Szeizmikus események helymeghatározásának javítása infrahang-észlelések azimutális korrekciójával

Cziráki Kamilla

Témavezető: Pásztor Marcell tudományos segédmunkatárs

Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium
Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
czirakikami@gmail.com

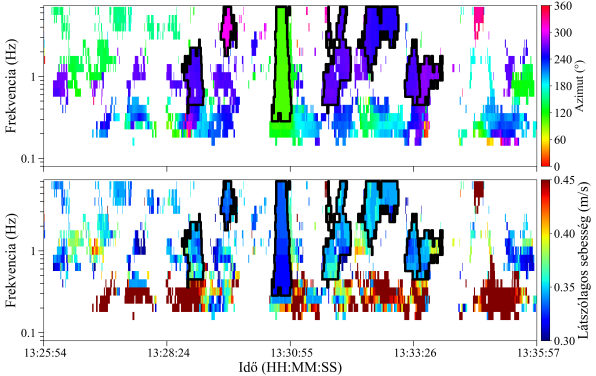
Tudományos Diákköri Konferencia
Budapest, 2025. 12. 04

HUN REN | Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet

ELTE EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

Az infrahang és fizikai tulajdonságai

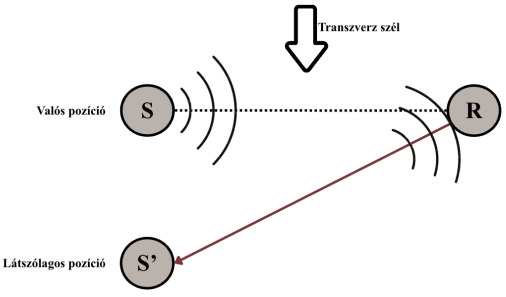
- Infrahang: a légkörben terjedő longitudinális hullám
  - Frekvenciája: 0,003 Hz-20 Hz
  - Terjedés: veszteséges
  - Elnyelődés mértéke négyzetesen csökken a frekvenciával
- Infrahangjelet kelthet pl.: robbantás, viharok
- $c_{\text{eff}} = \sqrt{\kappa_g RT} + \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{u}$
- Mérések feldolgozása: PMCC, progresszív többcsatornás korrelációs algoritmus



Egy bányarobbantás PMCC-vel feldolgozott jele.

A kutatás célkitűzése

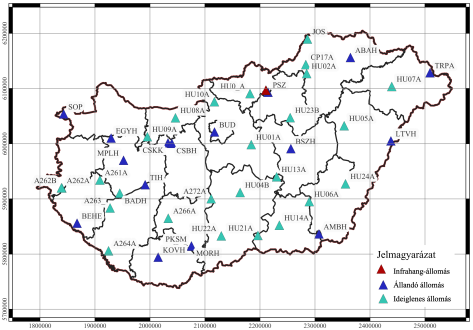
- Esemény azonosításakor: várható **beérkezési idő** és **azimut** becslése
- Távolság ismeretében a beérkezési idő: $t_{\text{várt}} = t_0 + \frac{d}{c}$, ahol c a *celerity*
- Észlelés feltételei:
  - $t_{\text{várt}} - k_{\text{idő}} < t_{\text{mért}} < t_{\text{várt}} + k_{\text{idő}}$
  - $A_{\text{várt}} - k_{\text{azi}} < A_{\text{mért}} < A_{\text{várt}} + k_{\text{azi}}$
- **Kutatásom célkitűzése**: Az azimut-észlelés szél okozta deviációjának javítása, kiküszöbölése hullámútkövetéses modellezéssel



A terjedési irányra merőleges szél hatása. Amezcua és Barton (2021). alapján.

Szeizmoakusztikus adatok

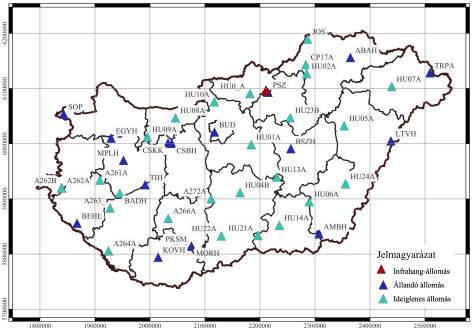
- Felhasznált bányarobbantások adatai: Magyarországi Szeizmoakusztikus Bulletin
- Nemzeti Szeizmológiai Bulletin bányarobbantásnak klasszifikált eseményei közül PSZI-n észleltek
- Mindkét bulletinben *International Seismic Format 2.0* formátumú adatok találhatóak
- Helymeghatározás az iLoc egyeseményes helymeghatározó algoritmussal történik mindkét esetben



A PSZI és a Magyarországi Szeizmológiai Hálózat állandó és ideiglenes állomásai a 2024-es állapotok szerint.

Szeizmoakusztikus adatok

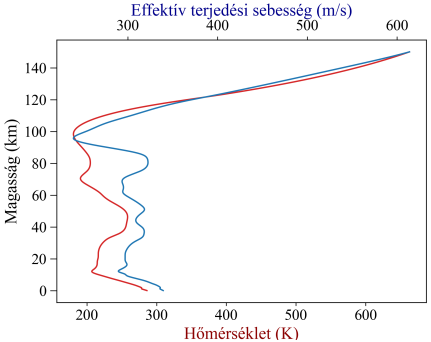
- Kutatásom során: 110 esemény
- 2020-24-ig terjedő időszakból
- Fontos
  - Minden évszakból
  - Minden irányból
  - *Ground Truth* eseményeket is
  - Megfelelő távolságra PSZI-től



A PSZI és a Magyarországi Szeizmológiai Hálózat állandó és ideiglenes állomásai a 2024-es állapotok szerint.

Atmoszféra-specifikációk

- A modellezéshez szükséges: atmoszféraadatok
- Probléma: nagy magasságig szükséges, meteorológiai modellek nem elégségesek
- Megoldás: félempirikus modellek
  - 35 km-ig nagy felbontású meteorológiai modellek
  - Felette kisebb változékonyság: empirikus modellek
- Kutatásom során: NCPAG2S modell (Drob et al. 2003)
- Parancssori program, megfelelő rácshálóban lehet adatot letölteni



Egy hőmérsékleti és sebességprofil az G2S félempirikus modell alapján.

Az InfraGA program

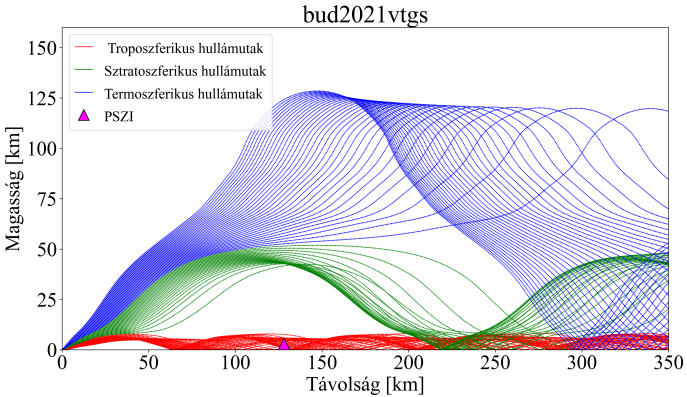
- Hullámutak modellezése: InfraGA/GeoAC numerikus csomag
- Geometriai akkusztikus közelítés: hullámhosszhoz képes a közeg és az amplitúdó lassan változik
- Folyadékdinamika egyenleteinek lineáris perturbációval felírt változatait (kontinuitási, Euler, állapotegyenlet) oldja meg
- Egyenletrenszerből: Eikonal-egyenlet (1)
- Hamilton-függvény és Hamilton-Jacobi összefüggésekkel: hullámutak leírására alkalmas egyenletekre vezet (2)

$$\psi^2 = \frac{c_0^2}{c^2(\vec{x})}\left[1 - \frac{\vec{v}_0(\vec{x})\cdot\psi}{c_0}\right]^2 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{x}}{\partial s} = \frac{\partial H}{\partial \psi}, \quad \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial s} = -\frac{\partial H}{\partial \vec{x}} \tag{2}$$

A modellezett hullámutak

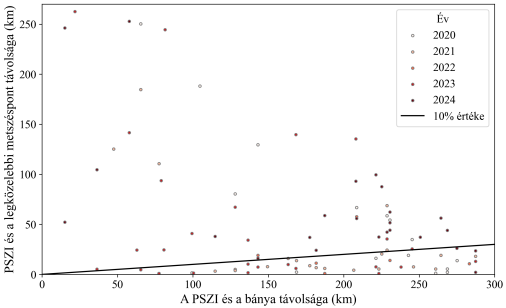
- InfraGA 2 dimenziós változata
- Paraméterek: bányák koordinátái, valamint a robbantás időpontja
- Emellett fontosak az inklinációk is
  - 0,5 és 45 fok között, fél fokonként



A bud2021vtgs esemény InfraGA által modellezett hullámútjai.

A modellezett hullámutak

- Modellezett hullámutak kutatás során lényeges eleme: Talajmetszéspont
  - Megadja, hogy a hullámutak hol értek földet
  - Ha ez megfelelően közel van a PSZI-hez, akkor történhetett elméletileg észlelés
- A metszéspontoknál számos paraméter ismert: *celerity, inklináció visszapattanási magasság,* ***azimut***
- Kutatásom során: detektálható, ha a metszéspont-PSZI távolság kisebb, mint a robbantás-PSZI távolság 10 százaléka
- 56 ilyen esemény esetén volt ez igaz



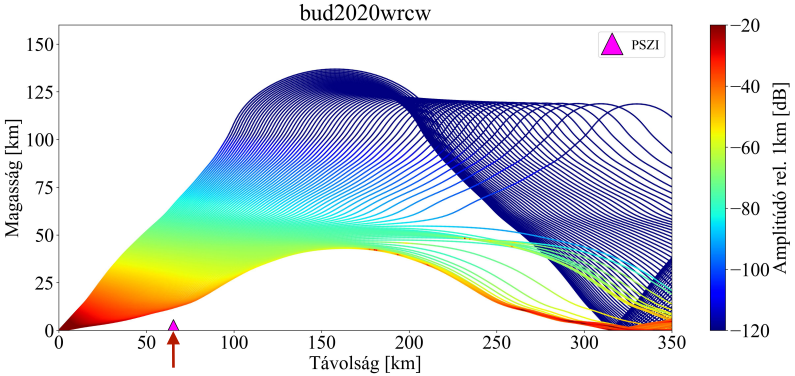
A legközelebbi metszéspontok a bánya-PSZI távolság függvényében.

Helymeghatározás az iLoc egyeseményes helymeghatározási algoritmussal

- A kapott azimutokkal meghatároztam újra az események helyét
- Ehhez az iLoc egyeseményes helymehatározó algoritmust, az *International Seismology Center* algoritmusának továbbfejlesztett változatát használtam (Bondár és Storchak 2011)
- Háromdimenziós sebességmodellel (Regional Seismic Tracel Time) számítottam a hipocentrumokat és azok hibaellipszisét
- A megfelelően közeli metszéspontok esetén végeztem el a helymeghatározást, melyet összehasonlítottam az észlelt azimuttal meghatározottakkal

A hullámútkövetés eredményei

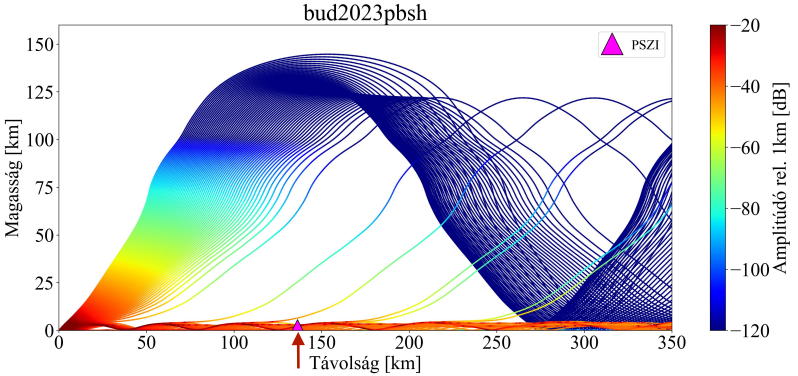
- A közeli eseményeknél a hiba okozója: nem kerül modellezésre a legalacsonyabb rétegben terjedő hullám, így nincs közeli visszapattanás
- Ez sok esetben okozott problémát: megnehezíti az azimut korrigálását



A bud2020wrcw esemény InfraGA által modellezett hullámútjai.

A hullámútkövetés eredményei

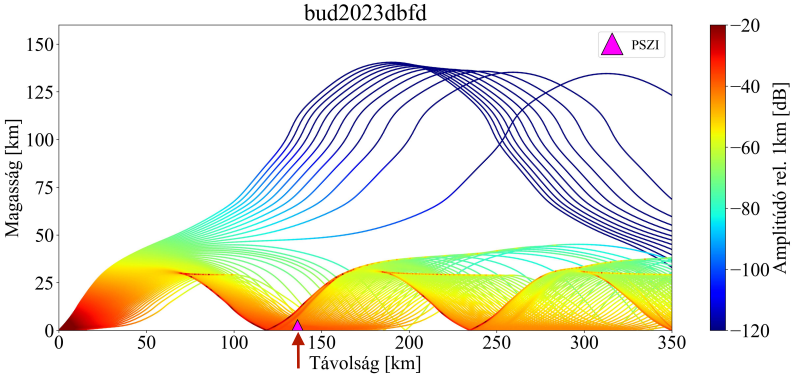
- Visszaverődés 3 régióra jellemző
  - **troposzféra**
  - sztratoszféra
  - termoszféra
- eredményeknél:
  - 19 troposzferikus
  - 23 sztratoszferikus
  - 14 termoszferikus



A bud2023pbsh esemény InfraGA által modellezett hullámútjai.

A hullámútkövetés eredményei

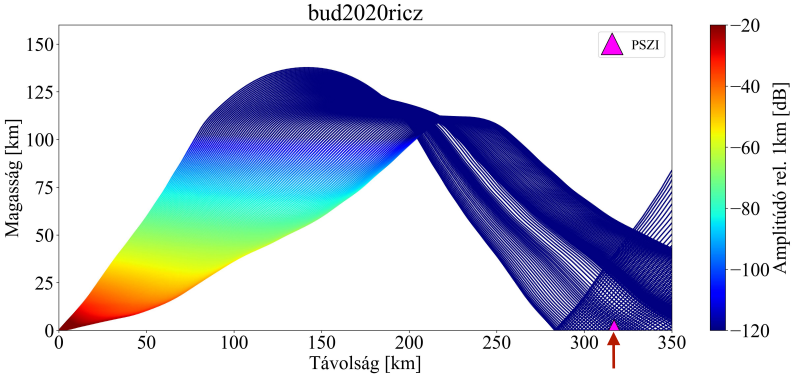
- Visszaverődés 3 régióra jellemző
  - troposzféra
  - **sztratoszféra**
  - termoszféra
- eredményeknél:
  - 19 troposzferikus
  - 23 sztratoszferikus
  - 14 termoszferikus



A bud2023dbfd esemény InfraGA által modellezett hullámútjai.

A hullámútkövetés eredményei

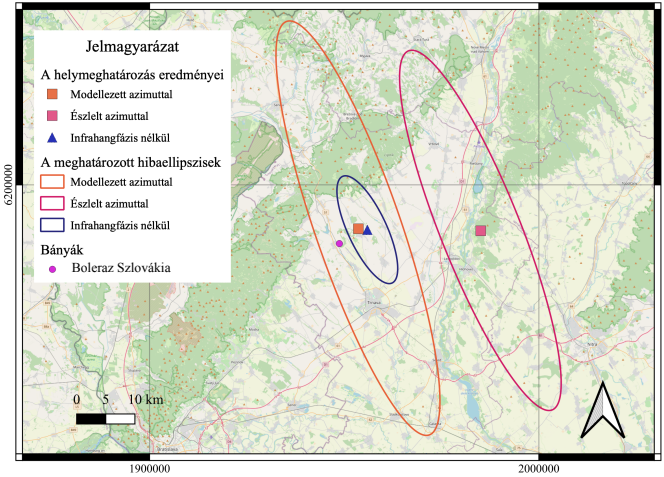
- Visszaverődés 3 régióra jellemző
  - troposzféra
  - sztratoszféra
  - **termoszféra**
- eredményeknél:
  - 19 troposzferikus
  - 23 sztratoszferikus
  - 14 termoszferikus



A bud2020ricz esemény InfraGA által modellezett hullámútjai.

A helymeghatározás eredményei

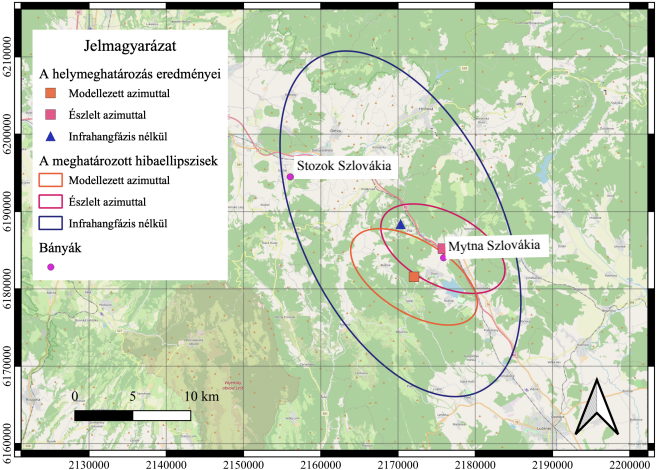
- 56 esemény azimut, *slowness* és beérkezési idejével: iLoc
- Ugyanazon paraméterekkel az észlelt értékekkel is lefuttattam
- Emellett: csak szeizmológiai fázisok alapján meghatározott hely is rendelkezésre állt



A bud2022wurt esemény helymeghatározásai

A helymeghatározás eredményei

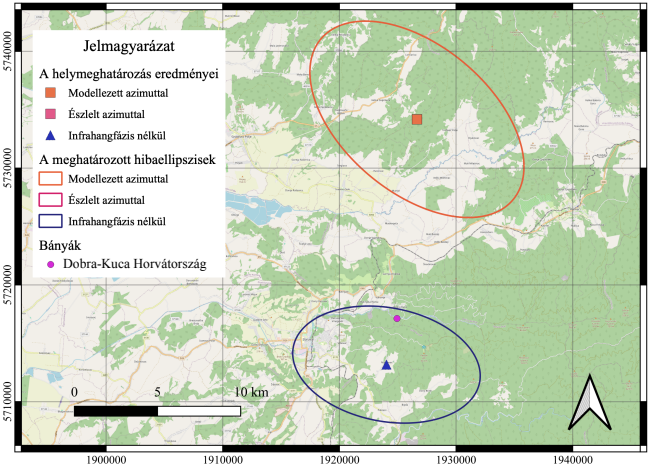
- 56 esemény azimut, *slowness* és beérkezési idejével: iLoc
- Ugyanazon paraméterekkel az észlelt értékekkel is lefuttattam
- Emellett: csak szeizmológiai fázisok alapján meghatározott hely is rendelkezésre állt



A bud2022xacl esemény helymeghatározásai

A helymeghatározás eredményei

- 56 esemény azimut, *slowness* és beérkezési idejével: iLoc
- Ugyanazon paraméterekkel az észlelt értékekkel is lefuttattam
- Emellett: csak szeizmológiai fázisok alapján meghatározott hely is rendelkezésre állt



A bud2022xlfl esemény helymeghatározásai

A modellezés feldolgozásba való beépítése

- Eredmények felhasználása: szeizmoakusztikus bulletin készítésénél
- Fontos kérdés: mekkorák az azimutkülönbségek
- 1 foknál kisebb eltérésnél: nincs jelentős különbség a helymeghatározásnál
- Jövőben: Minden eseménynél az azimutértékek modellezés, és amennyiben az eltérés nagyobb egy küszöbértéknél, abban az esetben helymeghatározás
- Módszer korlátai: atmoszféra-specifikációk pontossága, talajmetszéspontok hiánya közeli eseményeknél

$\delta A(^\circ)$	Darabszám
0,2–1	8
1–5	38
5–14,55	10

Az azimutkülönbségek (δA) értékei

Konklúzió

- 110 bányarobbantás adatait dolgoztam fel
- **Cél**: hullámútkövetéssel a helymeghatározás pontosságának javítása
- Modellezett események közül **56 esetben** megfelelő metszéspont
- Azimuteltérések **jórészt 5 fok alatt**, de lehet jelentősen nagyobb is
- **Nagyobb azimut-érték** esetén javíthat a helymeghatározás pontosságán
- Jövőben a módszer jól felhasználható az észlelések helymeghatározásának pontosítására
- Számos **további lehetőség** is adódik
  - Legnagyobb probléma: **közeli események** esetén metszéspontok hiánya
  - Lehetséges megoldás: **másik infrahang-állomások** felhasználása, vagy **teljes hullámtér modellezés**
  - Emellett: további állomásokkal: kizárólag **infrahangalapú** helymeghatározás

Köszönöm a figyelmet!

- 110 bányarobbantás adatait dolgoztam fel
- **Cél**: hullámútkövetéssel a helymeghatározás pontosságának javítása
- Modellezett események közül **56 esetben** megfelelő metszéspont
- Azimuteltérések **jórészt 5 fok alatt**, de lehet jelentősen nagyobb is
- **Nagyobb azimut-érték** esetén javíthat a helymeghatározás pontosságán
- Jövőben a módszer jól felhasználható az észlelések helymeghatározásának pontosítására
- Számos **további lehetőség** is adódik
  - Legnagyobb probléma: **közeli események** esetén metszéspontok hiánya
  - Lehetséges megoldás: **másik infrahang-állomások** felhasználása, vagy **teljes hullámtér modellezés**
  - Emellett: további állomásokkal: kizárólag **infrahangalapú** helymeghatározás