

Eötvös Lóránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

**Földrengések hipocentrumának meghatározása
a beérkezési idők együttes inverziójával**

Témavezető:

Győri Erzsébet
Tudományos főmunkatárs
MTA CSFK GGI
Szeizmológiai Obszervatórium

Szerző:

Farkas Péter
ELTE TTK
Földtudomány BSc

Budapest, 2012. november 27.

Tartalomjegyzék

Bevezető	3
<i>A hipocentrumok meghatározásának elméleti és gyakorlati jelentősége</i>	3
<i>Célkitűzés</i>	3
A hipocentrum meghatározás módszerei	4
<i>Az abszolút helymeghatározás folyamata</i>	4
<i>Relatív helymeghatározási módszerek</i>	6
<i>A kétszeres különbség módszere</i>	7
Hipocentrumok relokalizációja Berhida környékén	12
<i>A felhasznált adatok és azok feldolgozása</i>	12
<i>Az inverzió paramétereinek meghatározása</i>	15
<i>A paraméterezés hatásainak vizsgálata</i>	18
<i>Összefoglalás</i>	23
Felhasznált irodalom	26

Bevezető

A hipocentrumok meghatározásának elméleti és gyakorlati jelentősége

A földrengések keletkezési helyének és idejének pontos meghatározása a szeizmológia alapfeladatai közé tartozik. A hipocentrumok meghatározása kijelölte számunkra a lemezhatárokat, így kulcsfontosságú volt a lemeztektonikai elméletek megalkotásához. Ezért ezek minél pontosabb lokalizációja segíthet a kisebb léptékű vetőstruktúrák felismerésében és vizsgálatában is. Mivel helyi skálán a folyamatok szorosan összefüggnek egymással, ezért a mélyben zajló eseményeket ismerve pontosabb veszélyeztetettségi térképek is készíthetők. Tehát a földrengések hipocentrumainak meghatározása előrébb vihet minket a Föld szeizmotektonikájának megismerésében mind globális, mind lokális skálán, ezáltal közelebb jutva a földrengések előrejelezhetőségéhez is.

Az obszervatóriumi gyakorlatban a hipocentrum meghatározása közvetlenül a földrengés keletkezése után, minden egyes eseményre külön-külön történik. Ennek pontatlansága azonban még lokális földrengések esetén is olyan nagy lehet, hogy lehetetlenné teszi a rengések és az ismert törésvonalak összekapcsolását, a szeizmotektonikai értelmezést.

A hibák csökkentésére többféle módszert is alkalmaznak, ilyenek például az együttes inverziós módszerek. Ezek segítségével utólag, egy adott területen keletkezett földrengések fázisadatainak egyidejű felhasználásával lehet a helymeghatározást elvégezni. Alkalmazásukkal a szeizmológiai állomások környezetének inhomogenitásaiból eredő hibák hatékonyan csökkenthetők. Ezek közül az egyik az utóbbi években sokak által használt kétszeres különbség (double difference) módszer.

Célkitűzés

Dolgozatom keretében először áttekintem a módszer elméleti alapjait, majd ennek segítségével a kiválasztott Berhida-környéki területen elvégzem a hipocentrumok újra meghatározását. Céлом, hogy a területen található legtöbb rengés helyzetén pontosítsak, ezáltal felismerhetővé téve a vetőstruktúrákat. Munkám eredménye terveim szerint egyértelműen látszik majd a létrejövő relokalizált hipocentrum térképeken, melyeken kisebb hibával, pontosabban helyezhetők el az események.

A hipocentrum meghatározás módszerei

Az abszolút helymeghatározás folyamata

Ahogy a bevezetőben említettem, a feladat, amivel foglalkozni szeretnék, egy adott földrengésre négy paraméter minél pontosabb meghatározása. Ezek a hipocentrum (x, y, z) és a kipattanási idő (T) . Ebben a részben Shearer (2009) leírása alapján először azt szeretném bemutatni, hogy az általános rutinmódszerek használatával hogyan jönnek létre a katalógus adatai. A legtöbb helymeghatározási módszer a földrengéseket pontszerű forrásként kezeli, annak ellenére, hogy a nagyobb rengéseket akár több száz kilométeres törések is okozhatják. Tehát a hipocentrum nem feltétlenül a földrengés valódi központja, sokkal inkább az a pont, ahonnan a szeizmikus hullámok először elindulnak az esemény kezdetén. Mivel a törési sebesség kisebb, mint a P-hullám sebessége, ezért a hipocentrum meghatározható az első beérkezésekből, az esemény nagyságától és időtartamától függetlenül.

Hozzunk létre ezekből a paraméterekből egy modell vektort:

$$\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3, m_4) = (T, x, y, z).$$

Tegyük fel, hogy van n darab észlelésünk a szeizmikus hullámok útidéjéről (t_i) különböző szeizmológiai állomásokon. Hogy ezekből az időkből meg lehessen határozni a földrengések paramétereit, szükség van egy referencia Föld modellre. Így minden egyes különböző $\mathbf{m}$ vektorra és i -edik állomásra kiszámolható egy várható beérkezési idő (t_i^P) :

$$t_i^P = F_i(\mathbf{m}).$$

Itt $\mathbf{F}$ az az operátor, ami megadja a várható beérkezési időket minden i -edik állomásra $\mathbf{m}$ alapján. Ez a felhasznált Föld-modell és az egyes állomások helyének függvénye.

A különbség a megfigyelt és a várható idők között

$$r_i = t_i - t_i^P = t_i - F_i(\mathbf{m}),$$

ahol r_i a reziduál az i -edik állomáson. Azt a $\mathbf{m}$ -et keressük, ami valamilyen megközelítésben a legkisebb reziduálokat adja a megfigyelt és a várható idők között. Ez a megközelítés általában a legkisebb négyzetek elve, ami alapján az

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (t_i - t_i^P)^2$$

értékét minimalizáljuk, ahol n az állomások száma. A legkisebb négyzetek elvét gyakran használják a hiba mérésére, ami jó közelítéssel használatos, ha t és t^p eltérésének hibáját azokkal nem korreláló, véletlenszerű Gauss-eloszlású zaj okozza. Ebben az esetben definiálhatjuk a

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(t_i - t_i^p)^2}{\sigma_i^2}$$

értéket, ahol σ_i a i -edik reziduál véletlenszerű mérési hiba által okozott várható szórása.

Fontos, hogy $\mathbf{F}$ nemlineáris függvénye a modell térbeli paramétereinek. Ez a nemlinearitás Descartes-kordináta rendszerben, homogén közegben, tehát állandó sebességnél (v) a következő formában írható:

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}{v}$$

ahol x_i, y_i és z_i a i -edik szeizmikus állomás koordinátái.

A gyakorlatban a legkisebb ε az adatok jellegéből adódóan és a numerikus módszerek korlátai miatt nem határozható meg direkt módon. Az általános módszer a probléma linearizálása figyelembe véve a célhely kis perturbációit:

$$m = m_0 + \Delta m$$

ahol m_0 a jelenlegi becslés a legjobb helyre és m az új hely kis távolságra m_0 -tól. A várható idők m -ben közelíthetők Taylor-sorfejtéssel az elsőrendű tagig:

$$t_i^p(m) = t_i^p(m_0) + \frac{\partial t_i^p}{\partial m_j} \Delta m_j$$

Így a reziduálok az új helyen felírhatóak

$$r_i(m) = t_i - t_i^p(m) = t_i - t_i^p(m_0) - \frac{\partial t_i^p}{\partial m_j} \Delta m_j = r_i(m_0) - \frac{\partial t_i^p}{\partial m_j} \Delta m_j$$

alakban. Ahhoz, hogy ezeket a reziduálokat minimalizáljuk olyan Δm -et keresünk, amire igaz, hogy

$$r_i(m_0) = \frac{\partial t_i^p}{\partial m_j} \Delta m_j$$

$$r(m_0) = G \Delta m$$

ahol G a parciális deriváltak mátrixa, tehát $G_{ij} = \partial t_i^p / \partial m_j, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, \dots, 4$. Hogy megkapjuk a legjobb illeszkedést, a legkisebb négyzetek elvével kiszámoljuk Δm -et. Ezt hozzáadva m_0 -hoz módosítjuk annak értékét és megismételjük a folyamatot, amíg m egy

adott helyhez nem konvergál. Ez az iterációs folyamat elég gyorsan konvergálni kezd, feltéve hogy a kezdeti becslés nincs túl messze az aktuális pozíciótól.

Relatív helymeghatározási módszerek

Abban a gyakori esetben, amikor a hiba főként a nem modellezett 3D sebességtér hatásából adódik, egy kisebb területen az események egymáshoz viszonyított relatív helyzete jelentősen nagyobb pontossággal határozható meg, mint bármely esemény abszolút helyzete. Ez azért van, mert a laterális sebességanomáliák a kisebb területen kívül, melyek a mért útidők változásaihoz vezetnek a távoli állomásokon, ugyanolyan hatással lesznek mindegyik eseményre. Másszóval, a 3D-s szerkezet által okozott reziduálok egy adott állomáson korrelálni fognak minden eseményre.

Hogy növeljük a relatív pontosságot a közeli földrengések között, többféle módszert is használhatunk. A következőkben ezeket röviden összefoglalva és közülük az általam felhasználtat részletesen ismertetve mutatom be. Ehhez a kétszeres különbség módszert bemutató cikket idézve, annak gondolatmenetét használom fel. (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

Az egyik lehetséges mód, hogy számításba vegyük a sebesség változásait, forrás- és állomáskorrekciók bevezetése a helymeghatározási folyamatba, és/vagy az inverziót kiterjesztve a sebességtérre is.

Tovább növelhető a helymeghatározás finomsága a relatív beérkezési idők pontosabb leolvasásával, a hullámformák keresztkorrelációjának módszerét használva. Ennek lényege, hogy két földrengés hasonló jelalakot hoz létre egy közös állomáson, ha forrásmechanizmusuk szinte teljesen megegyezik, valamint forrásaik elég közel vannak egymáshoz, így a jel szóródása a sebességtér heterogenitásai miatt kicsi. A két korrelált jelre számított keresztkorrelációs függvény maximumhely eltolódása pedig sokkal pontosabban megadja a beérkezési idő különbséget a két esemény között, mint amit a katalógusban megadott, rutin eljárás során kijelölt fázisokból számíthatunk. Hasznos ökölszabály az események közötti legnagyobb távolságra, amin felül már a földrengések jelalakja inkoherezsé válik, körülbelül a legmagasabb frekvenciájú jelentős hullámösszetevő hullámhosszának $1/4$ -e, ami az első Fresnel-zónával van kapcsolatban. A hasonlóság a hullámformák között kihasználható a frekvencia- és az időtartományban is. 1 ms-os relatív időmérési pontossággal az ilyen differenciális útidő adatok segítségével a földrengések egymáshoz viszonyított relatív helyzete néhány métertől néhány tíz méterig terjedő hibával

meghatározható, szemben a katalógusokban gyakran előforduló kilométeres hibákkal. (Shearer, 2009)

Kétféle módszert használnak gyakran a relatív hely meghatározására, a mért útidő különbségeket felhasználva. Az mesteresemény (*master event*) megközelítésben minden egyes eseményt csak ugyanahhoz az egyetlen rengéshez, a mestereseményhez viszonyítva helyezünk át. Mivel az összekapcsolás csak egyetlen eseményen keresztül történik, a zaj korrelációjából adódó hibák a mestereseményben kiterjedhetnek az egész csoportra és így minden esemény helyére hatással lehetnek. Ez a megközelítés határt szab a csoport legnagyobb térbeli kiterjedésének is, mivel minden eseménynek korrelálnia kell a mestereseménnyel. A másik megközelítés a kettős különbség módszere (*double-difference method*), amelynél nincs kitüntetett esemény, és igen hatékony a nagy távolságokban található, nagy mennyiségű földrengés helyzetének újrahataározására.

A kétszeres különbség módszere

A kettős különbség módszer (Waldhauser & Ellsworth, 2000) kombinálja a keresztkorrelációs módszerrel meghatározott és a katalógusadatokból számolt P- és S-hullám beérkezési idő különbségeket, miközben minimalizálja a reziduál különbségeket (ezek a kettős különbségek) a földrengéspárokra vonatkoztatva, a hipocentrumok közötti vektorkülönbségek pontosításával. Így meghatározhatóak a korreláló események közötti távolságok, melyek egyetlen csoportot alkotnak, a keresztkorrelációval számított időkülönbségek adatainak pontosságával. Ezzel párhuzamosan meghatározásra kerül minden egyes csoport és a nem korreláló események relatív helyzete az abszolút útidő adatok pontosságával anélkül, hogy szükség lenne állomáskorrekcióra.

Szeretném kihangsúlyozni, hogy a gyakorlati alkalmazás során csak katalógusadatok segítségével végzem el a hipocentrumok újrahataározását, részben az adatok hiánya, részben a feladat komplexsége miatt, ezért a módszer ismertetésénél is ezt a felét mutatom be részletesebben. Természetesen ebből adódóan az általam kapott eredmények kevésbé lesznek pontosak, ahhoz képest, hogy ha keresztkorrelációból származó adatokat is felhasználtam volna.

A beérkezési idő (T) egy földrengésre (i) egy szeizmikus állomáshoz (k) kifejezhető egy vonal menti integrállal a sugár mentén,

$$T_k^i = t_0 + \int_i^k u ds$$

ahol t_0 az i esemény kipattanási ideje, u a lassúsági mező és ds az út egy kicsi szakasza. Ahogy korábban is említettem, a menetidő és az esemény helye közötti nemlineáris kapcsolat miatt általában egy rövidített Taylor-sorfejtéssel linearizálják a kifejezést. Az így kapott probléma tehát,

$$\frac{\partial r_k^i}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^i = r_k^i$$

az eddigi jelöléshez hasonlóan. Ez az egyenlet jól működik a mért beérkezési idők használatával. Ezzel szemben, a keresztkorrelációs módszerek útidőkülönbségeket mérnek az események között ($t_k^i - t_k^j$ minden k állomásra), ennek következményeként az egyenlet közvetlenül nem használható. Azonban megkaphatjuk a relatív hipocentrum-paramétereket két esemény között, ha vesszük az egyenlet különbségét egy eseménypárra,

$$\frac{\partial r_k^{ij}}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^{ij} = dr_k^{ij},$$

ahol $\Delta \mathbf{m}^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta dt_0^{ij})$ a relatív hipocentrum-paraméter változás két esemény között, és t parciális deriváltjai, $\mathbf{m}$ figyelembevételével a forrást és az észlelőt összekötő lassúságvektor komponensei. Vegyük észre, hogy ebben az egyenletben a forrás a két hipocentrum központja, állandó lassúságvektort feltételezve a két eseményre. dr_k^{ij} a reziduál a megfigyelt és a számolt útidő között két eseményre vonatkoztatva, tehát

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{megf} - (t_k^i - t_k^j)^{szám}.$$

Ezt az egyenletet definiáljuk kettős különbségként. Ez egyaránt használható mért beérkezési időkkel, ahol a megfigyelt mennyiségek abszolút útidők, vagy keresztkorrelációs relatív útidő különbségekkel.

Jogosan feltételezünk konstans lassúságvektort azokra az eseményekre, amelyek elegendően közel vannak egymáshoz, de ez nem lesz igaz, ha messzebb vannak egymástól. Ezért az általánosan érvényes egyenlet a hipocentrumok közötti távolság megváltozására két i és j esemény között, a megfelelő lassúságvektor használatával minden egyes eseményre

$$\frac{\partial r_k^i}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^i - \frac{\partial r_k^j}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^j = dr_k^{ij}.$$

Az útidők parciális deriváltjait (t) az i és j eseményekre, a helyükre (x, y, z) és a kezdeti idejükre (t_0) vonatkozóan, az aktuális hipocentrumra és állomásra számolják ki, ahol a k -adik fázist rögzítették. $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ és Δt_0 a szükséges változások a hipocentrum paramétereiben, melyek ahhoz szükségesek, hogy a modell jobban illeszkedjen az adatokhoz.

Ha összevonjuk ezt az egyenletet egy állomáson minden hipocentrum párra, és ezt megteesszük az összes állomásra, akkor egy lineáris egyenletrendszert kapunk,

$$\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{W}\mathbf{d},$$

ahol $\mathbf{G}$ egy $M \times 4N$ -es mátrix (M a kettős különbség megfigyelések száma, N az eseményeké), ami a parciális deriváltakat, $\mathbf{d}$ az adatvektor, ami a kétszeres különbségeket, $\mathbf{m}$ egy $4N$ nagyságú vektor, ami a meghatározandó hipocentrum-paramétereket tartalmazza és $\mathbf{W}$ egy diagonális mátrix, ami súlyozza az egyes egyenleteket.

Ennek megoldása történhet súlyozott legkisebb négyzetek és normálegyenletek használatával:

$$\hat{\mathbf{m}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{d}.$$

Az egyenlet megoldható kisebb csoportokra és jól kondicionált rendszerekre szinguláris felbontással is (*singular value decomposition, SVD*):

$$\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{d}$$

ahol $\mathbf{U}$ és $\mathbf{V}$ ortogonális mátrixok, melyek oszlopaiban a súlyozott $\mathbf{G}$ mátrix szinguláris vektorai találhatóak és $\mathbf{\Lambda}$ egy $\mathbf{G}$ szinguláris értékeit tartalmazó diagonális mátrix. Használhatjuk a SVD-t a kis rendszerek vizsgálatára, mert az $\mathbf{U}$, $\mathbf{\Lambda}$ és $\mathbf{V}$ mátrixok tartalmazzák az $\mathbf{m}$ ismeretlen paramétereinek megoldhatóságára vonatkozó információkat és az információ mennyiségét (vagy annak hiányát) a $\mathbf{d}$ vektor által biztosított adatokban. Megbecsülhető a legkisebb négyzetes hiba (e_i) minden egyes i modellparaméterre a

$$e_i^2 = C_{ii} \cdot var$$

egyenlettel, ahol C_{ii} a $\mathbf{C} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda}^{-2} \mathbf{V}^T$ kovarianciamátrix átlós eleme és var a súlyozott reziduálok varianciája,

$$var = \frac{\sum_{i=1}^M (d_i - \bar{d})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^M d_i - \bar{d})^2}{M}}{M - (4N)}$$

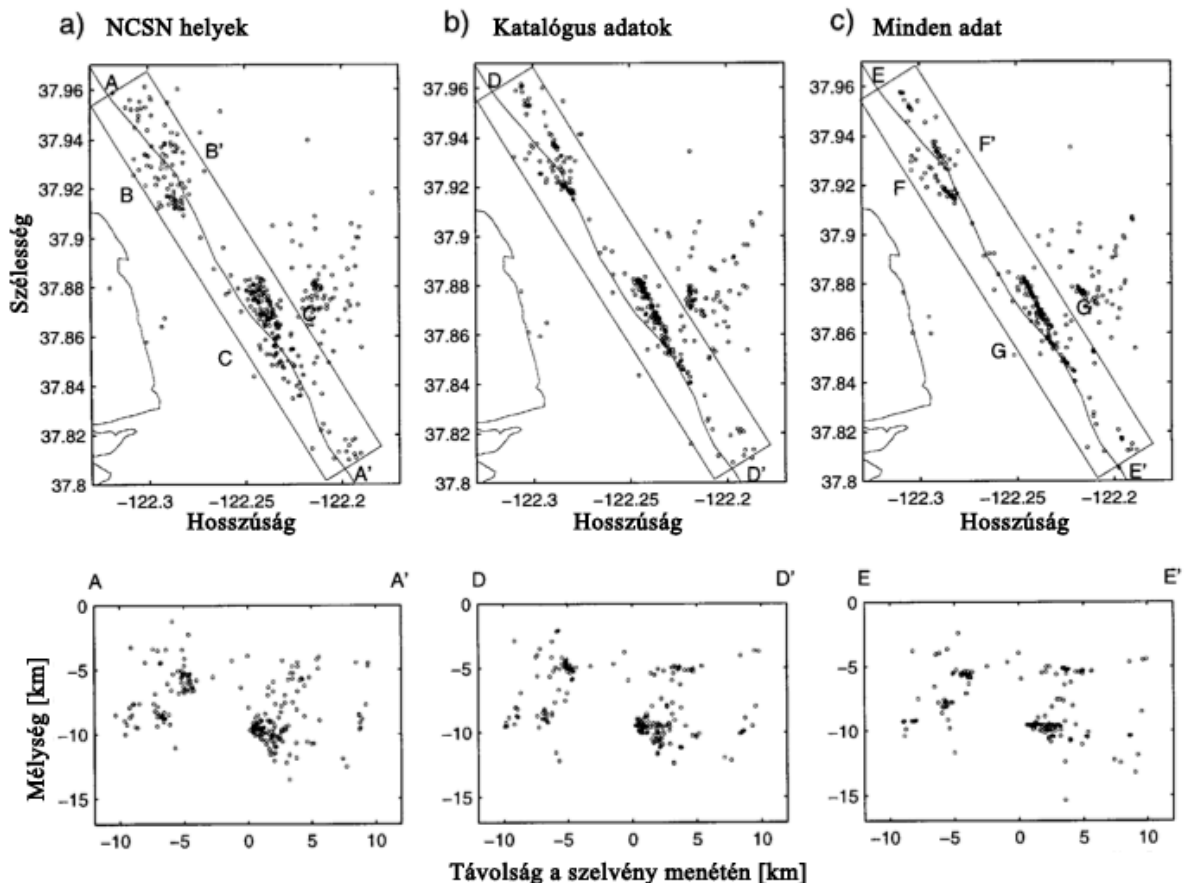
ahol $\bar{d}$ a reziduálvektorok átlaga és d_i az i -edik észlelés reziduálja.

A kezdeti megoldás tehát a kiindulási helyek és az előzetes súlyok felhasználásával kapható meg. A folyamatot ezután addig iteráljuk, amíg egy stabil megoldást nem kapunk (ez általában 2-3 iteráció SVD használata esetén) és aztán folytatjuk az iterálást az adatok újrásúlyozásával. Az előzetes súlyokat megszorozzuk olyan súlyokkal, melyek az előző iterációból származó adatok hibájától és az események eltolástól függenek.

A feladat legkisebb négyzetes elvű megoldása Gauss-eloszlású hibát feltételez, azonban az útidő adatokban lévő hibák lassabb lecsengésűek, ezért ezek az iteráció során levágásra kerülhetnek. Azokat az adatokat is lesúlyozhatjuk, melyek egymástól nagy távolságra lévő eseménypárokhoz tartoznak.

Akkor ér véget az iterációs folyamat, amikor az rms reziduál elér egy, az adatok zajszintje alapján meghatározott küszöböt, a megoldásvektorban bekövetkező változás egy választott küszöb alatt van, vagy az iterációk száma eléri az előre meghatározott maximumot.

A módszer működésének demonstrálására az Észak Kaliforniai Szeizmikus Hálózat (*Northern California Seismic Network, NCSN*) adatait felhasználva, a Northern Hayward vető mentén 1984 és 1998 között bekövetkezett földrengésekre végezték el a hipocentrumok újra meghatározását. Az 1. ábrán látható, hogy eredményes volt a relokalizáció, a felső térképi nézetben a diffúz eloszlású rengések lineáris objektumokká állnak össze, az alsó ábrákon mélységük pedig adott mélységek köré csoportosul.



1. ábra Az NCSN által meghatározott helyek (a), a kettős különbség módszerével katalógus adatok alapján újra meghatározott helyek (b) és a keresztkorrelációs és katalógusadatokat

együttesen felhasználó újrarahatórozás eredményei (c) az El Cerrito és a Berkeley csoportban.
(Waldhauser & Ellsworth, 2000)

A módszert az egész világon sikerrel alkalmazták már, például Közép-Nyugat-Kína egy területére, ahol az 1992 és 1999 között kipattant 10057 földrengés, több mint 150000 fázisadatát felhasználva végezték el az újrarahatórozást. Az eredmények jól korrelálnak a vetőszerkezetekkel és a tektonikai struktúrákkal, amik a felszínen is vizsgálhatóak. (Waldhauser et al., 2005) De összekapcsolható akár szeizmikus tomográfiai módszerekkel is, ahogy ezt Hawaii szigetének vulkanikus struktúráinak vizsgálatára is felhasználták. Ennek eredményeként stabil és részletes sebességmodelleket kaptak, ami részletes képet mutat a sziget szerkezetéről és a magmás komplexumokról. (Monteiller et al., 2005)

Mindezek fényében a módszer jól használható lehet Magyarországi területeken is, mivel a rutinszerűen meghatározott hipocentrumok paraméterei itt is jelentős hibával terheltek, ami a fenti elméleti megfontolásokból és példákból jól láthatóan jelentősen javítható a kettős különbségek módszerével.

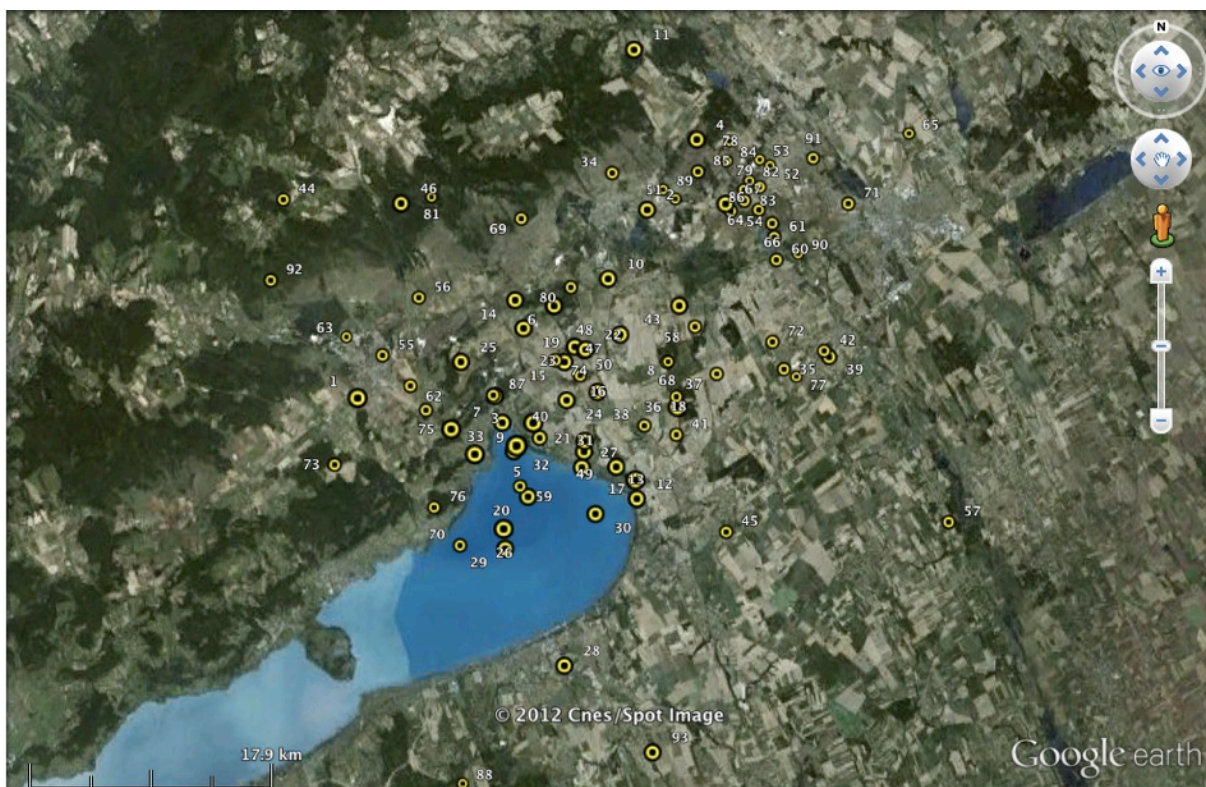
Hipocentrumok relokalizációja Berhida környékén

A felhasznált adatok és azok feldolgozása

Az általam vizsgált terület az északi szélesség 46,8-47,25 foka és a keleti hosszúság 17,8-18,5 foka között található. Azért ez a zóna lett kiválasztva, mert itt a magyarországi viszonyokhoz képest kis területen nagy szeizmikus aktivitás tapasztalható. Ez főként a 1985-ös Berhida környéki rengéseknek köszönhető, amikor egy rövidebb periódus alatt sok rengést észleltek erről a területről. Ideális tehát a kettős különbségek módszerének használatához, mert az egymáshoz viszonylag közel található események közti távolság az állomásoktól mért távolsághoz viszonyítva kicsi, ezért a beérkezési idők különbsége főként a rengések környezetének viszonyaira lesz jellemző.

A kiválasztott rengések relokalizálását Waldhauser (2001) HypoDD nevű, Linux operációs rendszer alatt működő programjával végeztem. Az inverzió végrehajtása előtt szükséges a fázisadatokból az időkülönbségek számítása. Ezt szintén Waldhauser (2001), ph2dt nevű programja segítségével végeztem.

A felhasznált földrengések és azok fázisadatai egyrészt nemzetközi katalógusokból (International Seismological Centre, 2010), másrészt a hazai bulletinekből származnak. (Szeizmológiai Obszervatórium, 2008-2012) Az általunk kiválasztott területre összesen 92 esemény (2. ábra) fázisadatait dolgoztam fel, ezek 1971. 07. 01. és 2012. 09. 30. között történtek.



2. ábra A vizsgált terület és az adott időintervallumban kipattant földrengések katalógusban szereplő helyzete (a térképeken a jelek nagysága a rengések magnitúdójával arányos).

Ezeket a különböző formátumú fázisadatokat Microsoft Excel segítségével időigényes munkával szűrve és formázva dolgoztam fel és hoztam létre belőlük a ph2dt programhoz szükséges egyik input fájlt (*phase.dat*). Ez a fájl tartalmazza minden egyes eseményre a keletkezés dátumát, idejét, a (pontosítandó) hosszúság, szélesség és mélység adatokat, a rengés magnitúdóját, opcionálisan a meghatározott hely horizontális és vertikális hibáját, az RMS hibát és egy egyedi azonosítót. Ezeket a katalógusadatokról területre és időre szűrve kaptam meg és formáztam a program által megkövetelt formátumba.

Ezen kívül ez a fájl tartalmazza minden egyes rengéshez és állomáshoz a fázisok terjedési időit, a fázisokat (P vagy S) és az azokhoz tartozó súlyokat. A súlyozást a következő empirikus elvek szerint végeztem: minden S hullám 0,2-szeres szorzót kapott, az S hullámok leolvasásának bizonytalanságából adódóan. Ezen kívül minden „e-vel kezdődő” (*emergent*) P hullám fázis pedig 0,75-szöröset, mert ezek az impulzív, hirtelen emelkedő adatokkal szemben, lassan emelkednek, így leolvasásuk is pontatlanabb lehet. Az útidőket szintén az Excel segítségével állítottam elő, az események kipattanási- és a fázisok beérkezési idejének különbségeként.

A ph2dt program a katalógusban található P- és S-fázisokban keres olyan eseménypárokat, melyek rendelkeznek közös állomásokon mért útidőekkel. Ideális esetben olyan hálózatot keres az események között, ahol páronként összekapcsolt események láncolatából bármelyik eseménytől eljuthatunk bármely másikig úgy, hogy az összekapcsolt események között a lehető legkisebb a távolság.

Ehhez a programhoz szükségesek még a fázisokat észlelő állomások adatai: azok rövidítése, hosszúság- és szélességkoordinátái. Ezeket az adatok az ISC online keresőjének segítségével (International Seismological Centre, 2010) gyűjtöttem össze és Excelben rendeztem a szükséges formátumba.

A harmadik és egyben utolsó bemeneti fájlban a ph2dt program futtatásához szükséges paramétereket állíthatjuk be. Ezek a következők (zárójelben az általam megadott paraméterek): megadhatjuk a legkisebb kiválasztott súlyt, amit a program figyelembe vesz (0); az összepárosított események és az állomás közti legnagyobb távolságot (1000 km, mert ez a HypoDD-ben is szűkíthető); az eseménypárok tagjai közti legnagyobb távolságot (25 km, hasonló okokból); az eseményenkénti szomszédok legnagyobb számát (100, mert ezt csak a számításigényes problémáknál szükséges limitálni); a kapcsolatok minimális számát, melyek egy szomszéd definiálásához szükségesek (8, mert ennyi szabadságfoka van egy eseménypárnak) és az elmentett kapcsolatok minimális illetve maximális számát (1 és 1000, mert minden adatot szeretnék felhasználni).

Az így elkészített három bemeneti fájl segítségével Linux operációs rendszerben lefuttattam a korábban létrehozott programot, ami kimenetként létrehozta a HypoDD futtatásához szükséges útidőpárokat tartalmazó (*dt.ct*) valamint az eseményeket összefoglaló (*event.dat*) fájlokat, valamint egy naplófájlt, ami tartalmazza a program által létrehozott adatrendszer főbb paramétereit is (*1. táblázat*).

P-phase pairs total =	7821
S-phase pairs total =	1747
outliers =	1923 (20 %)
phases at stations not in station list =	5
phases at distances larger than MAXDIST =	0
P-phase pairs selected =	6084 (77 %)
S-phase pairs selected =	1556 (89 %)
weakly linked events =	92 (100 %)

1. táblázat a ph2dt program által létrehozott adatrendszer összefoglaló statisztikája a ph2dt.log naplófájlban. A sorokban rendre a P- és S-fázispárok száma, a kiugró értékek száma, az állomáslistában nem található állomásoknál regisztrált fázisok száma, a megengedett legnagyobb távolságnál távolabb lévő fázisok száma, a kiválasztott P- és S-fázisok száma és a gyengén összekapcsolt események száma található.

Ezek alapján látható, hogy jelentős előszűrést végez ez a program is, kiugró értéként kiszűrve az adatok 20%-át. Ezeket a program úgy azonosítja, hogy a két beérkezés különbsége az adott állomásra nagyobb, mint a maximum várt különbség az adott eseménypárra. A maximum várt különbséget, amit egy P-/S-hullám megtesz két esemény között az események kezdeti helyéből és rendre 4 illetve 2,3 km/s P- és S-hullám sebességből határozza meg, 0,5 másodpercet hozzáadva a levágáshoz, hogy számításba vegye a kezdeti helyek bizonytalanságát. Látható még, hogy a 92 feldolgozott rengés mindegyike csak gyengén kapcsolódik a többihez, tehát a köztük lévő kapcsolatok száma sehol sem éri el az előre megadott 8-at, ami a stabil megoldáshoz ajánlott lenne. Ennek oka főként a területen található rengések kis magnitúdója, ami miatt csak kevés állomáson észlelhetők és az állomások kis száma, nem ideális térbeli eloszlása.

Az inverzió paramétereinek meghatározása

A HypoDD programhoz, a ph2dt által előállított bemeneti adatokon kívül tartozik egy paraméterfájl is, melyben helyes beállításokat alkalmazva érhető el a kívánt eredmény. Ennek bizonyos beállításai értelemszerűek, azonban vannak olyanok is, melyek értékét csak több próbafuttatás eredményének vizsgálatával tudtam meghatározni. Ennek a fájlnek az egyik változatát a függelékben mutatom be.

Az egyértelmű beállítások az alábbiak: bemeneti és kimeneti fájlok, az adat típusa, a felhasznált fázisok.

A következő csoportba azok a paraméterek tartoznak, melyek nem triviálisak, de tesztelés nélkül is meghatározhatóak számunkra megfelelő értékeik. Ezen belül a legnagyobb távolságot az eseménycsoportok és az állomások között 300 km-re szűkítettem, mert a

távolabbi állomásoknál csak kevés és pontatlan adat található. Az iterációt két részre osztottam, az első felében lazább, a másodikban szigorúbb paraméterekkel, ezáltal biztosítva a stabil, de pontos megoldást. Az inverzió során kezdeti feltételnek, vagyis a hipocentrumok kezdeti becslésének a katalógusban szereplő adatokat választottam.

A HypoDD egy 1D-s síkrétegzett sebességmodell felhasználva számolja ki az útidőket a kezdeti helyekre. Ehhez a következő három rétegű modellt alkalmaztam (Mónus, 1995): a réteghatárok 20 km-nél és 31 km-nél találhatóak, a rétegek sebességei rendre 5,6 km/s, 6,57 km/s és 8,02 km/s, a P/S hullám terjedési sebességének (v_p/v_s) arányát pedig 1,78-nek választottam.

Az utolsó csoportba azok a beállítások tartoznak, melyek optimális beállításait csak teszteléssel lehet meghatározni. Ezek közül az első és egyik legfontosabb a legkisebb négyzetes megoldás típusa. Úgy gondoltam, hogy a fentebb bemutatott szinguláris érték felbontás (SVD) ideális lehet a feladathoz, mert a probléma nagysága alapján (kevesebb mint 100 esemény) ez tűnt megfelelőnek. Ez valós képet ad a hipocentrum-paraméterek megoldhatóságáról, az adatok által szolgáltatott információ mennyiségéről és a valós legkisebb négyzetes hibákat mutatja meg. Azonban pontosan emiatt nem sikerült SVD segítségével a programot megfelelően lefuttatni, mert az iterációk során a felhasznált fázisok és a vizsgált események száma folyamatosan csökkent, miközben az RMS hibát jelentősen nem sikerült lecsökkenteni. Az események számának csökkenése annak volt köszönhető, hogy a HypoDD a következő iteráció során már nem veszi figyelembe a légrengeket (*airquake*), vagyis azokat az eseményeket, melyekre az inverzió során negatív mélység adódik. Tehát a szinguláris felbontással nem sikerült jól használható, stabil megoldásra jutni. Ennek legfőbb oka az eseménypárok közötti kapcsolatok alacsony száma. Ezért a másik lehetőséggel, a konjugált gradiensek módszerével (*LSQR*) kellett megoldani a feladatot. Ez a kettős különbség egyenletek ritkasságát használja fel a megoldáshoz. Ennek hátránya azonban, hogy az LSQR által számolt hibák jelentősen alulbecsültek lehetnek.

A konjugált gradiensek módszere a csillapított legkisebb négyzetes problémát oldja meg. Ehhez meg kell adni egy csillapítási tényezőt, ami csillapítja a hipocentrumokban bekövetkező változásokat, ha a pontosítás vektora túl nagy vagy instabil lenne. A csillapítási tényező erősen függ a megoldandó rendszer állapotától. A rendszer állapota kifejezhető egy kondíciós számmal, ami a legnagyobb és a legkisebb sajátérték különbsége. Ezt a HypoDD program a futtatás végén minden iterációhoz kiszámolja és megjeleníti. A korábbi

megfigyelések alapján a kondíciós szám ideális értéke 40 és 80 között van (Waldhauser, 2001). Hogy ezt elérjük, be kell állítani a megfelelő csillapítási tényezőt, amit teszteléssel határoztam meg. Úgy találtam, hogy az általam megadott rendszerhez 20 a megfelelő tényező, hogy a kondíciós számot a kívánt értékek között tartsam, habár ez függhet a többi beállítástól is.

A következő három paraméter vizsgálata csak együttesen lehetséges. Mivel lehetséges értékeiknek számos variációja létezik, ezért először általánosságban mutatom be őket, majd a rengeteg lefuttatott újrahatározás közül hat általam érdekesnek gondolt eredményt kiemelve szemléltetem ezen beállítások hatását.

Közülük az első a csoportot alkotó eseménypárok közötti kapcsolatok minimum száma. Ez a paraméter lehetőséget ad szűrésre akkor is, ha csak egyetlen csoport jön létre az adatokból. Növelésével csökkenthető az inverzió során számolt hiba nagysága, viszont csökkenti a 92 esemény közül az újrahatározottak számát is. A ph2dt eredményeiből tudom, hogy az események közötti kapcsolatok átlagos száma 5 és nagyon kevés esetben éri el a 8-at, ezért ennek a paraméternek az értékét 0 és 8 között változtattam.

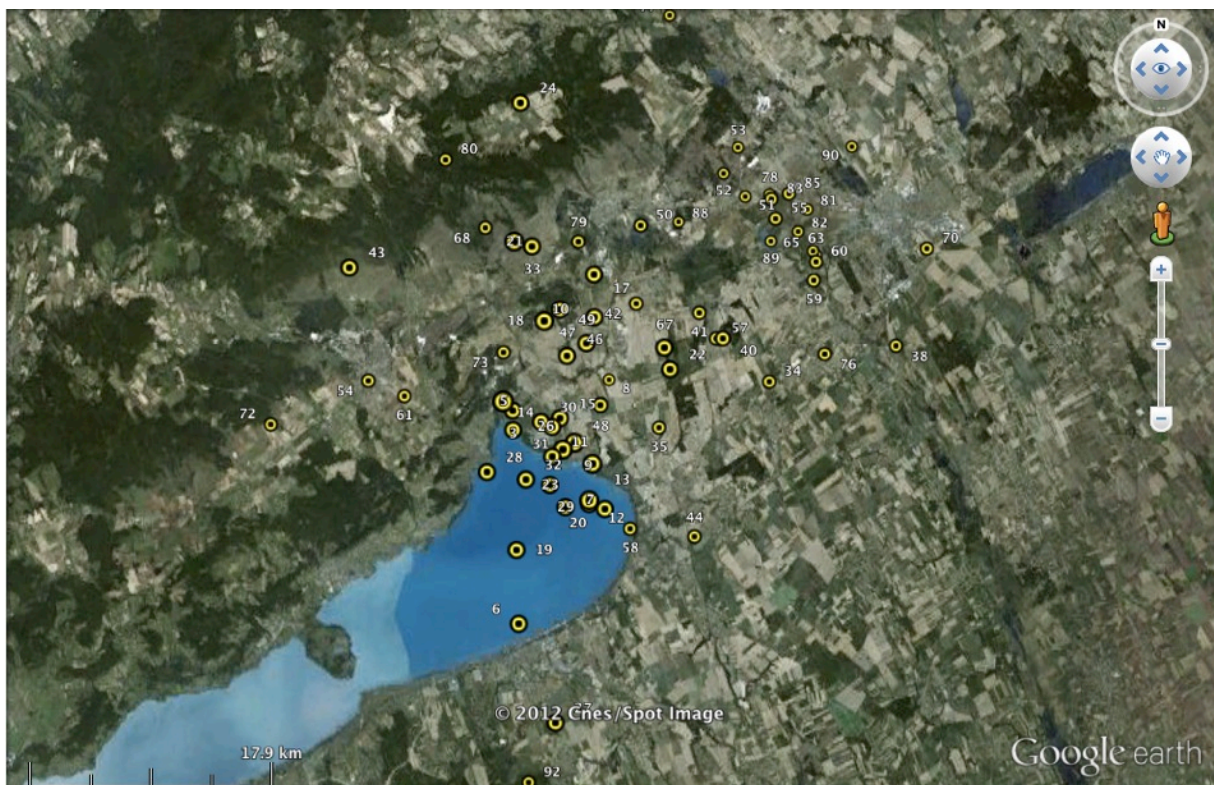
A következő lehetőség az összekapcsolt események közötti távolság maximumának korlátozása. Ennek legnagyobb értéke a ph2dt program korábbi beállításai alapján 25 km, de ezt érdemes csökkenteni, ezáltal konzisztensebbé téve az adatrendszert. Az eseményeket a program akkor rendezte egynél több csoportba, ha ez az érték alacsony, a kapcsolatok száma pedig magas. Szélsőséges esetben azonban olyan csoportok is létrejöhetnek, melyek csak kevés eseményből állnak. Például, ha a fenti értékeket 8-nak és 10 km-nek választom, ekkor a 92 eseményből csak 17-et rendez csoportokba, melyek eloszlása 6, 3, 2, 2. Természetesen ezzel a bemenő adatok nagy része nem kerül felhasználásra és a tervezett cél sem teljesül, mert az események kis részének hipocentrum-paraméterei kerülnek csak újrahatározásra.

A harmadik ide tartozó beállítás a levágási küszöb az adatrendszerből kiugró adatokhoz. Ahogy azt az elméleti részben is említettem, a megoldás Gauss-eloszlású hibát feltételez, azonban a helymeghatározás hibájából adódóan a hibafüggvény lecsengése lassabb. Ezeket a részeket lehet levágni ezen paraméter segítségével, melyet kikapcsolt állapotban és dinamikus levágással teszteltem. Ennek szórás szorzóját a programhoz mellékelt példákra és saját tesztjeimre alapozva 5-nek választottam. Ilyen módon az RMS hibát jelentősen, a 6-800 ms-es tartományból 200 ms körülire sikerült csökkenteni.

A következőekben tehát ezek hatását szeretném szemléltetni, a legkevésbé szigorú beállításoktól a legtöbbet megkövetelők felé haladva és közben kiválasztva azt a megoldást, melyet a körülményekhez mérten és minden releváns szempontot figyelembe véve a legjobbnak fogadok el.

A paraméterezés hatásainak vizsgálata

Az első három esetben a levágást kikapcsoltam. Az első esetben az események közti kapcsolatok számát nem határoztam meg, a 2x4 iteráció során pedig 25 illetve 15 km volt az események közötti maximum távolság. (3. ábra)



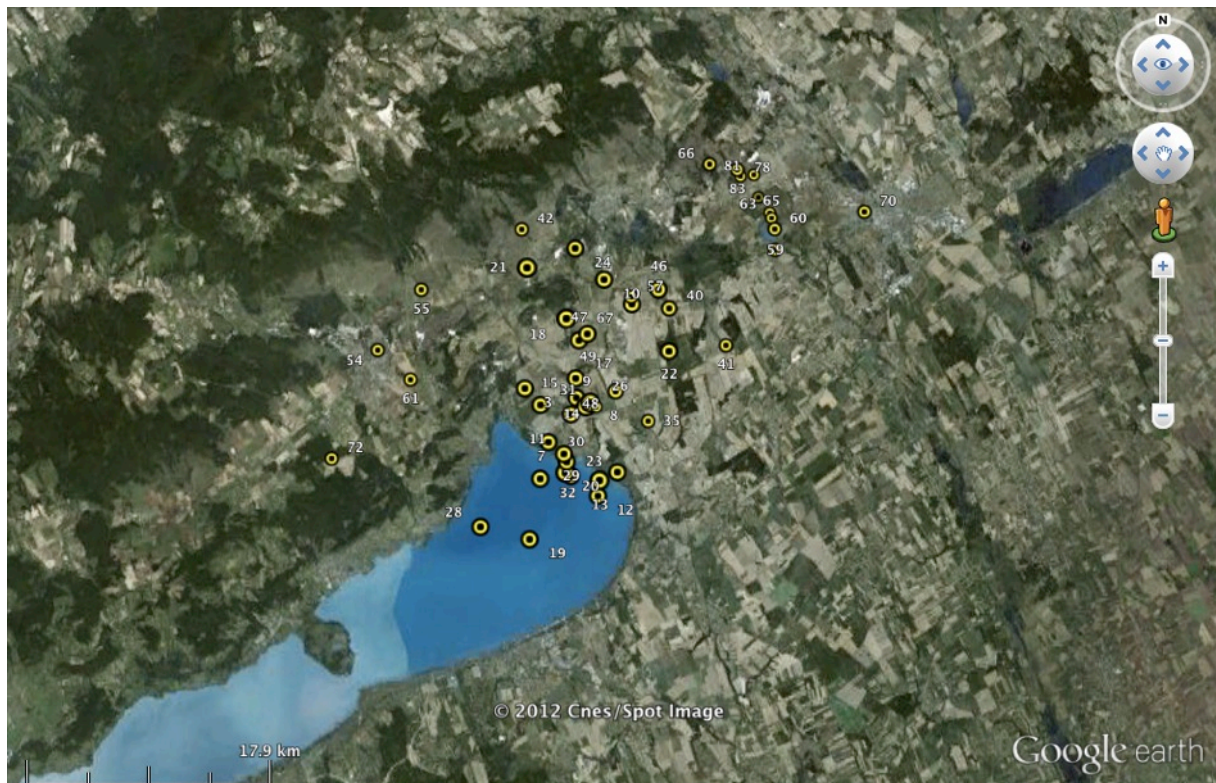
3. ábra Az első próbafuttatás során létrejött hipocentrum-paraméterek.

A térképen jól látható, hogy habár a kezdeti teljesen diffúz eloszláshoz képest javult az események eloszlása, azonban még eléggé szétkent, nem igazán láthatóak rajta összefüggő alakzatok. Ez számszerűsítve is jól látható, az utolsó iteráció átlagos 2σ hibája nagyon nagy, 10 km fölötti mindhárom térbeli koordinátára. Ennél tehát az adatrendszer minősége sokkal szigorúbb feltételeket követel meg.

Ezért a második esetben az események közti kapcsolatok számát minimum 4-nek, a köztük lévő távolságot pedig rendre 20 és 15 km-nek választottam. Ekkor az utolsó iterációra

már csak 66 esemény maradt, azonban ezzel sem értem el a kívánt eredményt. Habár a 2σ értékek az x és y irányokra már 10 km alatt voltak, az RMS értékek még mindig elég magasak voltak ahhoz, hogy a térképi nézetben hasonló eredményre jussunk, mint az első esetben.

A harmadik esetben az események közti kapcsolatok száma minimum 5 volt, az összekapcsolt események közötti távolság pedig mind a 8 iteráció során 10 km. Ebben az esetben teljesen ki kellett kapcsolnom a megoldás csillapítását, mert a feszesen megadott paraméterek hatására túlcillapítottá vált a folyamat. Ez a megközelítés azt eredményezte, hogy a program a 92 eseményből csak 69-et osztott be csoportokba, ezekben a csoportokban az iteráció kezdetén 42, 15, 10 és 2 esemény volt. Az iterációs folyamat végére 48 hipocentrum-paraméter maradt, melyek pozíciója a 4. ábrán látható.



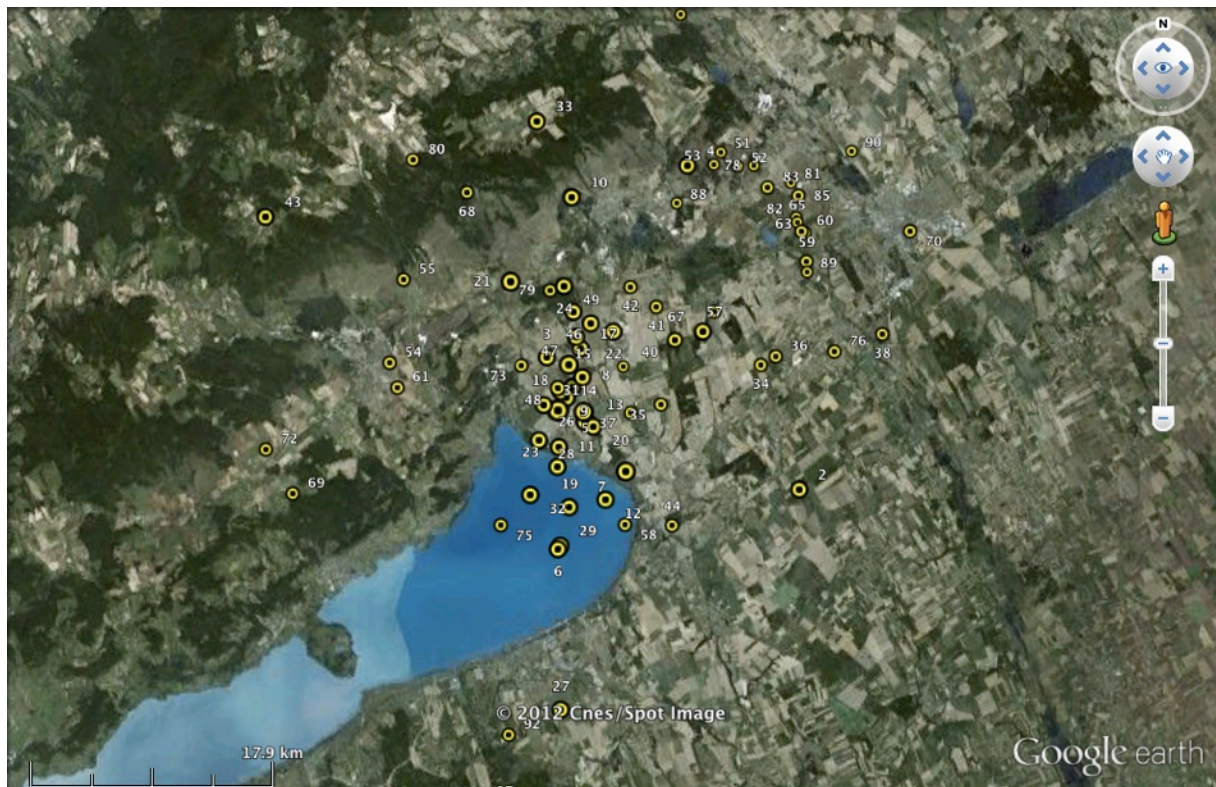
4. ábra A harmadik próbafuttatás során relokalizált hipocentrumok.

Megfigyelhető, hogy a terület északkeleti részén lévő csoport szinte teljesen lineáris formát vesz fel, valamint attól délnyugatra is talán észrevehető egy ÉNY-DK csapású vonal, azonban a Balatonhoz közelebb található rengések struktúrájában nehéz felfedezni hasonlót. Ennek legfőbb oka, hogy a program ebben az esetben a csoportokon belüli eseményeket egymáshoz viszonyítva relokalizálta, így a csoportok modellezésének hibái jelentősen, kb. egy

nagyságrend különbséggel térnek el egymástól. Az ÉK-i csoport átlagos térbeli 2σ hibáinak értéke 1,5 km, míg a DNY-i legnagyobb csoporté átlagosan 15 km. Ezzel a megvalósítási módszerrel tehát jó eredményt sikerült elérni egyes csoportokban, de az adatok nagyobbik részét nem sikerült feldolgoznia.

A második három esetben bekapcsoltam a dinamikus levágást, hogy a rosszabb minőségű, több kiugró adattal rendelkező csoportban is sikerüljön jó megoldást találni.

A negyedik teszt során tehát az elsőhöz hasonló módon a kapcsolatok száma nem volt meghatározva, az iterációk során pedig 25 és 15 km volt az összekapcsolt események közti távolság, az egyedüli különbség ahhoz képest csak a levágási küszöb megadása volt. A két futtatást összehasonlítva kiderül, hogy a levágás segítségével a megoldás hibáját jelentős mértékben csökkenteni lehetett, amihez elég volt kevés eseményt és fázisadatot kiszűrni. A térképi eredmény is jobban csoportokba rendeződik, de jobban szét is kenődött, mint a második és harmadik teszt során. (5. ábra)



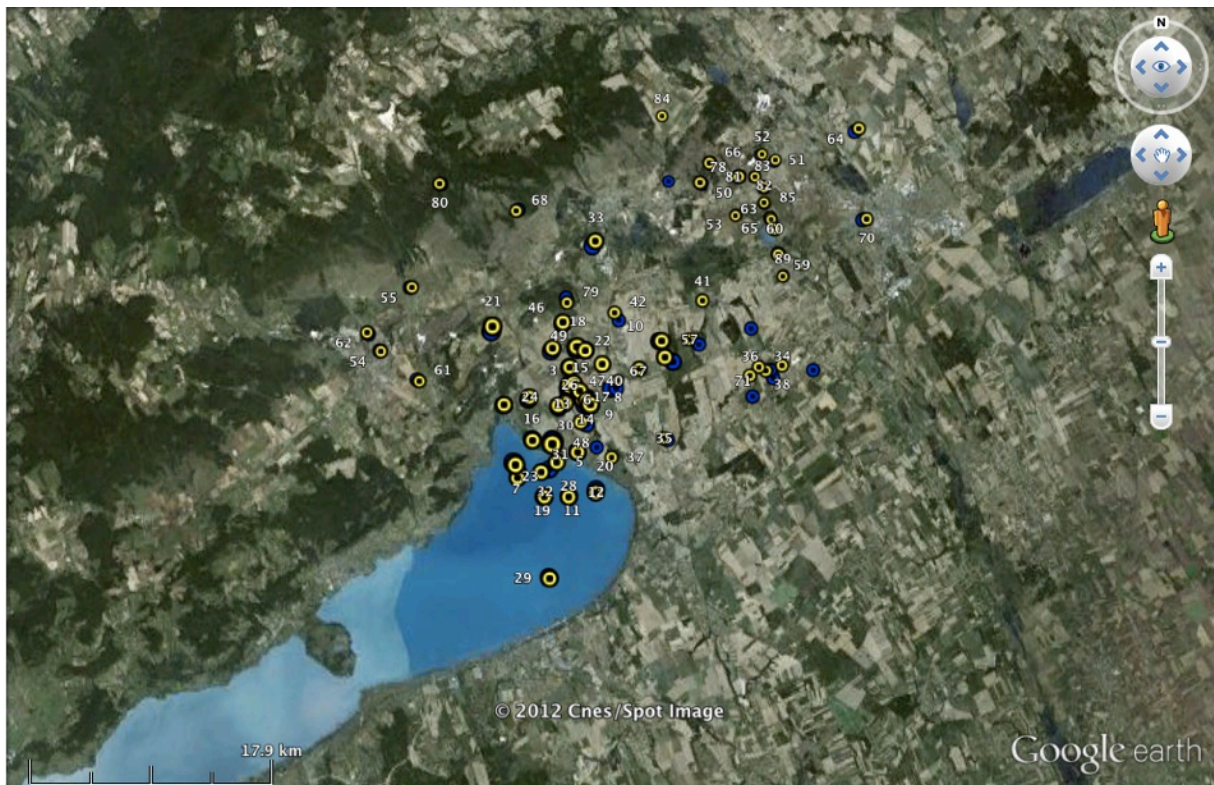
5. ábra A negyedik probafuttatás térképes eredménye

Az ötödik esetben a harmadikhoz hasonlóan az összes iterációra 10 km-nek választottam a távolság felső határát. Ha ezt a kapcsolatok számának növelésével párhuzamosan használjuk, akkor ugyanabba a problémába ütközünk mint ott. Ezért a kapcsolatok számát nem szabályoztam. Az így kapott eredmény minden követelményünknek megfelel. Az átlagos 2σ hibák az összes eseményre $(x,y,z)=(1986,2; 1873,1; 2377,8)$ m és $t=639,7$ ms, miközben az események nagyrésze feldolgozásra került.

Az utolsó eset, amit még meg szeretnék említeni, ahol úgy növeltem a kapcsolatok minimális számát 5-re, hogy nem hoztam létre több csoportot. Ezt úgy sikerült elérni, hogy az első négy iteráció során a kiugró adatok levágását kikapcsoltam, a maximum távolságot 15 km-re állítottam, ezzel egy csoportot létrehozva. A második négy iterációban már a jól bevált 5-szörös szorzót és 10 km-es távolságot használtam. Az így kapott eredmény azonban a lazább kezdeti feltételek miatt nagyobb hibával terhelt, ezért nem előnyös.

Mindezeket összefoglalva, az ötödik esetet felhasználva sikerült megtalálni az optimális paraméterezést az inverzió végrehajtására. Azt azonban fontos szem előtt tartani,

amit már az elméleti összefoglalás során is megemlítettem, hogy az inverzió stabilitása nagy mértékben függ a bemenő adatok minőségétől, ezért szükséges lehet az inverzió stabilitásának vizsgálata. Erre több lehetőség is adódik, lehet például kis változások hatását vizsgálni az állomások eloszlásában, a sebességmodellben, az események számában, esetleg kezdeti feltételként a csoport középpontját használni minden eseményre. Ez utóbbi ebben az esetben azért nem szerencsés, mert egyetlen nagyobb csoport révén ez nem csak kis változást okoz a megoldandó problémában. Ezért a stabilitás vizsgálatára a sebességtér kis megváltoztatását választottam, a legfelső 20 km-es réteg sebességét 5,6 km/s-ról 5,4 km/s-ra csökkentve. Ennek nem volt jelentős hatása az eredményre (6. ábra), ezért úgy gondolom, hogy az általam kapott megoldás stabilnak tekinthető.



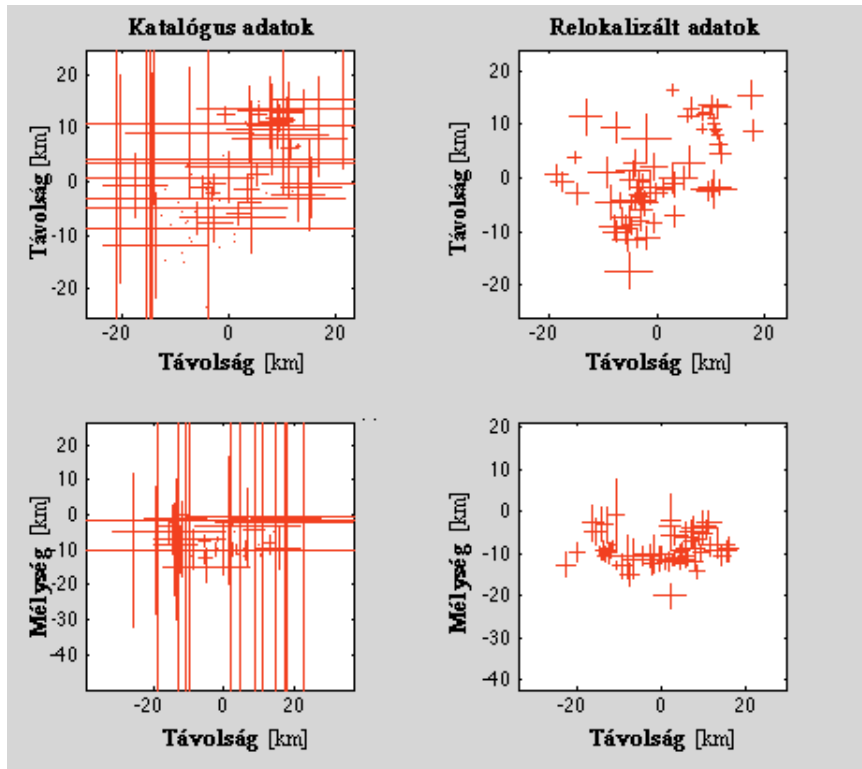
6. ábra Az 5. próbafutás (sárga jelölés) és a stabilitásvizsgálat eredménye (kék, az átfedések miatt nem mind jól látható).

Nem esett még szó a hipocentrumok vertikális eloszlásáról. Ezek a koordináták a horizontálishoz hasonló módon változnak, ezért a program paramétereinek megválasztása hasonlóan hat rájuk is, annak ellenére, hogy a katalógusadatokban nagyobb hibával terheltek. A 7. ábrán látható, hogy a vertikális komponenst is sikerült az újrameghatározás segítségével

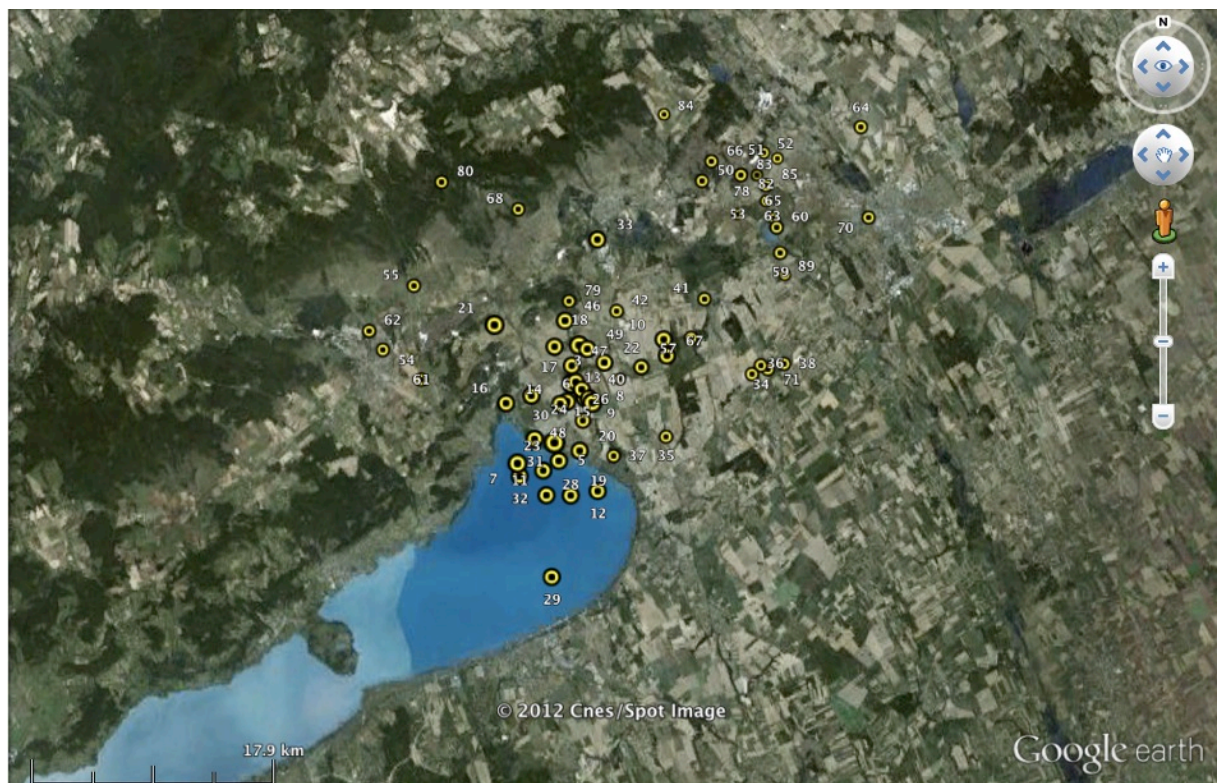
egy szűkebb, 10 km mélység körüli tartományba sűríteni. Ezt az ábrát a HypoDD programhoz mellékelt Matlab szkript segítségével hoztam létre.

Összefoglalás

Dolgozatomban tehát először összefoglaltam a hipocentrum-paraméterek meghatározásához szükséges eljárások rutinszerűen használt formáját. Bemutattam, hogy milyen módszerek léteznek ezek pontosítására, ezen belül különös tekintettel a relatív helymeghatározási módszerekre. Ismertettem a kétszeres különbségek módszerét, annak felhasználhatóságát különböző problémák esetén, ezt nemzetközi példákkal szemléltettem. Egy Magyarországon kiválasztott területre összegyűjtöttem a feladat megoldásához szükséges adatokat. Ezeket először manuálisan, majd egy program segítségével feldolgoztam, így létrehozva a probléma megoldásához szükséges adatrendszert. A megfelelő megoldás paramétereit részben empirikusan, részben próbafuttatások segítségével meghatároztam, így jutottam a 7. és 8. ábrán látható eredményre. Ehhez a megoldáshoz felhasználtam minden elérhető adatot és információt, így a lehető legkisebb bizonytalansággal meghatározva a pontosított hipocentrumok paramétereit. Ennek hibája a mérési zaj nagyságával hasonló szinten van. Megvizsgáltam a megoldás stabilitását is a sebességtér megváltoztatásával és úgy találtam, hogy a megoldás megfelelően stabil.



7. ábra Az első oszlopban az ISC és a Szeizmológiai Observatórium által meghatározott paraméterek, a második oszlopban az újrameghatározás utáni értékek. A felső sor térképi nézetet, az alsó egy-egy keresztmetszényt ábrázol. A keresztek a 2σ hibát jelölik.



8. ábra A relokalizált hipocentrumok a Google Earth műholdfelvételén.

Munkámmal a kitűzött feladatot teljesítettem, a vizsgált 92 földrengés adatait feldolgozva, majd a kettős különbségek módszerével elvégezve a hipocentrumok újra meghatározását a kiindulási állapotnál jelentősen jobb eredményre jutottam, melynek lehetőség van szeizmotektonikai értelmezésére. Amennyiben az a megfelelő részletességgel ismert, úgy az eredményt érdemes lehet összevetni a terület geológiájával is.

Az inverziót hatékonyabban és pontosabban lehetett volna végrehajtani, amennyiben több fázisadat állt volna rendelkezésre, azonban ez nem volt akadály a feladat megoldásához. A hibák oka lehet még a katalógusadatok pontatlansága, a fázisadatok pontatlan leolvasása. Valamint emiatt a területet is nehéz pontosan kijelölni, maradhattak a földrengéscsoportokhoz tartozó események a kijelölt terület határain kívül is. A módszerből adódóan az észlelőállomások alacsony száma és rossz térbeli eloszlása is okozhatott hibákat. Ezek a szisztematikus hibák nem küszöbölhetőek ki, ezért a még pontosabb eredmény eléréséhez a hullámformák keresztkorrelációjával lenne szükséges a kétszeres különbségeket előállítani, ha ez megvalósítható és rendelkezésre állnak az ehhez szükséges adatok.

Felhasznált irodalom

- International Seismological Centre. (2010). *On-line Bulletin*. International Seismological Centre: <http://www.isc.ac.uk>
- Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*. New York: Academic Press.
- Monteiller, V., Got, J.-L., Virieux, J., & Okubo, P. (2005). An efficient algorithm for double-difference tomography and location in heterogeneous media, with an application to the Kilauea volcano. *Journal of Geophysical Research* , 110 (B12306), 22.
- Mónus, P. (1995). *Travel time curves and crustal velocity model for the Pannonian basin*. Budapest: MTA GGKI Technical Report.
- Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology* (Second Edition). New York: Cambridge University Press.
- Szeizmológiai Obszervatórium. (2008-2012). *Magyar Földrengések Évkönyve*.
- Waldhauser, F. (2001). *hypoDD -- A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations*. USGS Open File Rep.
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. (December 2000). A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 90 (6), 1353-1368.
- Waldhauser, F., Yang, Z., Chen, Y., & Richards, P. (2005). Double-difference relocation of earthquakes in central-western China, 1992–1999. *Journal of Seismology* , 9 (2), 241-264.