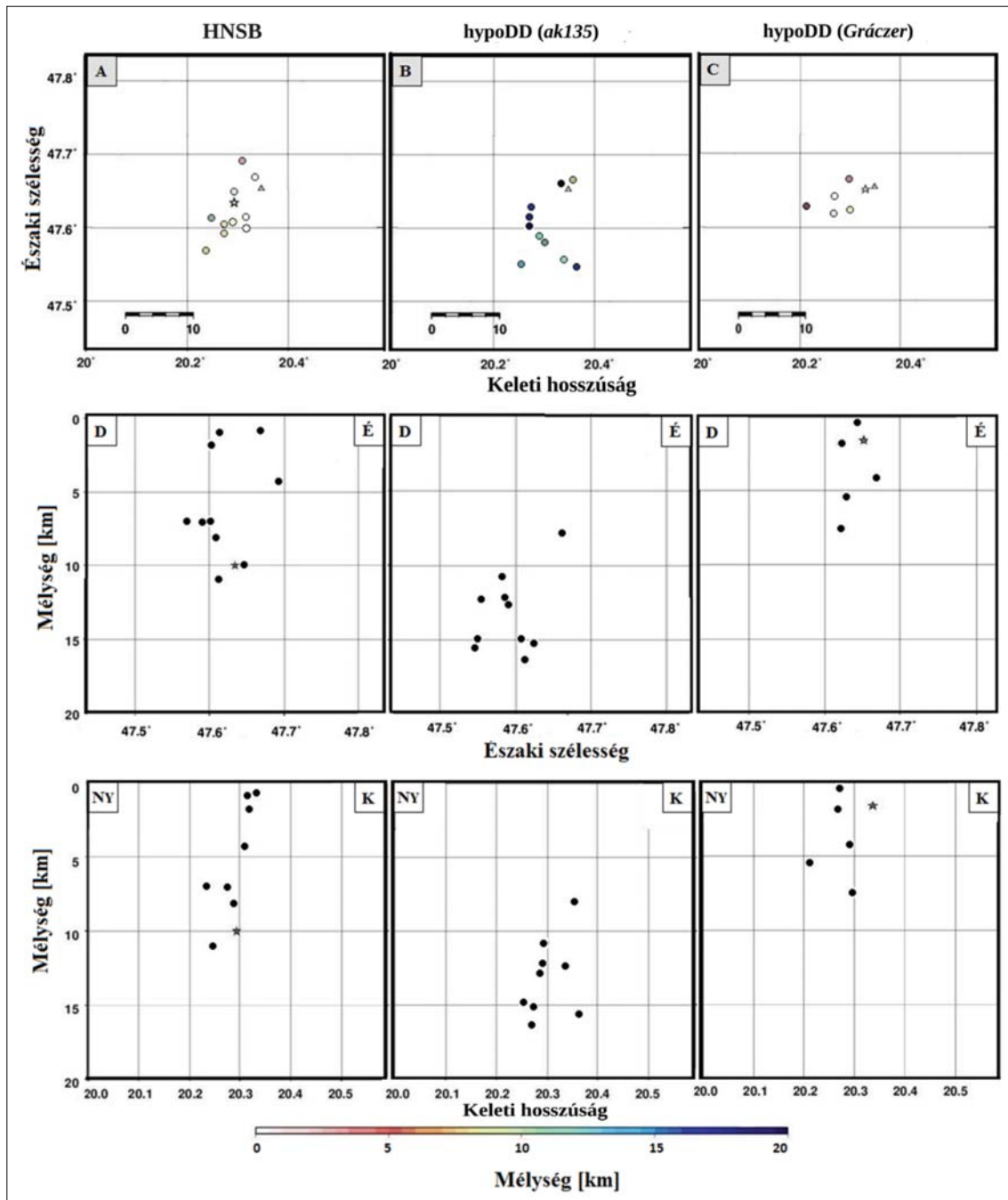
mális távolság (20 km), minimális számú mérések száma (1). Mivel a túl szigorúan meghatározott korlátok további szeizmikus események elvesztését jelentik, a cél pedig a lehető legnagyobb adatbázis megtartása volt, a túl gyenge korlátok pedig rontják a relokálizáció eredményét, ezért számos próbafuttatást végezve határoztuk meg a végső paramétereket. Elégséges számú fázispár fontos feltétel a stabil megoldáshoz, de emellett függ az állomások térbeli elhelyezkedésétől is. Így 46 összekapcsolt eseménypárt hoztunk létre, melyek között az átlagos távolság 11,79 km. 343 P és 276 S fázispárt használtunk fel. Az adatbázisból a kiugró értékeket (12%) eltávolítottuk.

Második lépés az iterációk során használt megkötések meghatározása volt. A helymeghatározás során minden esetben felhasználtuk a P és S beérkezéseket egyaránt. A hypoDD minden esetben az egydimenziós, síkrétegzett Gráczer-féle sebességmodellt (Gráczer, Wéber 2012) használva határozta meg az új koordinátákat. A program iteratíván oldja meg a kettős differencia-egyenleteket úgy, hogy minden egyes iteráció után a hipocentrumok helyei és a parciális deriváltak megváltoznak, majd az új értékekkel számol tovább. Az egyenleteket a legkisebb négyzetek módszerén alapuló LSQR algoritmussal (Paige, Saunders 1982) oldottuk meg. Ehhez szükséges a csillapítási faktor meghatározása, mely a modellt módosító vektort csillapítja, ha az instabillá válik, vagy túl nagy lesz a változás a hipocentrum paramétereiben. Az iterációk előrehaladtával eltérő súlyozást és újrasúlyozást alkalmaztunk az adatok megbízhatóságától függően, valamint fokozatosan bevezettünk reziduál- (6–3 s), illetve távolságkorlátot (15–9 km) is. Először, amíg a megoldás stabilná nem vált, egy kezdeti súlyozást alkalmaztunk, majd minden iterációt az újrasúlyozott adattal hajtottunk végre, miközben a kezdeti súlyok módosultak a reziduálok és az események közötti távolság függvényében. Így súlyoztuk azoknak a méréseknek az adatait, amikor nagy a reziduál vagy a távolság. Az iterációk addig folytatódtak, amíg a reziduálok értéke el nem ért egy küszöböt, vagy a megoldások közötti különbség elegendően kicsi nem lett. Az S fázisbeérkezések minden esetben kisebb kezdeti súlyt (0,5) kaptak, mint a P beérkezések (1,0), mivel jóval nagyobb a kimérés bizonytalansága.

8. A hypoDD-eredmények összevetése a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletin (HNSB) adataival

8.1. Az ak135 sebességmodellel számított iLoc abszolút kezdeti hipocentrumokkal végzett relokálizáció eredménye

Az elsőként előállt eredménynél (4. ábra, B oszlop) összehasonlítási alap nélkül nehezen vontunk le következtetést, de az jelzésértékű, hogy a csillaggal jelölt főrengést olyan



4. ábra Hipocentrumok térképi nézetű (felső sor), D–É mélységshelvényei (középső sor), NY–K mélységshelvényei (alsó sor). A) Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatóriumban rutinszerűen meghatározott hipocentrumok, B) az ak135 1D-s sebességmodellel számított abszolút hipocentrumok hypoDD-megoldásai, C) a Grácz-féle 1D-s sebességmodellel számított abszolút hipocentrumok hypoDD-megoldásai. A szín-skála a fészekmélységeket, a csillag a főrengést jelöli

Figure 4 Hypocentres in map view (upper row), S–N sections (middle row), W–E sections (bottom row). A) Routinely determined hypocentres by Kövesligethy Radó Seismological Observatory B) hypoDD solutions (the initial hypocentres were calculated with the ak135 1D velocity model) C) hypoDD solutions (the initial hypocentres were calculated with the Grácz velocity model). Hypocenters are colored according to focal depth, the mainshock is indicated with a black star

távolra relokálta a globális ak135 sebességmodell felhasználása után, hogy nincs rajta sem a mélységshelvényeken, sem a térképi nézeten. A hipocentrumok semmiféle összefüggést nem mutatnak, térben szétszórtabban helyezkednek el, mint az eredeti, rutinszerűen meghatározott koordináták (4. ábra, A oszlop).

8.2. A Grácz-féle sebességmodellel számított iLoc abszolút kezdeti hipocentrumokkal végzett relokáció eredménye

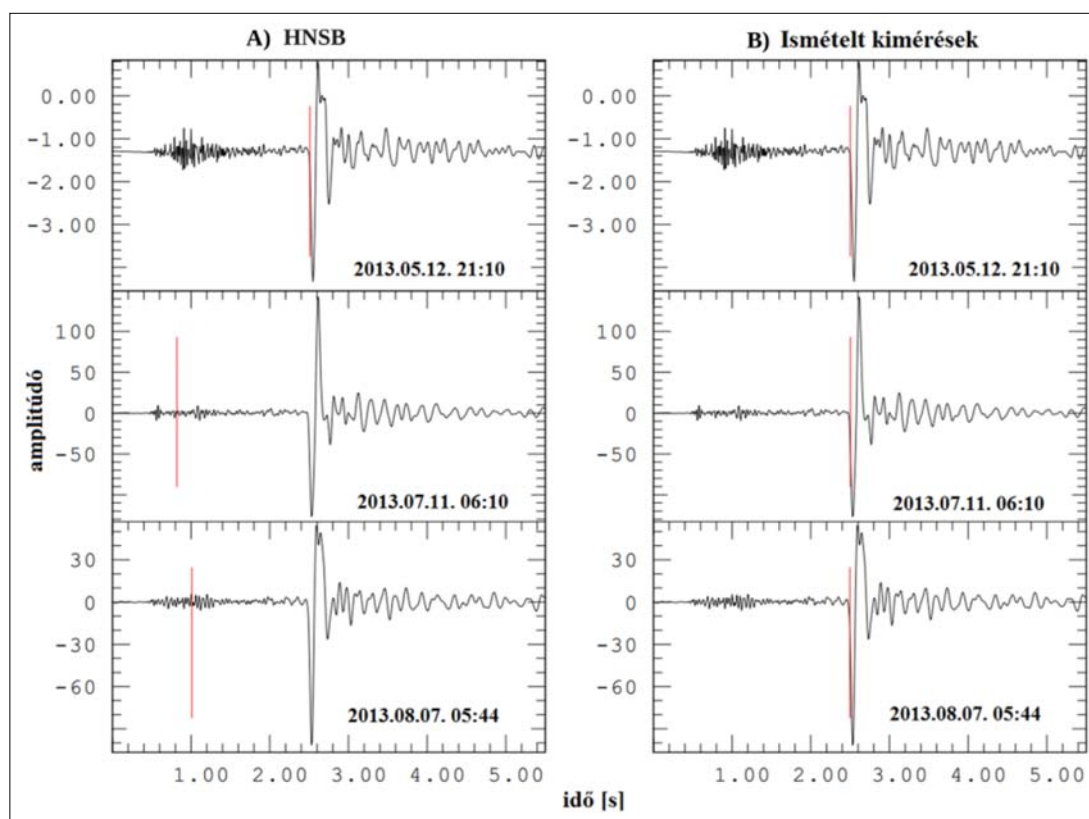
A térképi nézeten (4. ábra, C oszlop) az epicentrumok eloszlásánál megfigyelhető, hogy az új koordináták térbeli

eloszlása kissé megváltozott az eredeti HNSB-beli hipocentrumokhoz képest (4. ábra, A oszlop), valamint jelentős a változás a mélységszelvényeken is. Míg az eredeti HNSB hipocentrumok 1–12 km mélységben helyezkednek el, a relokalizált hipocentrumok 1–8 km között oszlanak el. Bár nagy a változás a paraméterekben, az így kapott eredmény közel sem kielégítő.

9. A felhasznált adatbázis minőségének javítása

Feltételeztük, hogy a szeizmikus fázisok első beérkezésének ismételt kimérése pontosabb adatokat szolgáltat, mint az eredetileg rutinszerűen kimért adatok a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Bulletinben (HNSB). Az állomásokra beérkező első szeizmikus fázis a primer hullám (P), alacsony zajszinttel rendelkező jel esetén tisztán látható. Ezeket követik az S fázisbeérkezések, melyet nagyobb amplitúdó jellemez. A fázisbeérkezések kimérése általában nem triviális feladat, a szeizmikus regisztrátumok mindig zajjal terheltek. A zaj forrása lehet természetes eredetű (pl. szél, tengerhullámzás), vagy emberi tevékenység által okozott kultúr zaj, valamint műszer zaj is, mely normál esetben jóval a szeizmikus zajszint alatt van. Az 5A. ábrán például jól látható a tenki szeizmológiai állomásra beérkező jelek esetén az S fázisok inkonzisztens

kimérése. Mivel az utóregés közvetlenül az ideiglenes tenki szeizmológiai állomás alatt/közelében volt, a csatornán látszó nagy amplitúdójú jel identifikációs problémát okozott. Ennek ellenőrzése céljából az új mérésekből számított menetidőket összehasonlítottuk a Gráczer-féle modell segítségével jósolt menetidőkkel, melyek jól korreláltak, így a jel nagy valószínűséggel valóban az első S fázis beérkezése (5B. ábra). Emellett előfordultak olyan fázisok, melyek kimérésére korábban nem került sor. Az adatbázis minőségének javítása érdekében mind a 30 eseménynél az összes elérhető állomásra beérkezett jelen ismételt kimértük az első beérkezéseket. Általában $M > 2$ magnitúdójú földrengések 0.1–10 Hz, míg $M < 2$ magnitúdó esetén 10–1000 Hz közötti frekvenciát generálnak (Havskov, Ottemöller 2009). Minden esetben a Seisgram2K programba épített Butterworth-filtert alkalmaztuk, a vágási frekvenciát pedig az állomástól mért távolság befolyásolta. Az alsó vágási frekvencia 0,5–1 Hz közé esett, a felső vágási frekvencia pedig 5 Hz volt. Olyan csatorna esetén, amelynél a frekvenciaszűrés sem hozott könnyebben elemezhető hullámformát, nem jelöltünk ki első beérkezést, mert a bizonytalan adat rontja a relokalizáció eredményét. Ezzel létrehoztunk egy teljesen új adatbázist, és a korábban bemutatott sebességmodellek segítségével újra előállítottuk az iLoc kezdeti hipocentrumokat, majd elvégeztük a többeseményes helymeghatározást.



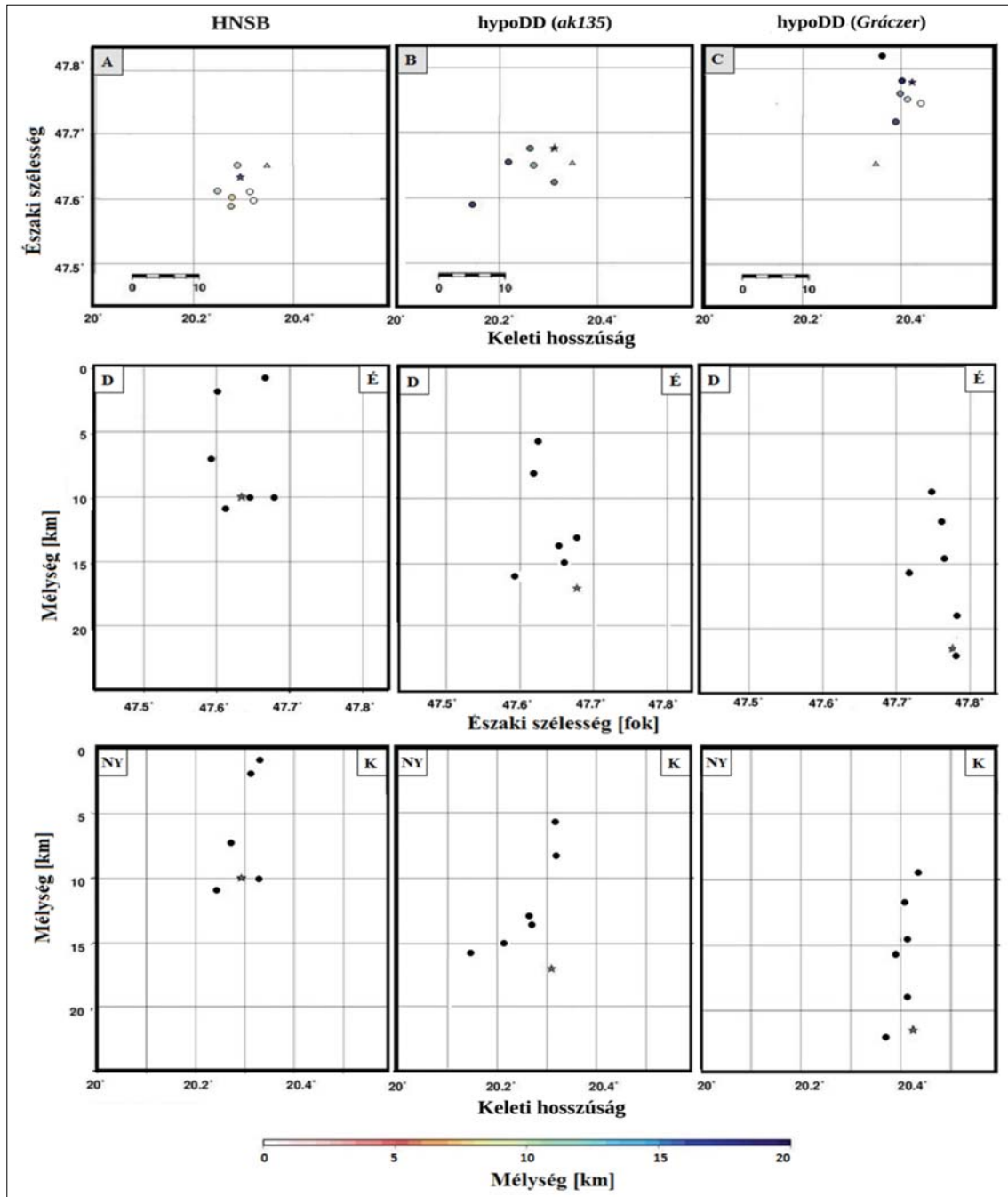
5. ábra | Példa fázisidentifikációs problémára: A) a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumban rutinszerűen kijelölt első S fázisbeérkezések, B) az ismételt fáziskimérések eredménye ugyanazon hullámformákon

Figure 5 | Example for phase identification problem: A) inconsistent S phase arrival times (HNSB), B) repicked phase arrival times

10. HypoDD-eredmények a javított adatbázis felhasználásával

10.1. Az ak135 sebességmodellel számított iLoc abszolút kezdeti hipocentrumokkal végzett relokalizáció eredménye

A térképi nézetben (6. ábra, B oszlop) az epicentrumok az eredeti, HNSB epicentrumokhoz képest (6. ábra, A oszlop) egymástól távolabban helyezkednek el. Bár a föregés az adatbázis javítása következtében ismét látható a szelvényeken, az egyik esemény jóval távolabbra került az eseménysorozat többi tagjához képest, valamint a fészekmély-



6. ábra Hipocentrumok térképi nézetei (felső sor), D–É mélységszelvényei (középső sor), NY–K mélységszelvényei (alsó sor) ismételt fáziskimérések után. A) Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumban rutinszerűen meghatározott hipocentrumok B) ak135 1D-s sebességmodellel számított abszolút hipocentrumok hypoDD-megoldásai, C) a Grácz-féle 1D-s sebességmodellel számított abszolút hipocentrumok hypoDD-megoldásai. A színskála a fészekmélységeket, a csillag a főregést jelöli

Figure 6 Hypocentres in map view (upper row), S–N sections (middle row), W–E sections (bottom row) after repicking phase arrival times. A) Routinely determined hypocentres by Kövesligethy Radó Seismological Observatory B) hypoDD solutions (the initial hypocentres were calculated with ak135 1D velocity model) C) hypoDD solutions (the initial hypocentres were calculated with the Grácz velocity model). Hypocenters are colored according to focal depth, the mainshock is indicated by a black star

sége is kiugró a többi földrengéshez viszonyítva. Az eredetileg 1–12 km-es mélységben található események mélységbeli eloszlása 5–18 km-re nőtt. Ennél az eredménynél már biztosan kijelenthető, hogy nagyobb hibával terhelt eredmény érhető el a globális sebességmodell felhasználásával, mint a kiindulási hipocentrum-paraméterek. Kijelenthető, hogy az ak135 globális sebességmodell nem használható eredményesen lokális eseménysorozat esetén. Ennek fő oka, hogy az 35 km-es kéregvastagságot feltételez, míg a régió kéregvastagsága 25–30 km. A továbbiakban teljesen elvetettük a globális sebességmodellt, és kizárólag a Gráczter-féle sebességmodellt alkalmaztuk a számítások során.

10.2. A Gráczter-féle sebességmodellel számított *iLoc* abszolút kezdeti hipocentrumokkal végzett relokalizáció eredménye

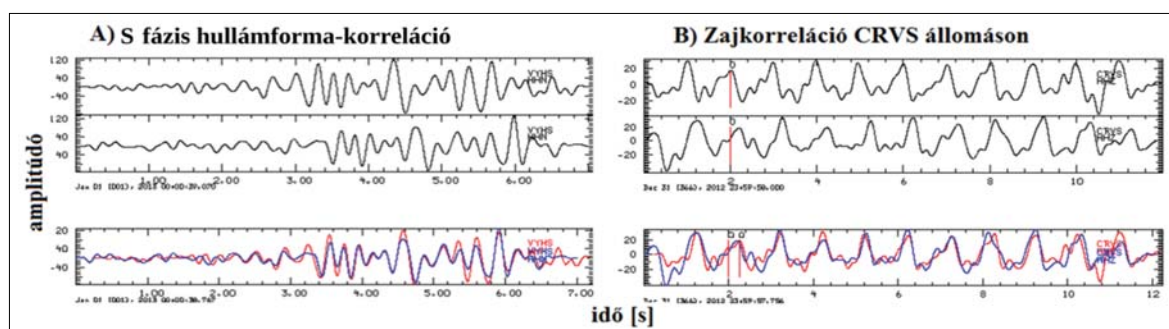
Az epicentrumok koordinátái a térképi nézeten (6. ábra, C oszlop) jelentősen megváltoztak, kivétel nélkül északabbra kerültek, valamint egy-egy eseményt leszámítva koncentráltabban helyezkednek el. A rendelkezésre álló események számából adódóan a hipocentrumok ritkák, az észrevehető, hogy a mélységek eloszlása megváltozott, az új hipocentrumok összefüggőbben, rendezettebben helyezkednek el, összehasonlítva az eredeti HNSB hipocentrumokkal.

11. Hullámforma-korreláció

Mivel sem a fázisok ismételt kimérése, sem a különböző sebességmodellek használata nem eredményezett jelentősen jobb megoldást, a felhasznált adatbázis minőségének további javítását kíséreltük meg. Feltételezhető, hogy két földrengés hasonló hullámformát eredményez azonos szeizmológiai állomáson, amennyiben azonos a fészekmechanizmusuk és a hipocentrumaik elegendően közel vannak egymáshoz, vagyis hasonló hullámúton érkeznek be a fázisok. A szeizmogramok hullámforma-keresztkorrelációjával az utórengések pontosabb P és S fázis beér-

kezéseit pontosítottuk, ezzel növelve az adatrendszer minőségét, a helymeghatározás megbízhatóságát. Ez a lépés főleg akkor fontos, amikor az első P és S fázis beérkezései bizonytalanok vagy hiányosak. Egyaránt végeztünk P és S korrelációkat, vagyis a szeizmogramok vertikális és északi horizontális komponenseit korreláltattuk egymással, minden állomásra, eseménypáronként. A keresztkorreláció elvégzése előtt a fáziskimérésnél használthoz hasonló szűrést alkalmaztuk. Az alsó vágási frekvencia 0,6–0,8 Hz közötti, a felső pedig 4–6 Hz az esemény és az állomás közötti távolságtól függően. Meghatároztuk a jósolt beérkezési idők előtt és után a korreláció időablakát minden eseménypár és minden állomás esetén. A vertikális komponens korrelációjánál használt időablak meghatározásánál ügyeltünk arra, hogy az ne érintse az S fázis beérkezésének idejét, mert ez hibás korrelációt eredményezhet. Közele állomás esetén (pl. Tenk) a P és S fázisok kevesebb mint 2 másodperccel követték egymást, így kisebb időablak megadása volt szükséges, míg távolabbi állomáson (pl. BUD) ez 15 másodperc is lehet, így az időablak szélesebbre állítása szükséges. Távoli állomás esetén nem csak a P és S fázis menetidejének különbsége nő, a hullámúton menti heterogenitások következtében nagyobb távolságok esetén a jósolt beérkezési idő bizonytalansága is nagyobb lesz, így jóval szélesebb intervallumot szabtuk meg. A pontosság érdekében azonos állomáson, de eltérő műszer által rögzített jeleket is szeparáltuk, és külön végeztük el a korrelációt. Minden elvégzett korreláció után előállt a páronkénti korrelációs koefficiens, melynek értéke 1, ha a két hullámforma teljesen azonos, 0, ha egyáltalán nem korrelál, és -1 , ha tökéletesen antikorrelál. Mivel csak jól korreláló (7A. ábra), ezáltal megbízható adatok kinyerése volt a cél, minden olyan esetet, amikor a korrelációs koefficiens kisebb volt, mint 0,6, elvetettünk, és nem használtuk fel a relokalizáció során. Számos esetben a korrelációs koefficiens az általunk választott küszöbérték alatt volt, így néhány állomásról nem nyertünk ki differenciális időadatot.

A megbízhatóság érdekében ellenőriztük az összes keresztkorrelációt, mivel sok esetben zajkorreláció (7B. ábra) eredményezett jó koefficienst, így a bizonytalan eredményeket



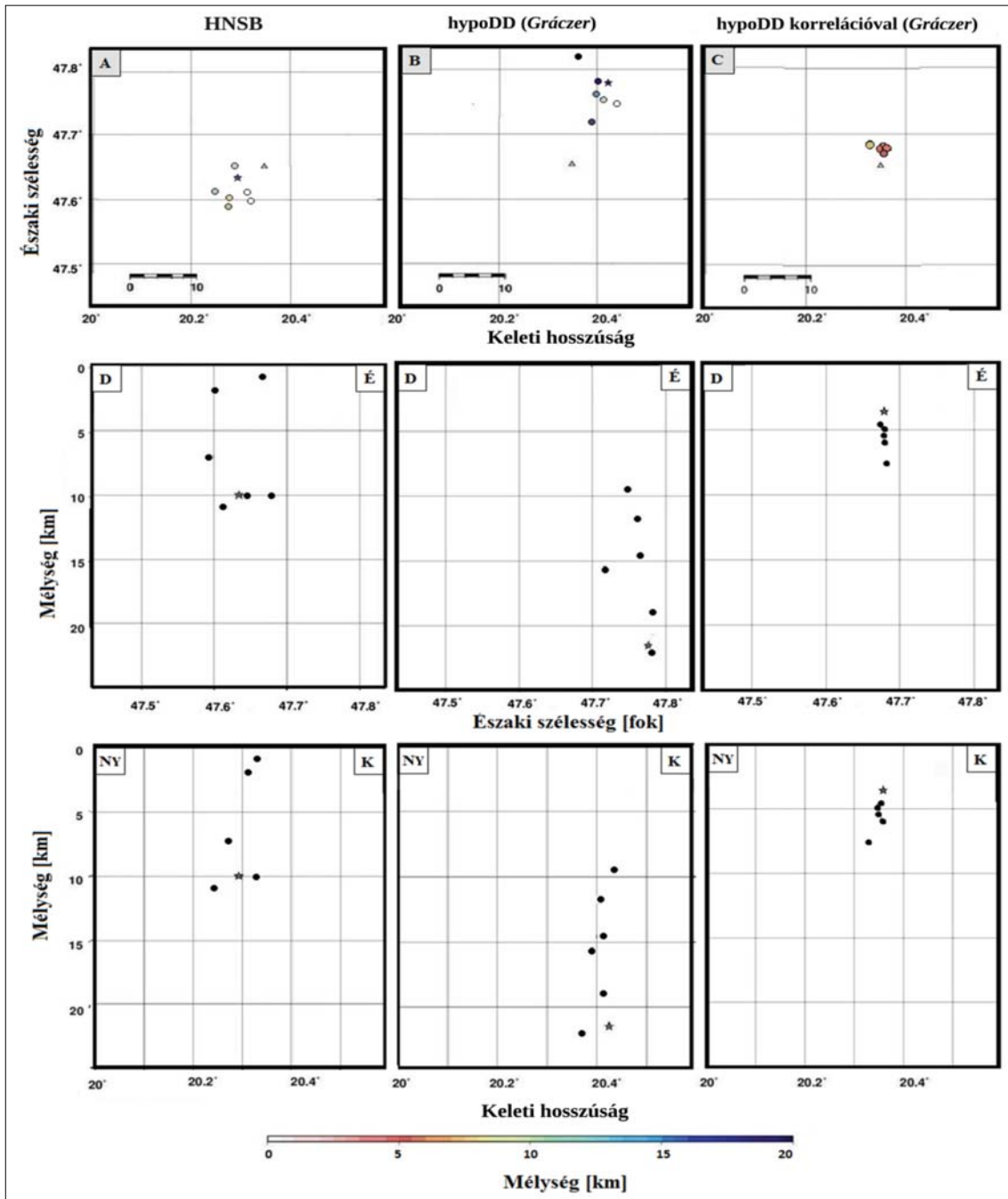
7 ábra A) Az S fázis hullámforma-korrelációja, ahol a korrelációs koefficiens nagyobb, mint 0.6. B) Tipikus zajkorreláció, melyet manuálisan eltávolítottunk az adathalmazból

Figure 7 A) S wave cross-correlation where the correlation coefficient is above 0.6. B) Example: characteristic noise correlation. These correlations were manually removed from the dataset

eltávolítottuk az adathalmazból. Ennek következtében a kezdetben 1280 db 0,6-os koeficiensnél nagyobb korrelációból 940 db maradt, amelyet felhasználtunk a megoldáshoz. Az így kapott differenciális időket hozzáadtuk a hypoDD bemeneti adatrendszerhez, ezzel elérve a legmagasabb minőségű adatbázist.

12. Relokalizáció végeredménye

A keresztkorrelációból származó differenciális idők elsődleges súlya a korrelációs koeficiensük. A kombinált adatrendszeren 25 iterációt hajtottunk végre, melyek két nagy csoportra bonthatók. Az első 10 iterációnál az ismételt fázis-



8. ábra Hipocentrumok térképi nézetei (felső sor), D–É mélységszelvei (középső sor), NY–K mélységszelvei (alsó sor) ismételt fáziskimérések, valamint hullámforma-korreláció után. A) Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumban rutinszerűen meghatározott hipocentrumok, B) a Gráczter-féle 1D-s sebességmodellel számított abszolút hipocentrumok hypoDD-megoldásai, C) a Gráczter-féle 1D-s sebességmodellel számított abszolút hipocentrumok hypoDD-megoldásai a differenciális időekkel. A színskála a fészekmélységeket, a csillag a főrengést jelöli

Figure 8 Hypocentres in map view (upper row), S–N sections (middle row), W–E sections (bottom row) after repicking phase arrival times, and waveform cross-correlation. A) Routinely determined hypocentres by Kövesligethy Radó Seismological Observatory, B) hypoDD solutions (the initial hypocentres were calculated with the Gráczter 1D velocity model), C) hypoDD solutions (the initial hypocentres were calculated with the Gráczter velocity model) with differential times. Hypocenters are colored according to focal depth, the mainshock is indicated with a black star

1. táblázat | A hypoDD-megoldások átlagos 2σ hibái (95%-os konfidenciaszint)
 Table 1 | Mean 2σ errors of the hypoDD solutions (95% confidence level)

	HNSB (Gráczer) (km)	Megismételt kimérések (Gráczer) (km)	Hullámforma-korrelációval (km)
x	49,4296	12,0161	0,2406
y	51,874 0	19,8953	0,3798
z	61,8297	13,6286	0,3233

kimérésekkel létrehozott adatrendszer kap nagyobb szerepet, mivel nincs minden állomásra differenciális időadat, így az összes adat felhasználása érdekében azok a kimérések dominálnak, amelyek esetén a P és S fázisbeérkezések rendre 1,0 és 0,5 súlyt kaptak ellentétben a differenciális időkkal, melyekhez 0,01 súlyt rendeltünk. A 10–25. iterációnál a súlyok megfordultak, és a keresztkorrelációval létrehozott adatrendszer van nagyobb súllyal figyelembe véve. Mivel feltételezhetjük, hogy a keresztkorrelált S beérkezések pontosabbak, mint a manuális kimérések, ezért ez már nem csak 0,5-ös súlyt kap, hanem 1,0 súlyt, remélve, hogy tovább pontosítja az eddigi eredményeket.

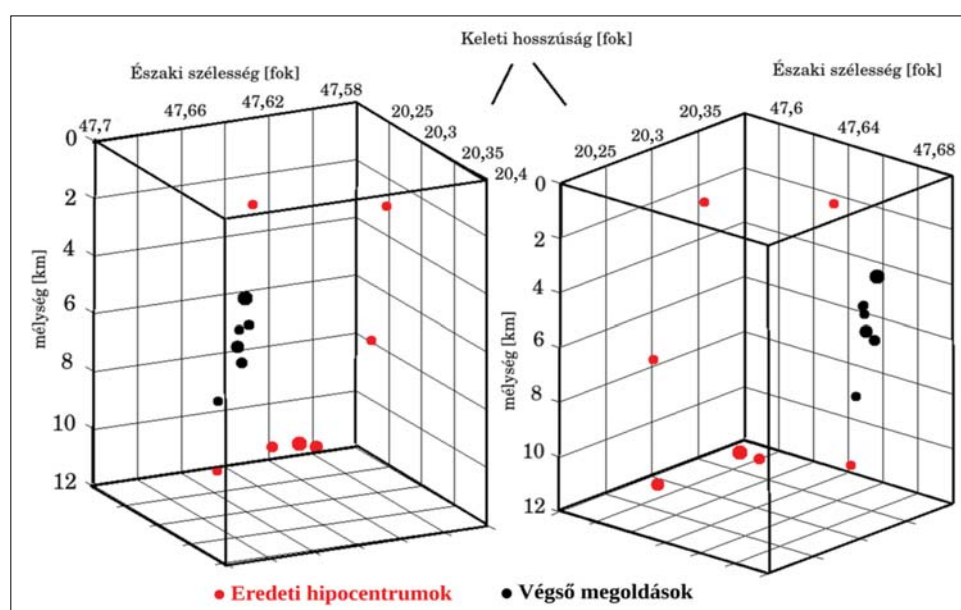
A végső megoldás térképi nézete a 8. ábra C oszlopában látható. A földrengések –várákozásainknak megfelelően – kis térrészre koncentrálnak, az epicentrumok a 47,674–47,681 szélességi fokok között helyezkednek el. Egyetlen eseményt leszámítva a hypoDD egy csoportba lokalizálta a földrengéseket. Az események elrendeződése a D–É, NY–K szelvényeken már egyszerű hypoDD-futtatásnál is sokat javult, a mélységbeli eloszlás viszont jelentősen megváltozott a korreláció után. A hipocentrumok 10–23 km-es mélységek helyett 3–8 km között oszlanak el. A végső megoldásban a csillaggal jelölt főrengés a legké-

lyebb esemény a sorozatban. A hypoDD keresztkorreláció nélküli eredményével (8B. ábra) összehasonlítva látható a keresztkorreláció elvégzésének fontossága, a pontosított adatok jelentősége a relokalizáció folyamatában. A többeseményes helymeghatározás során a végeredményben szereplő szeizmikus események száma 12-ről 7-re csökkent. Ez főleg annak köszönhető, hogy amikor az egyes iterációk során a földrengések új hipocentrum-koordinátái a felszín felé kerülnek, a program nem rögzíti egy felszíni pontra, hanem elveti azokat az adathalmazból, és a maradék eseményekkel számol tovább.

Az eltérő adathalmazok felhasználásával az egyenletrendszer megoldásaiból származó formális hibák nagyságát az 1. táblázat tartalmazza. A végső megoldás esetén a fázisok megismételt kimérésének, valamint a hullámforma-korrelációs eljárásnak köszönhetően (kimérési hibák eliminálása) az egyenletrendszer megoldásából származó hiba mértéke szignifikánsan csökkent a kezdeti értékekhez képest.

13. Következtetések

Sikeresen elvégeztük a bemutatott földrengéssorozat hipocentrumainak meghatározását a kettős differencia al-



9 ábra | Összehasonlító 3D-s ábrázolása az eredeti, rutinszerűen meghatározott hipocentrumoknak (piros), valamint a többeseményes helymeghatározás végső megoldásai (fekete). A gömbök térfogata arányos a magnitúdó nagyságával
 Figure 9 | Comparative 3D view of the final solutions. The red balls represent the original hypocenters, while the black balls represent the selected and the relocated ones. The volume of the balls is proportional to their magnitude

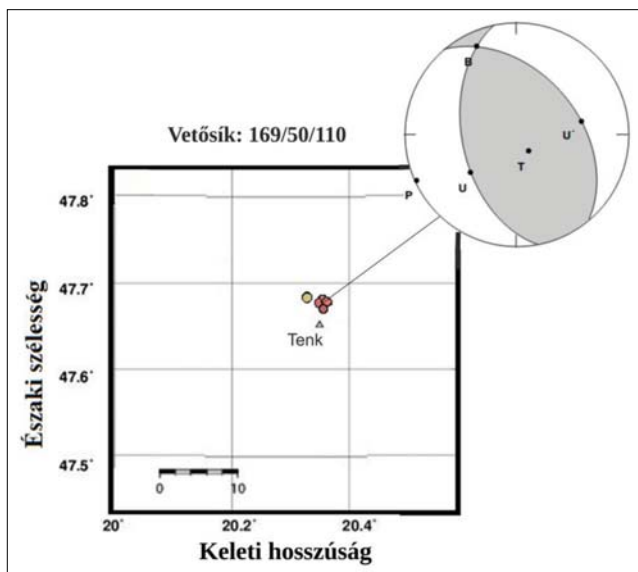
2. táblázat | A főrengés különböző fészekmechanizmus-megoldásai (Wéber 2015, ISC Bulletin 2014)
Table 2 | Focal mechanism solutions of the mainshock (Source: Wéber 2015, ISC Bulletin 2014)

Dátum	Idő	Csapásirány (°) (0–360°)	Dőlés (°) (0–90°)	Csúszásirány (°)	Forrás
2013.04.22	22:28:46	319/169	44/50	68/110	Wéber Zoltán, KRSZO
		304/142	62/29	81/107	USGS NEIC
		331/126	44/49	72/107	MED_RCMT
		142	53	84	HNSB

goritmussal. Az eredmények minden bemutatott lépéssel javultak, összehasonlítva az eredeti, rutinszerűen meghatározott hipocentrumokkal. Számos hasonló esettanulmány, tudományos cikk található (pl. Békési et al. 2017), azonban ezek főleg jóval több eseményből álló vagy nagyobb magnitúdóval rendelkező földrengéssorozatot mutatnak be, kedvezőbb geometriával elhelyezkedő szeizmológiai állomásokkal. Az általunk használt földrengéssorozat 30 eseményből áll, melyből az iLoc abszolút helymeghatározó algoritmus futtatása után mindössze 12 esemény maradt, de látható, hogy a módszer ekkor is eredményesen használható a lehető legjobb adatminőség biztosítása esetén. Egyértelmű javulást értünk el a hipocentrumok paramétereiben, a hiba mértékét csökkentettük (9. ábra).

Az eredmények továbbá megmutatják, hogy:

- a globális ak135 modell nagy hibával terhelt megoldást eredményez a régióra nem illeszkedő sebességstruktúra következtében,
- a fáziskimérések ellenőrzése szükséges lépés az adatok előkészítésénél, az adatok pontosítása láthatóan nagy hatással van a relokalizáció végeredményére,



10 ábra | A végeredmény segítségével valószínűsített fészekmechanizmus-megoldás

Figure 10 | The probable valid focal mechanism solution based on our locations

- a hullámforma-korrelációs eljárás következtében a bizonytalan vagy kimérés nélkül hagyott S fázis beérkezési javultak, ezáltal az eredmény megbízhatósága nőtt.

A bemutatott eseménysorozat tenki főrengésének fészekmechanizmus-megoldására több eredmény is született, melyeket a 2. táblázat mutat be.

A 2. táblázatban szereplő csapásirány/dőlés/csúszásirány (*strike/dip/rake*) értékpárok két síkot közölnek. A momentumtenzor-megoldások esetén nem dönthető el, hogy melyik a vetősík és a segédsík, erre csak a jelenlegihez hasonló utórengés tanulmányokból következtethetünk, ezáltal lehetőséget kapva a recens feszültségviszonyok jobb tanulmányozására, a tektonikus kéregmozgások természetének megismerésére.

A végeredményünkben szereplő hipocentrum-paraméterekre legkisebb négyzetes illesztéssel a legjobban illeszkedő sík dőlésszöge (*dip*) 58°, míg a csapásiránya (*strike*) 223°. Az általunk kapott dőlésszög, valamint csapásirány Wéber Zoltán megoldásától tér el legkevésbé. A dőlésszögbeli eltérés 8°, csapásirány esetén 54°, az utóbbi hibája viszont a hipocentrumok térbeli tömörülésének következtében meglehetősen nagy. Ezzel az eredménnyel valószínűsíthetjük, hogy a 169° csapásirányszöggel (*strike*), 50° dőlésszöggel (*dip*), 110° csúszásirányszöggel (*rake*) jellemzett sík az elmozdulás vetősíkja (10. ábra).

Köszönetnyilvánítás

Az esettanulmányhoz szükséges adatokat, támogatást, megfelelő szoftverkönyezetet az MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium biztosította. Köszönettel és hálával tartozunk Galsa Attilának és Timár Gábornak alapos lektori tevékenységükért, számos észrevétellel, javaslattal és pontosítással járultak hozzá a kézirat színvonalának emeléséhez.

A tanulmány szerzői

Czece Barbara, Süle Bálint, Bondár István

Hivatkozások

Békési E., Süle B., Lenkey L., Lenkey-Bogér Á., Bondár I. (2017): Double-difference relocation of the 29 January 2011 M_L 4.5 Oroslány earthquake and its aftershocks and its relevance to the rheology of the lithosphere and geothermal prospectivity.

- Acta Geod. Geophys., 52, 229–242, doi: 10.1007/s40328-017-0195-7
- Billings S. D., Sambridge M. S., Kennett B. L. N. (1994): Error in hypocenter location: picking, model, and magnitude dependence. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 1978–1990
- Bondár I., McLaughlin K. (2009a): A new ground truth data set for seismic studies. *Seismological Research Letters*, 80/3, 465–472
- 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
- Bondár I., Myers S. C., Engdahl E. R. (2014): Earthquake location. In: *Springer Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Beer M., Kougoumtzoglou I. A., Patelli E., Au I. S. K. (eds.). Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-36197-5_184-1
- Bondár I., Storchak D. (2011): Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical Journal International*, 186/3, 1220–1244
- Geiger L. (1910): Herbsetimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. *K. Gessell. Wiss. Goett.* 4, 331–349
- Geiger L. (1912): Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ.* 8, 60–71
- 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*, Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, MTA CSFK GGI, Budapest, 466 pp.
- Grácz Z., Wéber Z. (2012): One-dimensional P-wave velocity model for the territory of Hungary from local earthquake data. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 47/3, 344–357
- Havskov J., Ottemöller L. (2009): *Processing earthquake data*. Universitetet i Bergen, p. 67
- International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2014
- Kennett B., Engdahl E., Buland R. (1995): Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122/1, 108–124
- Kværna T. (1996): Time shifts of phase onsets caused by SNR variations. *NORSAR Sci. Rep.* 2-95/96, 143–152
- Paige C. C., Saunders M. A. (1982): LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 8/1, 43–71
- Pavlis G. L. (1986): Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete, practical approach for single-event locations. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 76, 1699–1717
- Waldhauser F. (2001): hypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations. *Usgs Open-file Report*
- Waldhauser F., Ellsworth W. L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90/6, 1353–1368
- Wéber Z. (2015): Probabilistic waveform inversion for 22 earthquake moment tensors in Hungary: new constraints on the tectonic stress pattern inside the Pannonian basin. *Geophysical Journal International*, 204/1, (1 January 2016), 236–249