

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Köszönet

Közgyűlési előzetes

Dear BGS Colleagues

Statisztikai próbák sztochasztikus, közel izotrop tenzorral leírható
kőzetfizikai mennyiségek vizsgálatára

Az Északi-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant
földrengések és robbantások összehasonlító elemzése

Nukleáris sajtótájékoztatók

In Memoriam: Gayer Ferenc



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

54. évfolyam (2013) 4. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

167 Köszönet (Acknowledgments) – *Bodoky T.*

MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

168 Közgyűlési előzetes (Announcement) – *Fancsik T.*

EAGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF EUROPEAN GEOSCIENTISTS AND ENGINEERS

169 Dear BGS Colleagues – *G. Apostolopoulos*

TANULMÁNYOK • PAPERS

170 Statisztikai próbák sztochasztikus, közel izotrop tenzonnal leírható közetfizikai mennyiségek vizsgálatára (Statistical tests for rock physical parameters given by nearly isotropic, stochastic tensors) – *Sipos A. Á.*

185 Az Északi-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése (Comparative analysis of earthquakes and explosions occurred in the Northern Mountains, Hungary and the southern part of Slovakia) – *Kiszely M., Győri E.*

HÍREK • NEWS

204 Nukleáris sajtótájékoztatók (Press conferences on nuclear affairs) – *Tóth L.*

IN MEMORIAM

207 Gayer Ferenc

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

54. évfolyam (2013) 4. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: bodoky.tamas@mfgi.hu

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. BARÁTH ISTVÁN, KAKAS KRISTÓF, DR. LENKEY LÁSZLÓ,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZARKA LÁSZLÓ, VERŐ LÁSZLÓ

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: hockg@t-online.hu



Lapunk megjelenését a Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság támogatja

A szerkesztőség a szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évvégő számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességéért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete
A kiadásért felel dr. Fancsik Tamás

Szerkesztőség: 1145 Budapest, Columbus u. 17–23.
Telefon/Fax: (1) 201-9815
Titkársági e-mail: postmaster@mageof.t-online.hu
Honlap: www.mageof.hu

Borító, tipográfia és nyomdai előkészítés:
EP Systema Bt., Budapest

Készült: NestPress Kft., 1116 Budapest, Vegyész u. 17–25.
Felelős vezető: Fekete Iván

Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél
(1371 Budapest, Pf. 433, Telefon/Fax: (1) 201-9815)
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében
Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507
HU ISSN 0025-0120

Köszönet

A *Magyar Geofizika* szerkesztősége köszönetét fejezi ki a lap olvasóinak nevében is azoknak, akik a lap szerkesztésében, illetve színvonalának megőrzésében, javításában az elmúlt 2013. évben közreműködtek.

A hírek, beszámolók szerzőinek nevét mindig közöljük írásuk végén, így ezt nem ismétljük meg itt, de a köszönet természetesen nekik is szól.

Név szerint is szeretnénk megemlíteni itt azokat, akiknek a neve máshol nem jelent meg.

Köszönet a szócikkek lektorainak!

Ezt a sokszor sok vesződséggel járó munkát az elmúlt évben következő kollégáink vállalták:

Bodoky Tamás, Drahos Dezső, Guthy Tibor, Ormos Tamás, Pethő Gábor, Prácser Ernő, Prónay Zsolt, Scholtz Péter, Szabó Norbert Péter, Törös Endre, Szűcs István, Wesztergom Viktor, Zilahi-Sebess László.

Köszönet a hátlapon közölt képek beküldőinek!

Köszönjük, hogy kérésünkre vették a fáradságot, hogy sok évtizeddel ezelőtti fényképeket keressenek elő és juttassák el hozzánk. A képeket következő kollégáinktól kaptunk:

Polcz Iván, Sedy Judit.

A *Magyar Geofizika* megjelentetésének és terjesztésének állhatatos és szakszerű intézéséért jár köszönet *Hegedüsné Petró Erzsébetnek.*

Végül, de nem utolsó sorban, köszönjük *Hock Gábor* technikai szerkesztőnek a lap igényes külsejét és a szerkesztés magas minőségét!

Bodoky Tamás
főszerkesztő

Közyűlési előzetes

Tisztelt Tagtársunk!

Értesítjük, hogy a Magyar Geofizikusok Egyesületének Elnöksége az Egyesület éves rendes közgyűlését

**2014. április 25-én 13:30 órakor tartja a
Magyar Bányászati és Földtani Hivatal konferenciatermében
(Budapest, XIV., Columbus utca 17–23.)**

A Közgyűlés akkor határozatképes, ha azon a tagság 50%-a + 1 fő jelen van.
Határozatképtelenség esetén az Elnökség az ismételt közgyűlésre

2014. április 25-én 14 órára

hívja össze a tagságot. A megismételt közgyűlés az Alapszabály értelmében a jelenlévő tagok számától függetlenül határozatképes. A megismételt közgyűlés napirendje a meghiúsult közgyűlés napirendjével azonos.

Tervezett napirendi pontok:

- Elnöki megnyitó
- Titkári beszámoló és közhasznúsági jelentés az Egyesület 2013. évi tevékenységéről
- A Felügyelő Bizottság beszámolója
- A Magyar Geofizikusokért Alapítvány Kuratóriumának és Felügyelőbizottságának beszámolója
- Hozzászólások
- Az Egyesület 2014. évi pénzügyi tervének előterjesztése
- Jelölőbizottság előterjesztése a választandó tisztségekre
- Szünet, szavazás
- Geofizikai érdekességek – szakmai előadás
- Kitüntetések átadása
- Ifjúsági Ankét díjainak átadása
- A Szavazatszámoló Bizottság jelentése a választás eredményéről
- Zárszó

Alapszabályunk értelmében kérjük, hogy amennyiben a napirenddel kapcsolatosan további javaslata van, azt szíveskedjék legkésőbb március 20-ig írásban a Magyar Geofizikusok Egyesülete Titkárságának címezve megtenni.

Budapest, 2014. február 18.

Dr. Fancsik Tamás
elnök sk.

Dear BGS Colleagues,

It was great meeting you in Tirana as it was in all our BGS conferences proving that this activity has strong base and a good future of Geophysics in our region.

I am sure that and the next BGS Conference in Chania will have great success.

In between, the **Hellenic Geophysical Union** trying to strengthen our profession and research in the region, tried and took the *EAGE Near Surface Geoscience* conference in Athens in the period of 14–18 September 2014 (<http://www.eage.org/events/index.php?eventid=1013&Opendivs=s3>).

I send you attached the 1st Announcement. All topics of interest are included but we have added and a special one (“Geophysical Case Histories in the Balkans”) to emphasize the Balkan aspect. Also, invited speaker before the session of “Seismics” will be Dr. Don Steeples (THE expert of shallow reflection seismic and Current President of SEG)

In addition to the traditional EAGE Conference and the exhibition there will be a parallel conference with one fee called: “**1st Applied Shallow Marine Geophysics Conference**” (<http://www.eage.org/events/index.php?evp=12577&ActiveMenu=2&Opendivs=s3>).

EAGE can support financially participation in the conference through PACE Foundation (<http://www.eage.org/events/index.php?evp=13085&ActiveMenu=14&Opendivs=s3>)

Very important especially for young scientists or students is that on 14th of September two workshops with low fee (lower to students) are organized in the hottest topics in Geophysics nowadays and scientists well known worldwide who have invented or expertise in the subject.

– **Time-lapse ERT monitoring** (*Dr. Jonathan Chambers, Dr. Torleif Dahlin, Dr. Jung-Ho Kim, Dr. Robert Supper, Dr. Panagiotis Tsourlos*)

- Introduction to Geoelectrical Time lapse Monitoring
- Geoelectrical Monitoring instrumentation, raw data processing and quality assessment
- Geoelectrical Time lapse data inversion and Modelling.
- Geoelectrical Monitoring Applications I: Hydrogeological and environmental monitoring.
- Geoelectrical Monitoring Applications II: Contaminant monitoring.
- Geoelectrical Monitoring Applications III: Landslide and Permafrost monitoring.

– **Seismic and GPR methods for urban and microzonation studies** (*Dr. Julian Ivanov, Dr. Jianghai Xia, Dr. Chih-Ping Lin, Dr. Oz Yilmaz*)

- Optimizing the application of passive MASW in urban environment with the combined use of 1D and 2D receiver arrays
- Near-surface shear-wave velocities and quality factors derived from high-frequency surface waves
- Considerations of Surface Wave Testing in Complex Subsurface Settings
- Applications of Engineering Seismology in Urban Areas

Finally, the Hellenic Geophysical Union will organize a field trip to Santorini Island (a place being a geological laboratory as well as one of the first touristic destinations of the world) in 18–20 of September 2014. HGU has achieved very low prices for that fieldtrip in that place (see attached detailed information).

For your additional help related to accommodation, the office which had supported us in the 1st Balkan Geophysical Congress and will support us in Chania may provide you assistance (ERASMUS HORIZON, Mr. Spyros Lianos, s.lianos@erasmus.gr, Tel.: +30 210 7414780, Fax: +30 210 7257532)also for the meeting in Athens.

See you in Athens and then to Chania and then to Izmir and then ...

To strengthen through Applied Geophysics and our presence the collaboration and the development of our region.

Do not hesitate to contact me for anything related to the above or anything else.

Best regards,

George Apostolopoulos
gapo@metal.ntua.gr

Statisztikai próbák sztochasztikus, közel izotrop tenzorral leírható kőzetfizikai mennyiségek vizsgálatára

SIPOS A. Á.

BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 1–3.
E-mail: siposa@eik.bme.hu

2×2 -es vagy 3×3 -as márixszal ábrázolható, valószínűségi változótól függő tenzorok sajátirányainak és sajátértékeinek statisztikai elemzése a feladat nemlineáris jellege miatt nem triviális feladat. Anizotrop tenzorok esetén az irodalomban található, linearizáláson alapuló módszerek kielégítőek, azonban a geofizikai alkalmazások gyakran felvetik a közel izotrop tenzor vizsgálatának szükségességét. Írásunkban e speciálisnak tűnő, de a gyakorlatban mégis gyakran előforduló eset vizsgálatára adunk statisztikai módszereket. Rámutatunk arra, hogy a determinisztikus tenzoroknál megszokott helyzet – vagyis, hogy a sajátértékek multiplicitása alapján következtethetünk a sajátvektorok térbeli elhelyezkedésére – valószínűségi változó elemű mátrixok esetén nem áll fent. Ilyen értelemben a vonatkozó szakirodalom sajátértékekre koncentrááló módszerei nem kielégítőek. Ez utóbbi állítást írásunk geofizikai vonatkozású példái is alátámasztják. Új módszerünk egyben lehetővé teszi tenzorral ábrázolható kőzetfizikai mennyiségek szorosságának, illetve adott vektor és a tenzor egyik sajátirányára közötti egyezés statisztikai vizsgálatát.

Sipos, A. Á.: Statistical tests for rock physical parameters given by nearly isotropic, stochastic tensors

Statistical hypothesis testing for the eigenvalues and eigenvectors of a stochastic tensor is not a straightforward process due to the nonlinear dependence involved in the problem. For anisotropic tensors the linearized approaches of the literature are adequate, however, geophysical applications require the analysis of nearly isotropic tensors, too. Our paper is devoted to introduce new statistical methods for these seemingly rare cases, which turn out to be a regular problem in practice. We point out that the well-known behaviour of deterministic tensors, namely that the multiplicity of the eigenvalues unambiguously refers to the spatial distribution of the eigenvectors, does not hold for matrices with random variable elements. In this way, the published methods focusing only on the eigenvalues are not satisfactory. The latter statement is also confirmed by examples from geophysics. Our method can be used to analyse closeness of tensor state parameters or directional differences between a vector and one of the eigenvectors in a statistical framework.

Béérkezett: 2013. október 21.; *elfogadva:* 2014. február 25.

1. Bevezetés

Kőzetfizikai mennyiségek direkt (laboratóriumi mérés) vagy indirekt (mérésből származtatott) meghatározásával a geológiai és a geofizika számtalan ága foglalkozik. A publikációk zöme a mérési eredményeket statisztikai eszközökkel értékeli. Amíg skalárral és vektorral ábrázolható mennyiségek esetén a statisztikai elemzés eszközei széles körben elterjedtek (Borradaile 2003), addig tenzor jellegű kőzetfizikai mennyiségek (pl. feszültség, mágneses anizotropia, elektromos vezetőképesség stb.) esetén az irodalomban megtalálható eredmények (Hext 1963, Jelinek 1988, Constable et al. 1990) ellenére sincs egységesen bevett gyakorlat. A geofizikai és geológiai alkalmazásokban (például

mágnesesanizotropia-tenzor, mikrotektonikai feszültség-tenzor stb.) kitüntetett szerepe van a tenzor sajátirányainak, emiatt a tenzorral ábrázolható kőzetfizikai mennyiségek elemzése gyakran azok sajátirányainak statisztikai vizsgálatát jelenti. Ilyen esetben a gömb felett értelmezett Fisher-statisztika (Fisher et al. 1993) vagy annak továbbfejlesztett változata használatos (Henry et al. 1995). E megközelítés hátránya, hogy a sajátirányok statisztikai vizsgálatánál a sajátvektorok ortogonalitását nem veszi figyelembe, a sajátvektorokat egymástól független valószínűségi változóknak tekinti.

Célunk olyan, a fizikai modellt nem torzító statisztikai eljárás kidolgozása, amellyel mérési eredményekből meghatározott tenzormennyiségek ekvivalenciája, illetve kü-

lönbsége számszerűsíthető, illetve akár különböző eredetű mennyiségek közötti kapcsolat is vizsgálható. Mivel szimmetrikus tenzorok statisztikai vizsgálatával leginkább a mágneses szuszceptibilitási tenzor kapcsán foglalkoztak, ezért a geofizika ezen ágában elterjedt terminológiát használjuk. Eredményeinket a mágnesesanizotrópia-mérések példáján mutatjuk be, azonban állításaink tetszőleges, valós elemű tenzorral ábrázolható mennyiségre általánosíthatóak. Jelen írás elsődleges célja egy új, sztocasztikus tenzorok statisztikai vizsgálatára szolgáló módszer bemutatása. A cikk 2. fejezete rövid irodalmi összefoglaló után az ún. forgási anizotrópia vizsgálatával foglalkozik. A 3. fejezet különböző rétegekből származó vagy egyéb okokból eltérő mintákon mért anizotrópiatenzorok elkülönítését megvalósító módszert mutat be. Az előző két fejezet nyomán a 4. fejezet tenzorral ábrázolható közetfizikai mennyiségek statisztikai összehasonlítására ad módszert.

2. A forgási anizotrópia vizsgálata

Munkánk során a gyakorlatban leginkább előforduló, másodrendű, szimmetrikus, valós elemű tenzorokat vizsgáljuk. A \mathbf{k} tenzor az O középpontú, (X, Y, Z) derékszögű koordináta-rendszerben a

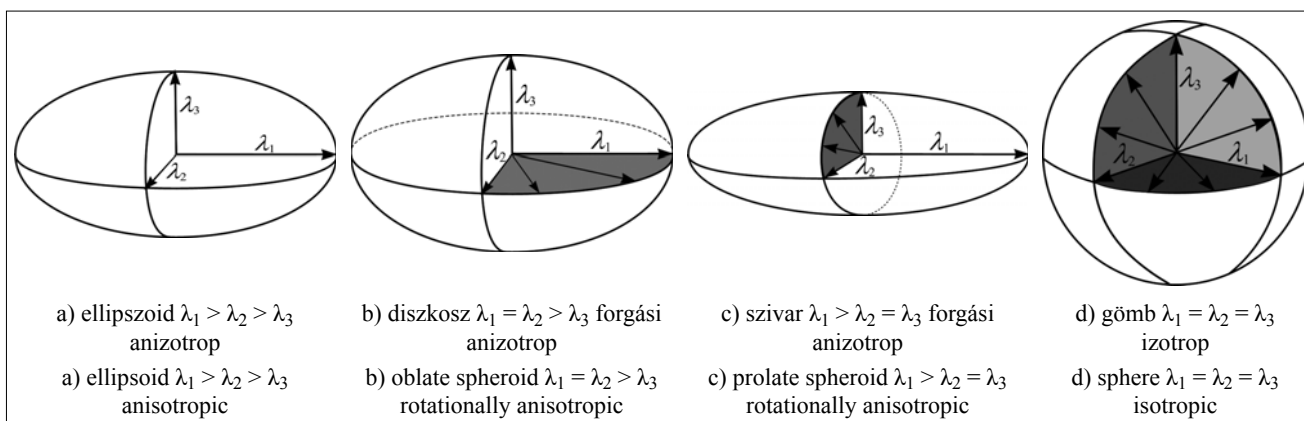
$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

mátrixszal ábrázolható. \mathbf{k} sajátértékeit nagyság szerint sorba állítva jelölje $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$! Ha a sajátértékek pozitívak, akkor a \mathbf{k} tenzornak egy ellipszoid feleltethető meg. Az ellipszoid nagytengelyeinek hossza megegyezik a sajátértékekkel, a nagytengelyek irányát a sajátértékekhez tartozó sajátvektorok jelölik ki. Ha \mathbf{k} sajátértékeire teljesül, hogy $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$, akkor \mathbf{k} -t *anizotrop tenzornak* nevezzük (1a. ábra). Az eltérő sajátértékeket a lineáris algebrában egyszeres multiplicitásúnak nevezik. (A lineáris algebra megkülönbözteti a *geometriai* és az *algebrai multiplicitás* fogalmát, azonban bizonyított, hogy szimmetrikus mátrixok esetén a geometriai és az algebrai multiplicitás azonos (Wetl, 2011), ezért a

továbbiakban az azonos sajátértékekre a multiplicitás szóval utalunk.) Lehetséges, hogy \mathbf{k} pontosan két sajátértéke azonos. Ha ez a $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$ relációt jelenti, akkor a tenzornak megfeleltethető test egy diszkoszhoz hasonlít (legnagyobb területű vetülete kör, 1b. ábra). Amennyiben a $\lambda_1 \neq \lambda_2 = \lambda_3$ reláció áll fenn, akkor a test szivarszerű (legkisebb területű vetülete kör, 1c. ábra). Mindkét említett esetben van egy sajátérték, ami kétszeres multiplicitással rendelkezik. (Jelinek 1988) nyomán forgási anizotrópiaként utalunk ezen két lehetőségre. Forgási anizotrópia esetén a két azonos sajátértékhez tartozó sajátirány határozza meg azt a síkot, amelyen a vetület kör. Ezen síkban minden, O kezdőpontú vektor sajátirány. Lehetséges továbbá, hogy a tenzor összes sajátértéke azonos ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$), akkor a tenzor izotrop, az egyetlen sajátérték multiplicitása 3. Az izotrop tenzornak megfeleltethető test a gömb (1d. ábra), amely jól szemlélteti, hogy az izotrop tenzor semmilyen irányultsággal nem rendelkezik, esetében bármely, az origóból induló vektor sajátirány.

Azt gondolhatnánk, hogy az egyenlőség megkövetelése miatt izotrop és forgási anizotrop tenzorok ritkán, vagy egyáltalán nem fordulnak elő a geofizikai gyakorlatban. Ez az intuición tévesnek bizonyul akkor, ha a \mathbf{k} tenzor elemei valószínűségi változók. Ilyen, sztocasztikus tenzorra jó példa a mágneses szuszceptibilitási tenzor, ami az ismert \mathbf{H} mágneses térerősség vektor és a mért \mathbf{M} mágnesezettség vektor közötti kapcsolatot teremti meg (azaz $\mathbf{M} = \mathbf{kH}$). A mérési eljárást és annak statisztikai értékelését (Jelinek 1988) részletesen ismerteti. A mérés során 15, előre definiált irányban határozzák meg a minta mágnesezettségét. Ilyen esetben \mathbf{k} meghatározása nem más, mint egy hatparaméteres lineáris regresszió paramétereinek ($k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{22}, k_{23}, k_{33}$) illesztése a mérési eredményekre. A statisztikai elemzéshez kézenfekvőbb a hat paramétert egy vektorban összefoglalni, ezért ha külön nem jelezzük, akkor a továbbiakban:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{22} \\ k_{33} \\ k_{12} \\ k_{23} \\ k_{13} \end{bmatrix}. \quad (2)$$



1. ábra | A 3×3-as, pozitív denfnit tenzornak megfeleltethető ellipszoidok
 Figure 1 | Ellipsoids associated with 3×3, positive definite tensors

Jelinek nyomán az egy darab mintán mért szuszceptibilitási tenzor forgási anizotrópiáját vagy izotrópiáját egyszerű, a sajátértékekre vonatkozó statisztikai próbákkal el lehet dönteni (Jelinek 1988). Bemutatásra kerülő eredményeink rávilágítanak arra, hogy pusztán a sajátértéken alapuló próbák nem elégségesek a szuszceptibilitási tenzor jellemzésére. Ez a megállapítás elvi jelentőségű csupán: manapság a mérési eljárás hibája nagyon kicsi, annak statisztikai elemzéstől akár el is lehet tekinteni (Jelinek 1978). Ezért írásunkban a minta szintű kiértékeléssel a továbbiakban nem foglalkozunk.

A geofizikai alkalmazás szempontjából lényegesebb probléma, ha egy mintacsoporttal (például egy földrajzi terület több mintája) rendelkezünk és ezek alapján szeretnénk következtetéseket levonni. Jellemzően a minták szuszceptibilitási tenzorai eltérőek, ez részben ugyan magyarázható az orientációs hibával, de gyakran a mögöttes fizikai folyamatra vezethető vissza a tenzorok különbsége. Ilyen eset például a harmadidőszaki üledékes kőzeteknél áll elő akkor, ha a tömörödésen kívül nem volt olyan mechanizmus (vízfolyás, oldalirányú nyomás), ami a rétegződés síkjában irányultságot jelölt volna ki. Harmadidőszaki kőzetekből származó mintacsoportok elemzése felveti azt a kérdést, hogy van-e lehetőségünk az említett mechanizmusok kimutatására akkor, ha ezek ugyan jelen voltak, de csak gyenge, kis mértékű irányultságot tudtak kialakítani. Jelen írásban különböző helyszínek üledékes formációiból származó mérési eredményekre alkalmazzuk a bemutatásra kerülő eljárást. Nem célunk az ismertetésre kerülő helyszínek földtani elemzése, a példák a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát támasztják alá. A bemutatásra kerülő magyarországi példák földtani hátterét, az alkalmazott mérési módszereket és a mérési eredmények értelmezését (Sipos-Benkó et al. 2014) részletesen tárgyalja.

A mintacsoport mérési eredményeit olyan N elemű statisztikai mintának tekintjük, ahol a minta elemei a mért szuszceptibilitási tenzorok. Jelinek (1978) eljárást ad a várható érték számítására, módszere Hext (1963) eredményein alapszik. Kettőjük eljárásával az eredő szuszceptibilitási tenzor sajátvektorainak és sajátértékeinek konfidencia intervallumai számíthatók. A statisztikai elemzés nehézségét az okozza, hogy egy tetszőleges másodrendű tenzor sajátértékei és sajátvektorai a tenzor elemek nemlineáris függvényei. A Hext-féle statisztikai eljárás (Hext, 1963) e függvények linearizálásán alapszik. Ehhez szükséges kikötni, hogy az egyes tenzorelemek Δ -szórása kisebb két tetszőleges sajátérték különbségénél. Nevezzük *kismértékben anizotropnak* azt a \mathbf{k} tenzort, amely bármely elemének szórására teljesül, hogy

$$\Delta > |\lambda_i - \lambda_j|, \quad i \neq j, \quad i, j \in (1, 2, 3). \quad (3)$$

Mind Hext, mind Jelinek írásaikban felhívják a figyelmet arra, hogy módszerük az imént definiált, kismértékben anizotrop tenzorokra nem alkalmazható. Azonos sajátértékekkel rendelkező (izotrop, vagy forgási anizotrop) tenzorok esetén pedig nullával való osztást eredményez. Jelinek eljárása tartalmaz egy statisztikai próbát annak eldöntésére,

hogy az eredő tenzor izotrop-e, vagy sem. Azonban (szemben a minta szintű kiértékeléssel) nem foglalkozik a forgási anizotrópia problémájával. Constable és munkatársai (1990) e hiányosságot joggal kifogásolják, továbbá felhívják a figyelmet arra, hogy az eredő tenzor sajátértékeinek és sajátvektorainak meghatározásakor Jelinek (1978) a már említett, Hextől származó linearizálást hajtja végre, ami kismértékben anizotrop tenzorok esetén a konfidenciaintervallum jelentős alulbecsléséhez vezet. Jelinek (1978) ezzel kapcsolatban annyi támponot ad, hogy amennyiben bármelyik sajátvektorhoz számított konfidenciaellipszis nagyobbik nyílásszöge (a konfidenciaellipszis nagytengelyének végpontjai által meghatározott szög a sztereografikus projekción) meghaladja a 25 fokot, úgy módszere nem használható (a geofizikában szokásos, $\alpha = 0,05$ szignifikancia szint mellett). Constable és munkatársai (1990), Tauxe és munkatársai (1990, 1991) éppen az említett hiányosságok miatt választanak más megközelítést. Az említett publikációk az ún. *bootstrapping eljárást* használják fel a statisztikai elemzéshez. Azonban a sajátvektorok konfidencia körreit csak úgy tudják számítani, hogy a sajátvektorokat egymástól függetlennek tekintik (nem foglalkoznak az ortogonalitással), illetve a forgási anizotrópiát csak meglehetősen szubjektíven, gyakoriságdiagramok alapján különítik el.

Jelen írás fő megállapítása, hogy létezik a Jelinek-féle módszerhez hasonló, az említett hiányokat kiküszöbölő eljárás. A felvetett probléma matematikai szempontból is érdekes: a lineáris algebra (Wetl 2011) és a tenzoranalízis (Itskov 2007) területén gyakran találkozunk azzal, hogy a többszörös multiplicitású sajátértékek külön vizsgálatot igényelnek. Esetünkben épp a többszörös multiplicitás vizsgálata mutat rá arra, hogy sztochasztikus tenzorok esetén a determinisztikus tenzoroknál megszokott összefüggéseket nem lehet automatikusan alkalmazni, tekintettel kell lenni arra, hogy valószínűségi változókkal végezzünk műveleteket. Írásunkban gyakran fogunk a forgási anizotrópiára utalni, a továbbiakban következetesen csak a $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$ esettel foglalkozunk, a $\lambda_1 \neq \lambda_2 = \lambda_3$ eset levezetése teljesen analóg módon történhet.

A fentiek nyomán feltesszük, hogy az egyes minták kiértékelése során a számított tenzor elemek variancia-kovariancia mátrixa közel zérus. Ezzel a mért minta \mathbf{k}_i ($1 \leq i \leq N$) tenzorát mérési hiba nélküli, pontosan ismert, determinisztikus mennyiségnek tekintjük. (Ez a feltevés megegyezik a jelenlegi gyakorlattal, a (Jelinek 1978) alapján készült AnisoSoft 4.2. szofver is ezen alapul.) Feltesszük továbbá, hogy a statisztikai mintajellemzők empirikus értékeinek várható értéke megegyezik az elméleti értékekkel. (A továbbiakban minta alatt mindig a statisztikai mintát értjük).

2.1. A várható érték és a kovariancia számítása

A mintacsoport eredő tenzorának meghatározásához tisztázni kell, hogy a számítást normált, vagy normálás nélküli adatokon hajtjuk végre. Az N elemű statisztikai mintában szereplő, \mathbf{k}_i tenzorok nem csak sajátvektoraik, hanem saját-

értékeik szerint is különböznek (pontosabban fogalmazva, skalárinvariánsaik eltérők). Az alapján, hogy ezen különbséget mely okokkal hozzuk összefüggésbe, két lehetőségünk van:

1. Amennyiben a vizsgált jelenség szempontjából érdektelen okok állhatnak az eltérő skalárinvariánsok mögött (például mágneses vizsgálatok esetén a szuszceptibilitási ellipszoid irányaira vagyunk kíváncsiak, az eltérő ellipszoid térfogatok a minták eltérő ásványi összetételének tudhatóak be), akkor ezen okok hatását a tenzorok normálásával tudjuk csökkenteni.
2. Amennyiben a vizsgált jelenség szempontjából lényeges okra vezetjük vissza az első skalár invariánsokban megmutatkozó különbséget, akkor közvetlenül a mért tenzorokon kell a statisztikai vizsgálatot végrehajtani.

A paleomágneses irodalomban (Jelinek 1978, Constable et al. 1990) jellemzően a tenzor első skalárinvariánsának ($I_1 = k_{11} + k_{22} + k_{33}$) segítségével hajtják végre a normálást:

$$k_{n,i} = \frac{k_i}{k_{i,11} + k_{i,22} + k_{i,33}}. \quad (4)$$

Az adatok normálásnak célja a tenzoroknak megfelelő ellipszoidok méretkülönbségének kiküszöbölése. Az első skalárinvariáns használata ezen célra vitatható, ámbar kétségkívül praktikus választás. Elvileg lehetőségünk lenne a másik két skalárinvariáns valamelyikének használatára is (például az imént említett, azonos térfogatú ellipszoidok esetén a minta egyes elemeire az $I_3 = \det(\mathbf{k})$ mennyiséget kell azonosítást tenni). A 4. fejezetben olyan transzformációra is példát fogunk mutatni, amely lehetővé teszi két skalár invariáns azonosságát anélkül, hogy a tenzor sajátirányai megváltoznának.

A normálás következtében a $k_{n,i}$ elemei közül csak öt független, hiszen $k_{n,i,11} + k_{n,i,22} + k_{n,i,33} = 1$. Ezért normált esetben a k_i vektor csak a független elemeket tartalmazza, írásunkban:

$$\mathbf{k}_i = \begin{bmatrix} k_{n,i,22} \\ k_{n,i,33} \\ k_{n,i,12} \\ k_{n,i,23} \\ k_{n,i,13} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

A bemutatásra kerülő eljárások többsége egyaránt jól használható normált és normálás nélküli statisztikai mintákra. Ez alól csak a 3. fejezetben bemutatásra kerülő klaszteranalízis kivétel: azt normálás nélküli mintán érdemes végrehajtani. A félreértések elkerülése végett fontos kiemelni, hogy normálás esetén a (4) művelet után kapott k_i tenzorok elemeit tekintjük normális eloszlású valószínűségi változóknak. Ezek után a statisztikai minta várható értéke, vagyis az eredő tenzor és a hat (normálás esetén: öt) elem statisztikai kapcsolatát jellemző 6×6 -os (normálás esetén: 5×5 -ös) variancia-kovariancia mátrix (\mathbf{V}) torzítatlan becslése az ismert módon számítható (Timm 2002):

$$\mathbf{k}_e = E(\mathbf{k}_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{k}_i, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= E((\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_e)(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_e)^T) \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_e)(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_e)^T. \end{aligned} \quad (7)$$

2.2. Az eredő tenzor sajátirányai

Az eddigi leírás is sejteti, hogy az N elemű statisztikai minta (akár normált, akár normálás nélküli) \mathbf{k}_i tenzoraiból ($i = 1, \dots, N$) az eredő \mathbf{k}_e tenzor (6) és annak sajátirányai valamely alkalmas algoritmussal meghatározhatóak anélkül, hogy a sajátértékek multiplicitását vizsgálnánk. Ez a gyakorlati alkalmazás szempontjából veszélyesnek is mondható: az elterjedt numerikus módszerek forgási anizotrópia ($\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$) esetén is három főirányt adnak eredményül, holott ebben az esetben a kétszeres multiplicitású sajátértékhez tartozó sajátvektorok (\mathbf{u}_1 és \mathbf{u}_2) tetszőleges lineáris kombinációja is sajátvektor. (Természetesen ez a probléma izotrop tenzor esetén is fennáll.) Célunk olyan statisztikai eljárás megkonstruálása, amivel a forgási anizotrópia kizárható. Ehhez vagy a Jelinek-féle eljárás nem lineáris változatára lenne szükség, vagy egy olyan összefüggésre a forgási anizotrop \mathbf{k}_e elemei között, amit statisztikai teszttel ellenőrizni tudunk.

Az izotrop eset vizsgálatára Jelinek az utóbbi megközelítést javasolja. Az izotrop tenzor – a koordináta-rendszer tengelyirányaitól függetlenül – diagonál mátrixnak feleltethető meg, így könnyű olyan transzformációt mutatni, amely \mathbf{k}_e elemeire nézve lineáris. A normális eloszlású valószínűségi változók lineáris kombinációjával nyert valószínűségi változó is normális eloszlású, ezért az izotropia az egymintás t -próba többdimenzós változatával, az ún. Hotelling-féle T^2 -próba egymintás változatával vizsgálható. Sajnos forgási anizotrópiával bíró tenzorra nem található ilyen lineáris transzformáció. (A forgási anizotrop \mathbf{k}_e elemei között levezethető, nem lineáris kapcsolatot az Appendix tartalmazza.) Vélhetően ez az oka annak, hogy Jelinek (1978) mellőzi a forgási anizotropia vizsgálatát.

Ahelyett, hogy a normális eloszlású valószínűségi változókkal kitöltött \mathbf{k}_e tenzor sajátvektorainak és főirányainak egzakt valószínűségi eloszlását kísérlelnénk meg levezetni, egy olyan eljárást mutatunk, ahol ugyan nagyobb számításgigánnyal, de közelítés nélküli statisztikai próbát lehet végrehajtani. A \mathbf{u}_i sajátvektorok és a λ_i sajátértékek definíciója jól ismert:

$$\mathbf{k}_e \mathbf{u}_i = \lambda_i \mathbf{u}_i, \quad (8)$$

ahol az irodalomban szokásos módon $|\mathbf{u}_i| = 1$ és $i = 1, 2, 3$. A tetszőleges, O középpontú egységvektort jelölje \mathbf{u} , ez tipikusan nem sajátvektora a \mathbf{k}_e tenzornak. A (8) egyenlet alapján definiáljuk a következő vektort:

$$\mathbf{e} = \mathbf{k}_e \mathbf{u} - (\mathbf{u}^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}) \mathbf{u} = \mathbf{k}_e \mathbf{u} - \lambda \mathbf{u}. \quad (9)$$

A konstrukció miatt \mathbf{e} akkor, és csak akkor zérus vektor, ha $\mathbf{u} = \mathbf{u}_i$, és ekkor (8) alapján $\lambda = \lambda_i$ is teljesül. Vegyük észre, hogy a (9) egyenlet \mathbf{k}_e elemeire nézve lineáris összefüggés, amelyet a következő alakra lehet hozni:

$$\mathbf{e} = \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{k}_e. \quad (10) \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{Nem normált statisztikai minta esetén } \mathbf{A} = [0, 0, 0]^T \text{ és a} \\ \text{3} \times \text{6-os } \mathbf{B} \text{ mátrix csak } \mathbf{u} \text{ elemeitől } (u_1, u_2 \text{ és } u_3) \text{ függ:} \end{array} \right.$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} u_1 - u_1^3 & -u_1 u_2^2 & -u_1 u_3^2 & -2u_1^2 u_2 + u_2 & -2u_1 u_2 u_3 & u_3 - 2u_1^2 u_3 \\ -u_1^2 u_2 & u_2 - u_2^3 & -u_2 u_3^2 & u_1 - 2u_1 u_2^2 & u_3 - 2u_2^2 u_3 & -2u_1 u_2 u_3 \\ -u_1^2 u_3 & -u_2^2 u_3 & u_3 - u_3^3 & -2u_1 u_2 u_3 & u_2 - 2u_2 u_3^2 & u_1 - 2u_1 u_3^2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Normált statisztikai minta esetén az \mathbf{A} vektor nem zérus, a \mathbf{B} mátrix pedig 3×5 -ös:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_1 - u_1^3 \\ -u_1^2 u_2 \\ -u_1^2 u_3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -u_1 u_2^2 - u_1 + u_1^3 & -u_1 u_3^2 - u_1 + u_1^3 & -2u_1^2 u_2 + u_2 & -2u_1 u_2 u_3 & u_3 - 2u_1^2 u_3 \\ u_2 - u_2^3 + u_1^2 u_2 & -u_2 u_3^2 + u_1^2 u_2 & u_1 - 2u_1 u_2^2 & u_3 - 2u_2^2 u_3 & -2u_1 u_2 u_3 \\ -u_2^2 u_3 + u_1^2 u_3 & u_3 - u_3^3 + u_1^2 u_3 & -2u_1 u_2 u_3 & u_2 - 2u_2 u_3^2 & u_1 - 2u_1 u_3^2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Többváltozós normális eloszlás lineáris kombinációja is normális eloszlás, amennyiben a (10) egyenletben \mathbf{B} teljes rangú. Ez esetünkben nem teljesül, meg lehet mutatni, hogy mivel \mathbf{u} egységvektor, \mathbf{B} rangja mindig 2. Ez azt jelenti, hogy \mathbf{e} elemei közül egy lineárisan függ a másik két elem egyikétől. \mathbf{B} lineárisan összefüggő két sora közül az egyiket töröljük, az így nyert 2×6 -os (normált esetben 2×5 -os) mátrixot jelölje $\hat{\mathbf{B}}$. Az \mathbf{A} vektor ugyanazon sorának törlésével nyerjük a $\hat{\mathbf{A}}$ vektort. Így az $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{B}} \mathbf{k}_e$ összefüggéssel számított vektor két eleme egymástól lineárisan független, normális eloszlású valószínűségi változó. Az elemek 2×2 -es variancia-kovariancia mátrixa közvetlenül \mathbf{k}_e független elemeinek (7) egyenlettel definiált, \mathbf{V} variancia-kovariancia mátrixából határozható meg:

$$\mathbf{W} = \hat{\mathbf{B}} \mathbf{V} \hat{\mathbf{B}}^T. \quad (14)$$

Azt kívánjuk statisztikai próbával vizsgálni, hogy az \mathbf{u} egységvektor lehet-e a \mathbf{k}_e tenzor sajátvektora. A próba hipotézisei:

$$\begin{aligned} H_0 : \hat{\mathbf{e}} &= \mathbf{0}, \\ H_1 : \hat{\mathbf{e}} &\neq \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (15)$$

Normális eloszlású vektorok esetén a várható értékre vonatkozó többdimenziós próbát a Hotelling-féle T^2 -teszt egyoldali változatával hajtjuk végre. A próbastatisztika:

$$T^2 = N \hat{\mathbf{e}}^T \mathbf{W}^{-1} \hat{\mathbf{e}}, \quad (16)$$

amely az F -eloszlást követi. Az összevetéshez a $p_1 = 2$ és $p_2 = N - 2$ paraméterű, α szignifikanciaszinten vett F -eloszlás inverzének irodalom (Timm 2002) szerinti átskálázására van szükségünk:

$$T_0 = 2(N - 1)/(N - 2) F_{1 - \alpha, 2, N - 2}. \quad (17)$$

Amennyiben $T^2 < T_0$ teljesül, a H_0 hipotézis elutasítására nincs okunk, ellenkező esetben H_1 javára döntünk. Az, hogy a (15) hipotézisek alapján mely vektorok kerülnek elfogadásra, nagymértékben függ a mérési eredmények szórásától. Ezért a teszt által elfogadott \mathbf{u} vektorokat *pseudo-sajátvektoroknak* nevezzük el, és az $\hat{\mathbf{u}}$ jelöléssel látjuk el megkülönböztetve ezeket a \mathbf{k}_e tenzor közvetlenül számított \mathbf{u}_i sajátvektoraitól. Gyakorlati alkalmazásokban a félgöm-

böt megfelelő sűrűségű (legalább 100, hozzávetőlegesen egyenletesen szétosztott pont a gömb felszínén) hálózattal diszkrétizálva meghatározható a pseudo-sajátvektorok elhelyezkedése (a bemutatásra kerülő példákban 200 pontos diszkrétizálást használtunk). A számítás eredménye a geofizikában használatos sztereogramokon könnyen ábrázolható.

2.3. Statisztikai próbák a forgási anizotrópia ellenőrzésére

A 2.2. alfejezetben leírt próba eredménye ugyan könnyen vizualizálható, azonban ez még nem dönt a forgási anizotrópia kérdésében. Láttuk korábban (*Ib.* és *c ábra*), hogy a forgási anizotrópiát megközelíthetjük akár a sajátértékek ($\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$), akár a sajátvektorok felől (ha az \mathbf{u}_1 és \mathbf{u}_2 sajátvektorok által kifeszített sík minden, O középpontú vektora sajátvektor, akkor a tenzor forgási anizotrop). Amíg a két megközelítés determinisztikus (mérési hibával nem terhelt) tenzorok esetén felcserélhető, addig sztochasztikus tenzorok esetén a két megközelítés vezethet eltérő eredményre. Ennek oka, hogy a tenzor elemei a sajátvektorokat és a sajátértékeket eltérő, nemlineáris függvényekkel határozzák meg. Ezért a \mathbf{k}_e tenzor elemeinek szórása is eltérő módon jelentkezik a sajátvektorokban és a sajátértékekben. A 2.2. alfejezetben ismertetett konstrukció lehetővé teszi, hogy mindkét megközelítés alapján külön-külön statisztikai próbákat hajtunk végre. Azt is mondhatjuk, hogy – szemben a sajátértékekre koncentrált irodalommal – mindkét vizsgálat szükséges ahhoz, hogy a forgási anizotrópia (sőt, az izotrópia!) kérdésében dönteni tudjunk.

A *sajátvektorokon alapuló vizsgálat* esetén a sztereogramon a (15) próba elvégzése után feltüntetjük a $\hat{\mathbf{u}}$ pseudo-sajátvektorokat. Szemlélet alapján is könnyen ellenőrizhetjük, hogy a pontfelhőben három, kettő, vagy egy diszjunkt halmazt lehet elkülöníteni. Három elkülönülő halmaz anizotrop, kettő elkülönülő halmaz forgási anizotrop, egy (összefüggő) halmaz pedig izotrop tenzorra utal. Ha számszerűsíteni is szeretnénk eredményeinket, akkor a \mathbf{k}_e tenzor

számított sajátirányából (ahogy utaltunk rá, a numerikus eljárások jellege miatt ebből mindig három van) képezzük a $\mathbf{u}_{ij} = (1/\sqrt{2})(\mathbf{u}_i + \mathbf{u}_j)$ vektorokat ($i = 1, 2, j = 2, 3$, és $i < j$). Amennyiben mindhárom \mathbf{u}_{ij} esetén a (15) próba H_1 alternatív hipotézise igazolódik, akkor a tenzor a sajátvektorok szempontjából anizotrop, ha pontosan egy \mathbf{u}_{ij} esetén igazolódik H_0 hipotézis, akkor a tenzor forgási anizotrop (u_i és u_j sajátvektorok síkjában minden vektor sajátvektor), egyébként izotrop (mivel ekkor mindhárom \mathbf{u}_{ij} esetén H_0 igazolódik). E vizsgálatnál állításunk erejét is igazolhatjuk: a H_1 -re vezető \mathbf{u}_{ij} vektoroknál a (15) próba erejét is számszerűsít-hetjük (Timm 2002).

Konstrukción hasonlóan alkalmas arra, hogy a (15) próbával elfogadott irányokban a sajátérték vizsgálatát hajtsuk végre. Legyen két, különböző pseudo-sajátvektor $\tilde{\mathbf{u}}_1$ és $\tilde{\mathbf{u}}_2$! Mindkét esethez számítható a (9) összefüggésben λ -val jelölt skalár:

$$\tilde{\lambda}_i = \tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{k}_e \tilde{\mathbf{u}}_i, \quad (18)$$

amelyet *pszeudo-sajátértéknek* nevezünk. Természetesen $\tilde{\lambda}$ a valódi sajátirányokban a sajátértékkel egyenlő. A pszeudo-sajátérték valószínűségi változó, \mathbf{k}_e elemeinek lineáris függvénye ($\tilde{\lambda} = \mathbf{C} + \mathbf{D}\mathbf{k}_e$), ezért normális eloszlású. Nem normált statisztikai minta esetén $\mathbf{C} = 0$ és $\mathbf{D} = [\tilde{u}_1\tilde{u}_1, \tilde{u}_2\tilde{u}_2, \tilde{u}_3\tilde{u}_3, 2\tilde{u}_2\tilde{u}_1, 2\tilde{u}_2\tilde{u}_3, 2\tilde{u}_3\tilde{u}_1]^T$. Normált adathalmazra $\mathbf{C} = [\tilde{u}_1 - \tilde{u}_3^2, -\tilde{u}_1^2\tilde{u}_2, -\tilde{u}_1^2\tilde{u}_3]^T$ és $\mathbf{D} = [\tilde{u}_2^2 - \tilde{u}_1^2, \tilde{u}_3^2 - \tilde{u}_1^2, 2\tilde{u}_2\tilde{u}_1, 2\tilde{u}_2\tilde{u}_3, 2\tilde{u}_3\tilde{u}_1]^T$. A variancia-kovariancia mátrix jelen esetben egyetlen elemű: $\tilde{\mathbf{W}}_i = \mathbf{D}\mathbf{D}^T$. Célunk $\tilde{\lambda}_1$ és $\tilde{\lambda}_2$ várható értékének összehasonlítása, ezt kétmintás t -próbával tehetjük meg, feltéve, hogy a $\tilde{\mathbf{W}}_1 = \tilde{\mathbf{W}}_2$ teljesül. Ezen feltétel teljesülését F -próbával igazoljuk. A várható értékek azonosságát vizsgáló próba hipotézisei:

$$\begin{aligned} H_0: & \tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2, \\ H_1: & \tilde{\lambda}_1 \neq \tilde{\lambda}_2. \end{aligned} \quad (19)$$

A próbastatisztikát a $2N - 2$ szabadságfokú t eloszlásfüggvény inverzének α szignifikanciaszinten vett értékével vetjük össze:

$$t = \sqrt{N} \frac{\tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_2}{\sqrt{W_1^2 + W_2^2}}, \quad (20)$$

$$t_0 = T_{1-\alpha, 2N-2}. \quad (21)$$

A $t < t_0$ esetben H_0 hipotézis elvetésére nincs okunk, a két sajátérték különbsége statisztikai alapon nem állapítható meg. Ellenkező esetben a két sajátértéket az α szignifikanciaszinten különbözőnek kell tekintenünk. Praktikus az imént ismertett próbát úgy végrehajtani, hogy az egyik pszeudo-sajátvektort \mathbf{k}_e egyik sajátvektorának irányában vesszük fel (például $\tilde{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{u}_i$). Így meg tudjuk jelölni azon pszeudo-sajátvektorokat, amelyek pszeudo-sajátértéke szignifikánsan nem különbözik valamelyik sajátértéktől. Ennek segítségével a példánál alkalmazott színezés egyértelmű.

Nincs okunk feltételezni, hogy egy adott statisztikai minta sajátértékeinek és sajátvektorainak vizsgálata ugyanarra az eredményre vezet. Amíg egy determinisztikus (mérési

1. táblázat | Determinisztikus tenzorok lehetséges osztályozása

Jel	Sajátértékek	Sajátirányok diszjunkt halmazai		
		1	2	3
A	$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$	izotrop		
B	$\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$ $\lambda_1 \neq \lambda_2 = \lambda_3$	forgási anizotrop		
C	$\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$	anizotrop		

2. táblázat

Sztocasztikus tenzorok lehetséges osztályozása. A táblázatban szereplő rövidítések: KA – kismértékben anizotrop, KFA – kismértékben forgási anizotrop. A sajátértékeknel alkalmazott \cong jellel arra utalunk, hogy a tenzor sajátértékei statisztikai próbával nem megkülönböztethetők

Jel	Sajátértékek	Sajátirányok diszjunkt halmazai		
		1	2	3
A	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3$	izotrop	KFA	KA
B	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \neq \lambda_3$ $\lambda_1 \neq \lambda_2 \cong \lambda_3$	KFA	forgási anizotrop	KA
C	$\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$	KA	KA	anizotrop

hibával nem rendelkező) tenzor esetén a lineáris algebrából jól ismert módon csak három lehetőség közül választhatunk (ld. 1. ábrán és az 1. táblázatban), addig statisztikai kiértékelés esetén a megkülönböztethető esetek száma kilenc (2. táblázat). A megnövekedett esetszám a tenzorelemek szórásából eredő bizonytalanságot fejezi ki: például lehetséges, hogy a sajátirányok a sztereogramon jól elkülönülnek, a hozzájuk tartozó sajátvektorok nagysága olyan mértékben bizonytalan, hogy nem dönthető el, melyik értéke maximális. Például az anizotrópia meglétét csak akkor jelenthetjük ki egyértelműen, ha a pszeudo-sajátértékek szignifikánsan eltérnek és a pszeudo-sajátvektorok három diszjunkt halmazt alkotnak. Hasonlóan szükséges, hogy mind a sajátértékek, mind a sajátvektorok szerint igazolódjon a forgási anizotrópia vagy az izotrópia. A gyakorlat szempontjából érdemes a 2. táblázat hasonló jelentésű celláit összefoglaló névvel illetni: a bevezetésben már említett, kismértékben anizotrop (KA) tenzorokat a 2. táblázat 3A és 3B cellái tartalmazzák. Ezekhez hasonlít az az eset, a három sajátérték különböző ugyan, de a pszeudo-sajátirányok nem különböznek el eléggé, egy vagy két diszjunkt halmazt alkotnak (1C és 2C cellák). Írásunkban ezeket az eseteket is kismértékben anizotropnak tekintjük. Az elnevezéssel arra utalunk, hogy az anizotrópia pontosan egyik feltételének teljesülését tuduk igazolni. Hasonlóan járunk el a forgási anizotrópia esetében is: a pontosan két megkülönböztethető sajátértékel és egy halmazt alkotó pszeudo-sajátvektorokkal rendelkező, továbbá a két halmazt adó pszeudo-sajátvektorokkal, de megkülönböztethetetlen sajátértékekkel jellemezhető tenzorokat *kismértékben forgási anizotropnak* (KFA) nevezük, ezek a 2. táblázat 1B és 2A celláiban találhatóak.

2.4. A zajérzékenység vizsgálata

A 2. táblázatban bemutatott, a determinisztikus tenzorokhoz szokott kutató számára talán furcsának tűnő esetek nem elhanyagolható mennyiségben jelennek meg a paleomágneses mérések között. Mielőtt terepi mérések kiértékelését mutatnánk be, szimulált adatsorokon vizsgáljuk az eljárás működését. Tegyük fel, hogy egy hipotetikus földrajzi hely \mathbf{k}_i mérési eredményi az egzakt \mathbf{k}_0 tenzort közelítik! Az egyszerűség kedvéért feltesszük, hogy nincs szükség normalásra és az O középpontú koordináta-rendszer tengelyei egybeesnek \mathbf{k}_0 sajátirányaival (azaz $k_{0,12} = k_{0,13} = k_{0,23} = 0$). A terepi mérések jellemően $N = 20 \dots 40$ mérési eredményt szolgáltatnak, ennek megfelelően a szimulációkat $N = 30$ méretű mintán hajtottuk végre. Az egyes szimulált mérési eredményeket az egzakt tenzorból állítottuk elő:

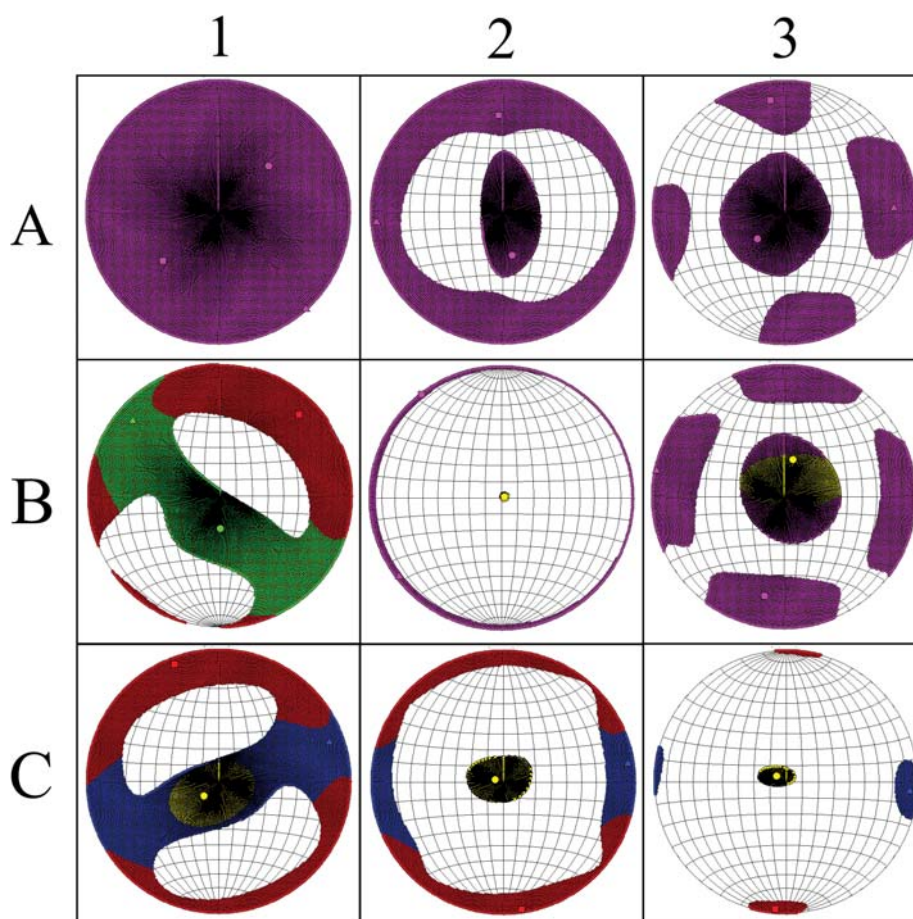
$$\mathbf{k}_i = \mathbf{k}_0 + \Delta \mathbf{r}_i, \quad (22)$$

ahol \mathbf{r}_i elemei standard normális eloszlásból húzott számok, Δ a szimulációban felvett szórás. A szimulációk során \mathbf{k}_0

3 táblázat $N = 30$ szimulált mérési eredményből képzett statisztikai minták kiértékelése. A szimulációk feltüntetett kimenetelei a 2. táblázat celláira utalnak. A szimuláció sztochasztikus jellege miatt elvben bármely kimenetel lehetséges. A többszöri futtatás esetén leggyakoribb kimeneteleket tüntettük fel, a zárójelben szereplő kimenetelek ritkábban, de érzékelhető mennyiségben (körülbelül 1–5%-os gyakorisággal) jelentkeznek

\mathbf{k}_0	\mathbf{k}_0 sajátértékei	$\Delta = 0,001$	$\Delta = 0,010$	$\Delta = 0,100$
1A	$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1,00$	1A	1A	1A
2B	$\lambda_1 = \lambda_2 = 1,01$ $\lambda_3 = 1,00$	2B	2B (1C, 1B)	1A
3C	$\lambda_1 = 1,01$ $\lambda_2 = 1,00$ $\lambda_3 = 0,99$	3C	3C (1B, 1C 2B, 2C)	1A

rendre izotrop ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$), forgási anizotrop ($\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$) és anizotrop ($\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$) tenzor volt, a (3) összefüggés nyomán a Δ -szórást a sajátértékek különbségének minimuma környékén vettük fel. A szimuláció eredményeit



2. ábra Szimulációs példák a 2. táblázat osztályaihoz. A szimulációk bemenő paraméterei az egyes esetekhez ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \Delta$) alakban (vö. a 3. táblázattal): 1A: (1,01, 1,00, 0,99, 0,050), 2A: (1,01, 1,01, 1,00, 0,005), 3A: (1,01, 1,00, 0,99, 0,009), 1B: (1,01, 1,01, 1,00, 0,010), 2B: (1,01, 1,01, 1,00, 0,001), 3B: (1,01, 1,00, 0,99, 0,007), 1C: (1,01, 1,00, 0,99, 0,016), 2C: (1,01, 1,00, 0,99, 0,013), 3C: (1,01, 1,00, 0,99, 0,005)

Figure 2 Simulations for the classes of Table 2. The input parameters in $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \Delta)$ form (see also Table 3): 1A: (1.01, 1.00, 0.99, 0.050), 2A: (1.01, 1.01, 1.00, 0.005), 3A: (1.01, 1.00, 0.99, 0.009), 1B: (1.01, 1.01, 1.00, 0.010), 2B: (1.01, 1.01, 1.00, 0.001), 3B: (1.01, 1.00, 0.99, 0.007), 1C: (1.01, 1.00, 0.99, 0.016), 2C: (1.01, 1.00, 0.99, 0.013), 3C: (1.01, 1.00, 0.99, 0.005)

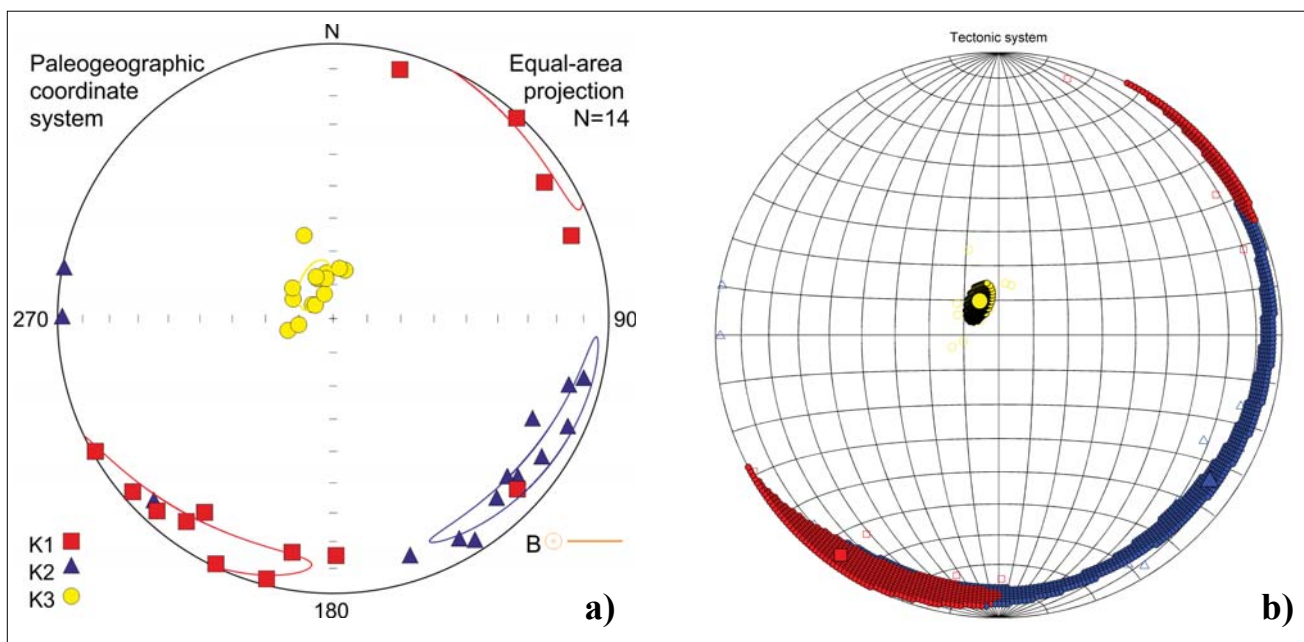
a 3. táblázatban foglaltuk össze. Várakozásinknak megfelelően, a sajátértékek különbségénél kisebb szórás esetén ($\Delta = 0,001$ oszlop) módszerünk egyértelműen beazonosítja \mathbf{k}_0 típusát (azaz a hibás besorolás valószínűsége Δ csökkenésével tart a nullához). Ezzel szemben túl nagy szórás ($\Delta = 0,1$ oszlop) esetén bármely adathalmaz tipikusan izotropnak bizonyul. A második és harmadik sorban felvett \mathbf{k}_0 sajátértékek különbségeinek minimumával megegyező szórás ($\Delta = 0,01$) esetén a szimuláció kimenetele jellemzően visszadja \mathbf{k}_0 típusát, azonban időnként KA és KFA besorolást kapunk eredményül. Ez Δ növelésével egyre gyakrabban fordul elő jelezvén, hogy a $\Delta = 0,1$ oszlopban nagy valószínűséggel IA kimenetelre számíthatunk. Szimulációink alátámasztják a (3) összefüggés kapcsán leírtakat: módszerünk olyan tartományban is képes (legalább részlegesen) reprodukálni \mathbf{k}_0 típusát, ahol az irodalomban található megoldások már izotrópiát jeleznek.

Végezetül a szimulációs adatok lehetővé teszik, hogy a 2. táblázat osztályainak egy-egy jellemző elemét sztereogrammon ábrázoljuk. A 2. ábrán különböző sajátértékek és Δ -szórás mellett ($\alpha = 0,05$ szignifikanciaszinten) mutatjuk be a sztocasztikus tenzorokra jellemző sztereogramokat. Az itt és a későbbi ábrák sztereogramjain a maximális irány (λ_1) sajátvektorát piros, a középső (λ_2) sajátvektorát kék, míg a minimális irány (λ_3) sajátvektorát sárga szín jelöli. Amennyiben a maximális és az intermedier irány sajátértékei nem elkülöníthetőek, akkor a pseudo-sajátvektorok lila színűek, az intermedier és a minimális irány sajátértékeinek megkülönböztethetetlen-ségét zöld szín jelöli.

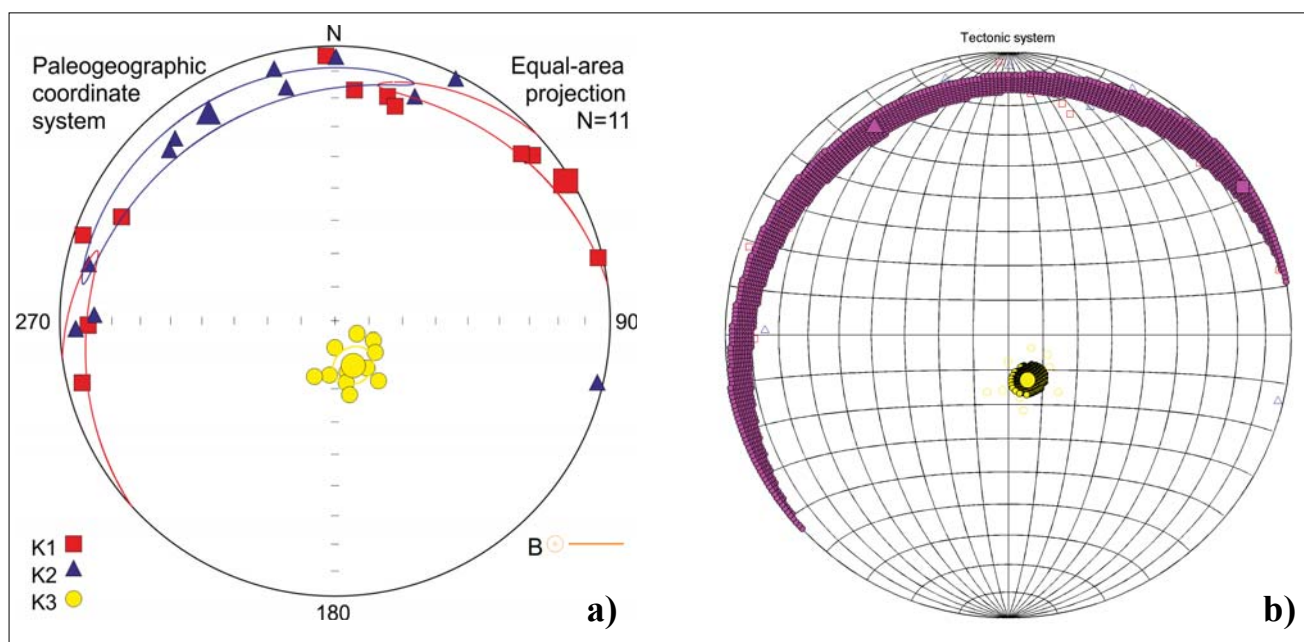
2.5. Terepi példák

Ebben az alfejezetben a gyakorlati alkalmazhatóság alátámasztására módszerünket valós, terepi eredmények kiértékelésére használjuk fel. A bemutatásra kerülő összes példa sztereogramját a tektonikai korrekció után ábrázoljuk. Az összehasonlíthatóság miatt minden példánál megadjuk a Jelinek-féle eljárás eredményeit is. Jelinek a sajátértékeket k_1, k_2, k_3 szimbólumokkal jelöli, ezek teljesen mértékben megfelelnek jelen írás λ_1, λ_2 és λ_3 értékeinek.

Elsőként Óbarok adatsorát ($N = 14$) vizsgáljuk (3a. ábra). Ez a statisztikai minta szigorúan véve nem lenne vizsgálható Jelinek módszerével mert a $\lambda_1 = k_1$ és $\lambda_2 = k_2$ sajátvektorokhoz tartozó sajátirányok konfidenciaellipsziseinek nagyobbik nyílásszöge bőven meghaladja a 25 fokot. A 2.2. alfejezetben részletezett eljárást használva a sztereogramra vetítjük az $\alpha = 0,05$ szignifikanciaszint mellett elfogadott pszeudo-sajátvektorokat. Ábránk megmutatja, hogy az adatsorban meglévő szórás mellett mely irányokról lehet valószínűsíteni, hogy azok az adatsor eredő tenzorának sajátirányai. Az ábrán a pszeudo-sajátvektorok által megjelölt tartományok lényegében megfelelnek a Jelinek-féle módszer konfidenciatartományainak, azonban azokkal szemben egzaktaknak tekinthetőek. A vektorok eloszlása alapján a mérési eredmények eredője forgási anizotrop: a pszeudo-sajátvektorok két diszjunkt halmazt alkotnak: a minimális (sárgával jelölt) \mathbf{u}_3 irányban a halmaz kiterjedése kicsiny, a másik halmaz azonban jelentős kiterjedésű. A forgási anizotrópiát igazolja, hogy az \mathbf{u}_1 és \mathbf{u}_2 (az eredő tenzorból közvetlenül számított) sajátvektorok által kifeszített síkon körbe minden egységvektor a (15) próba H_0 hipotézisét adja eredményül. Ezen a síkon a pszeudo-sajátértékekre készített



3. ábra | Óbaroki mintacsoport. a) Jelinek statisztika; Anisosoft 4.2, b) Pszeudo-sajátvektorok és a szignifikánsan különböző sajátértékek
 Figure 3 | Specimens from Óbarok. a) Jelinek statistics; Anisosoft 4.2, b) Pseudoeigenvectors and significantly different eigenvalues

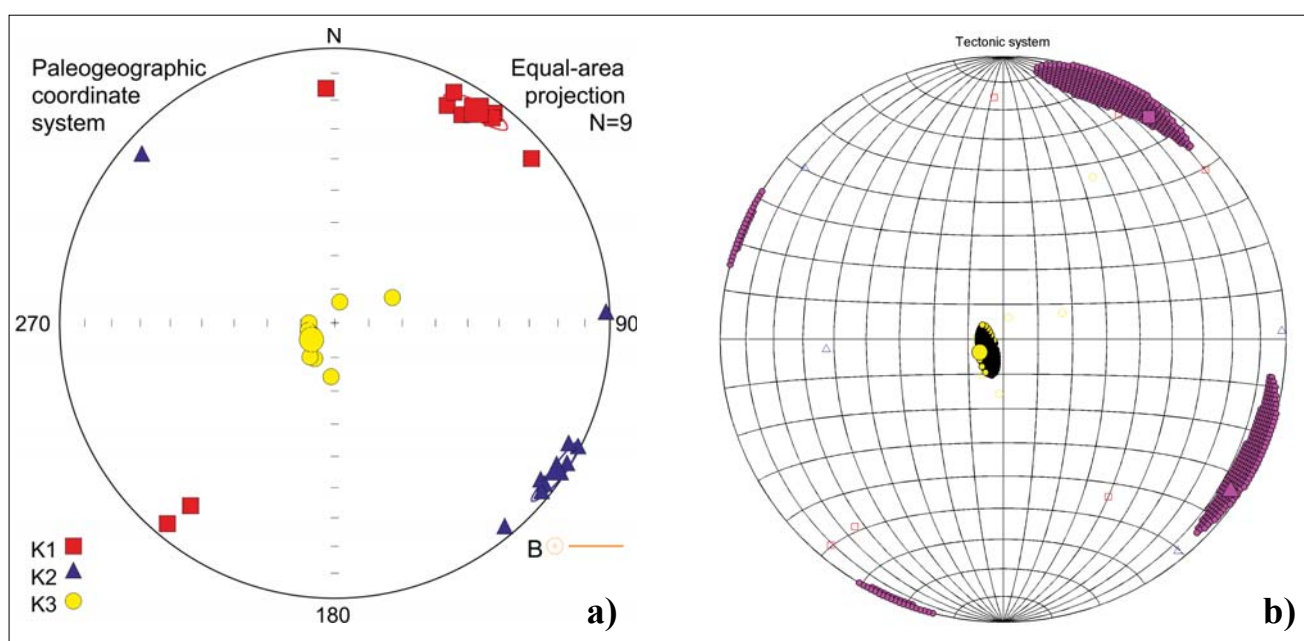


4. ábra | Solymári mintacsoport. a) Jelinek statisztika; Anisoft 4.2, b) Pszeudo-sajátvektorok és a szignifikánsan különböző sajátértékek
Figure 4 | Specimens from Solymár. a) Jelinek statistics; Anisoft 4.2, b) Pseudoeigenvectors and significantly different eigenvalues

(19) próba szignifikáns különbséget jelez, ezt az ábrán a piros (= maximális szuszceptibilitás iránya) és kék (= intermediér irány) színekkel különítjük el. Összefoglalva, a 2. táblázat szerint az óbaroki minta a 2C osztálynak felel meg (kismértékben anizotrop). Felmerül a kérdés, hogy akkor az adathalmaz rendelkezik-e irányultsággal? A minimális sajátvektor iránya teljesen egyértelmű. A sajátértékek szignifikáns különbsége miatt védhető, ha a sztereogramon az eredő tenzorhoz számított maximális és középső saját-

vektorokat is feltüntetjük. Azonban az eredmények értékelésénél érdemes figyelembe vennünk, hogy ez a megoldás „gyengébb” egy valóban anizotrop tenzorhoz képest. Ez éppen a 2. fejezetben említett, gyenge irányultságot okozó mechanizmusra utal.

Az óbaroki adatsorhoz hasonlóan tűnik a solymári adathalmaz ($N = 11$, 4. ábra), itt Jelinek módszerével számított konfidenciaellipszisek részben átfedik egymást. Az adatsor eredő tenzora mind a sajátvektorai,



5. ábra | Fenyőfői mintacsoport. a) Jelinek statisztika; Anisoft 4.2, b) Pszeudo-sajátvektorok és a szignifikánsan különböző sajátértékek
Figure 5 | Specimens from Fenyőfő. a) Jelinek statistics; Anisoft 4.2, b) Pseudoeigenvectors and significantly different eigenvalues

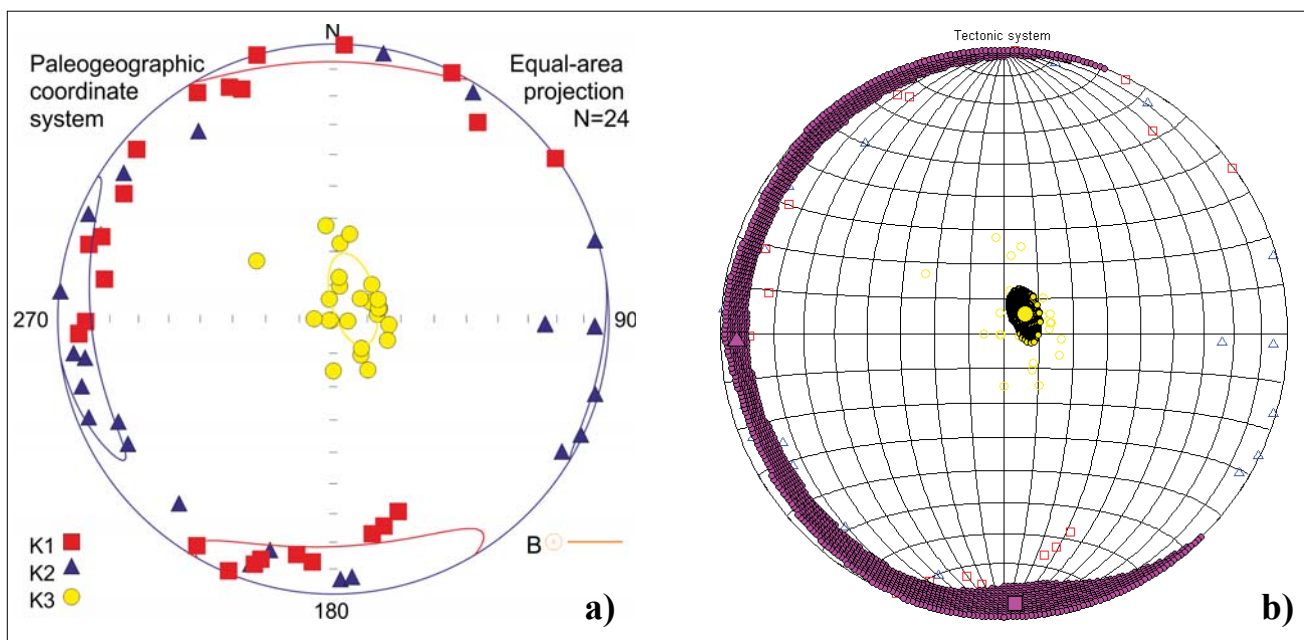
mind a sajátértékei alapján forgási anizotrop, a maximális és a középső irány a mintából nem különíthető el, (2B osztály a 2. táblázatban). Ilyen esetben az eredő tenzor maximális és középső sajátirányainak feltüntetése a sztereogramon kimondottan félrevezető: az adott mintához nem létezik plauzibilis érv arra, hogy miért pont a bejelölt irányokat tekintjük maximális és intermedier irányoknak.

Utolsó példánk Fenyőfő ($N = 9$, 5. ábra). Az eredő tenzor a Jelinek-féle eljárással anizotropnak tűnik, a konfidenciaellipszisek kiterjedése kicsiny, nincs okunk a módszer alkalmazhatóságában kételkedeni. Azonban kiszámítva az eredő tenzor sajátértékeiket azt találjuk, hogy $\lambda_1 = k_1$ és $\lambda_2 = k_2$ értéke meglehetősen közel esik egymáshoz. Ez felveti, hogy vajon a (3) egyenletben a sajátértékek különbsége, vagy a Δ -szórás a kisebb. Új módszerünk a sajátvektorok tekintetében megerősíti az anizotrópiát, a pseudo-sajátvektorok három diszjunkt halmazt eredményeznek, ráadásul mindegyik halmaz csak a sztereogram kis részét fedi. Azonban a sajátvektorokkal kapcsolatban az derült ki, hogy $\lambda_1 = k_1$ és $\lambda_2 = k_2$ nem különböztethető meg, ami az említett kis eltérés miatt nem is tűnik meglepőnek. Az eredményt úgy interpretálhatjuk, hogy a maximális és a középső sajátirány elhelyezkedését nem tudjuk eldönteni, ámbar lehetséges irányuk kis szögterületben helyezkedik el. A statisztikai minta alapján mindkét, lilával jelölt halmaz tartalmazhatja a maximális irányt. Ezen adatsor eredő tenzora a 2. táblázat szerinti 3B esetet képviseli (kismértékben anizotrop). Utolsó példánk rámutat arra, hogy pusztán a Jelinek-módszer konfidenciaellipszisei alapján, „ránézésre” vélelmezett anizotrópia téves is lehet, mert ez még nem garantálja a sajátértékek szignifikáns elkülönülését.

A bemutatott példákat különböző szignifikancia szinten is elemeztük. Vizsgálataink szerint a szignifikanciaszint változtatása a $0,01 < \alpha < 0,20$ tartományon a pseudo-sajátvektorok halmazát csak kis mértékben módosítja, a szignifikánsan különböző sajátértékek számára pedig nincs hatással. Ez különösen alkalmassá teszi módszerünket a kismértékben anizotrop tenzorok vizsgálatára.

3. Eltérő eredetű mérési eredmények különválasztása klaszter analízissel

A gyakorlatban a forgási anizotrópiát mutató (vagy ahhoz közel álló) mérési eredmények felvetik azt a kérdést, hogy vajon nem két vagy esetleg több fázis adatai kerültek-e kiértékelésre. Mint láttuk, N darab mérési eredményből a k_e eredő tenzor kötöttsége nélkül számítható. Az N darab mérési eredmény egy statisztikai mintába sorolása önkényesnek is mondható. A döntés mögött az a feltételezés húzódik meg, hogy az adott mintacsoport valamekkora zaj mellett ugyanazt a közetfizikai mennyiséget approximálja. E feltevés gyakran vitatható. Ebben a fejezetben a mintán belüli csoportok elkülönítésére egy, a klaszteranalízisből ismert módszert mutatunk be. A klaszteranalízis kiterjedt irodalmában szinte megszámlálhatatlan algoritmust publikáltak. Mi kizárólag felhasználni szeretnénk egy, a problémánknak megfelelő módszert. Munkánk során több eljárással is kísérleteztünk (pl: K-mean, Hierarchikus Klaszterek, Gaussian Mixture Modellek stb.), a *dbscan* algoritmus (Ester et al. 1996) kiemelkedően jó eredményeket szolgáltatott. Az eljárás az N elemű minta sűrűbb tartományait célozza különválasztani. Más, klaszteranalízishez használt eljárásokkal szemben nem szüksé-



6. ábra | Orondpusztai mintacsoport. a) Jelinek statisztika; Anisosoft 4.2, b) Pseudo-sajátvektorok és a szignifikánsan különböző sajátértékek
 Figure 6 | Specimens from Orondpuszta. a) Jelinek statistics; Anisosoft 4.2, b) Pseudoeigenvectors and significantly different eigenvalues

ges előre definiálni a szétválasztandó klaszterek számát. A (2) egyenlet alapján 6 darab független elem határozza meg a szuszceptibilitási tenzort, így egy mérési eredmény egyértelműen megfeleltethető egy $D = 6$ dimenziós tér egy pontjának. Az eljáráshoz elengedhetetlen a pontok közötti távolság definiálása, mi a munkánkban a legelterjedtebb, euklideszi távolságot vesszük alapul (azaz a vizsgálat tere \mathbb{R}^6). A normálás a pontthalmazt összehúzza, ezért a klaszter analízist a normálatlan adathalmazon érdemes végrehajtani.

A klaszteranalízisben használt eljárások jellemzően nagy, több ezer vagy akár több millió adatpontot tartalmazó minták elemzésére használatosak. Ezért is fontos kiemelni, hogy a klaszteranalízissel kapott eredményt csak egy ötletnek és nem végeredménynek tekintjük. Amennyiben az itt bemutatásra kerülő vagy más eljárással több klasztert azonosítunk a mérési eredmények halmazán, akkor azt érdemes statisztikai eljárással is megvizsgálni. Ilyen eljárást mutat be a 4. fejezet. Az ott bemutatandó módszerekkel a gyakorlott kutató saját, klaszterekre vonatkozó hipotéziseit is ellenőrizheti.

3.1. Példa

Az $N = 24$ elemű orondpusztai adatokat három földtani rétegből mintázták. A teljes minta együtt a 6. ábra szerinti sztereogramot eredményezi, a \mathbf{k}_e eredő tenzor forgási anizotrop, sem a sajátvektorok, sem a sajátértékek nem engednek anizotrópiára következtetni. Osztályozásunk szerint (2. táblázat) ezen adatsor eredő tenzora (\mathbf{k}_e) a 2B osztályba tartozik.

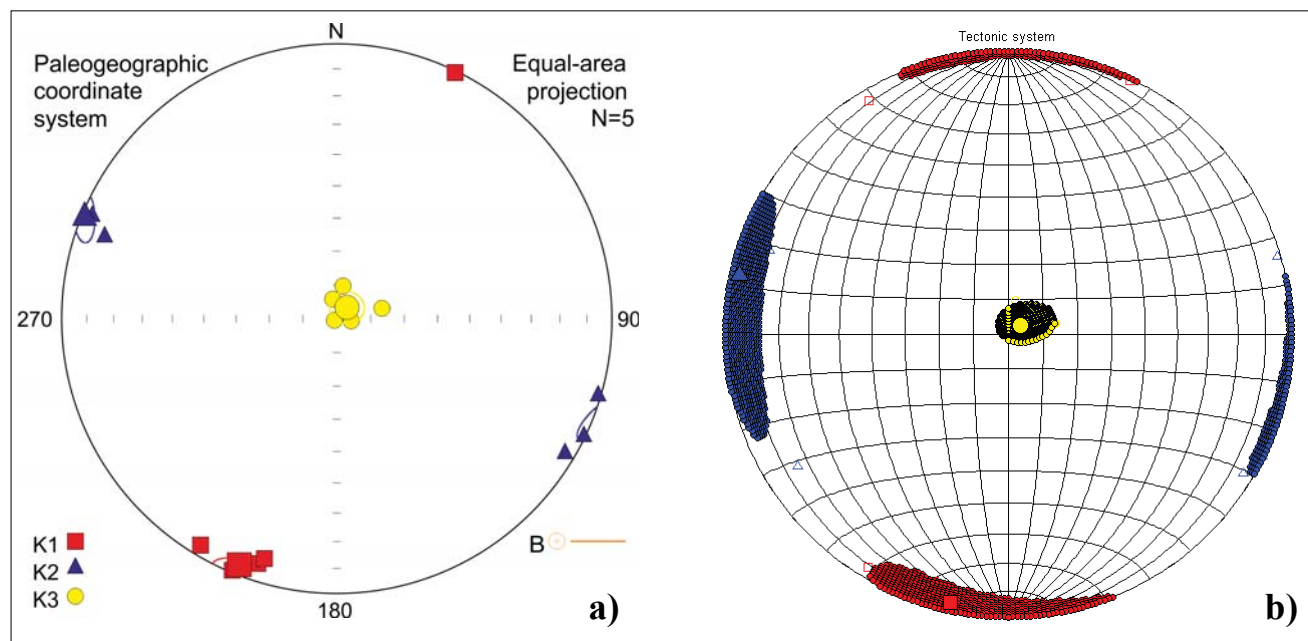
A normálatlan statisztikai minta klaszter analízise három csoportot különít el, ezek egy mérés kivételével (amely a kettes klaszter helyett az egyes klaszterbe kerül) megfelelnek a három földtani rétegnek, ahonnan a minták származnak. A 7. ábra mutatja a három csoport (külön-külön számított) eredő tenzorának peszeudo-sajátirányait (részletek a 2. fejezetben) és a szignifikánsan megkülönböztethető sajátértékeket.

4. Eredő tenzorok összehasonlítási lehetőségei

A 3. fejezet eljárása egyes mérési eredmények távolságán alapul, nem veszi figyelembe a mérési eredmények közötti szorosságot. Ezért a szétválasztás eredményét csak akkor fogadjuk el, ha statisztikai próbával is sikerül igazolni, hogy a megtalált klaszterek statisztikai alapon is különbözőek. Azonban az eljárás nem csak a klaszterek összehasonlítására használható. A paleomágneses vizsgálatok során gyakran az eredményül kapott szuszceptibilitási tenzort vagy annak egyes jellemzőit (elsősorban a sajátvektorok irányait) más, nem mágneses vizsgálatokból kapott eredményekkel is összehasonlítják. Jó példa erre a mágneses lineáció és a csapásirány vagy az AMS tenzor és a mikrotektonikai feszültségtenzor összehasonlítása.

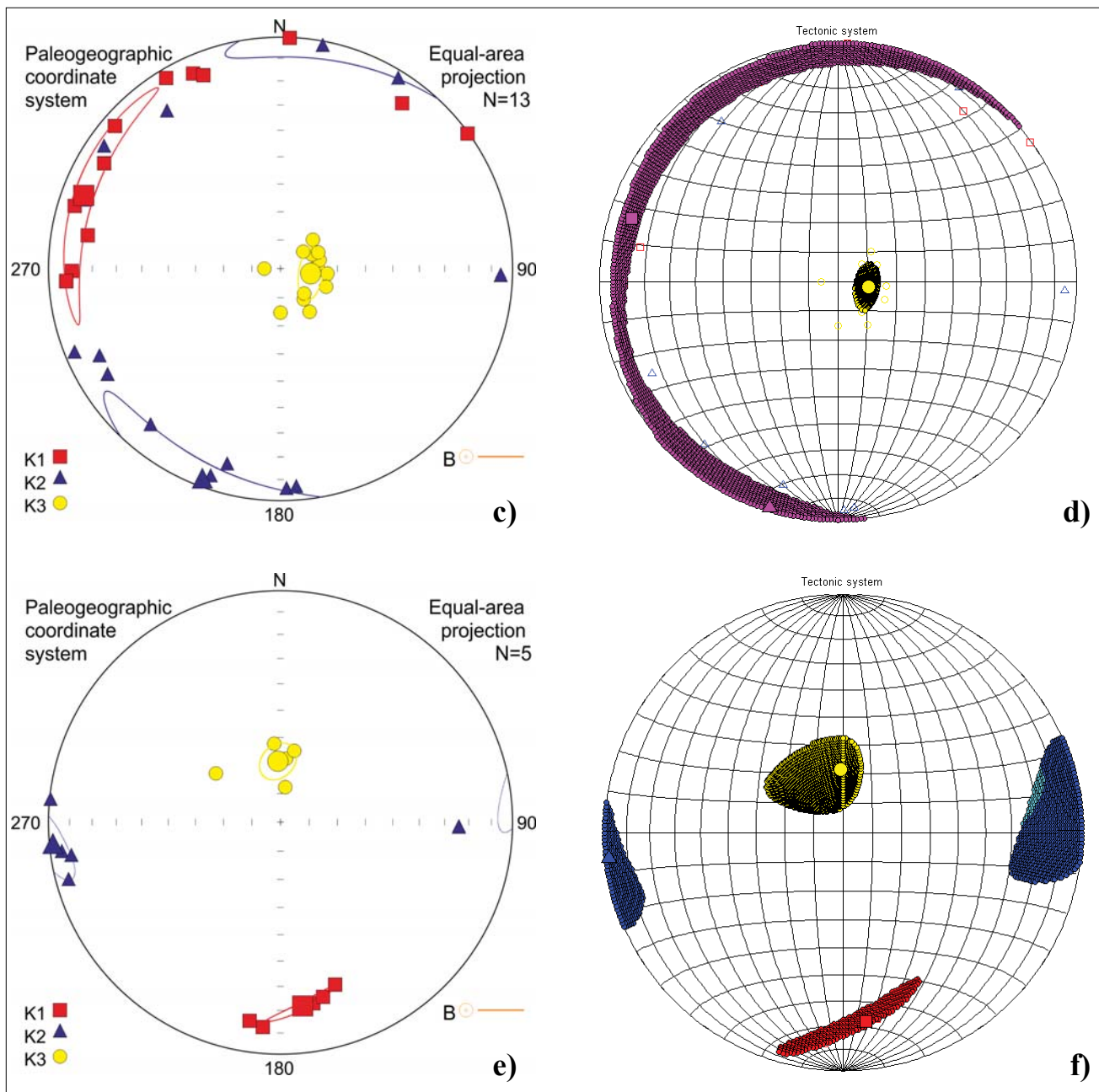
4.1. Tenzorok összehasonlítása közvetlenül az elemeik alapján

Tegyük fel, hogy a 2. fejezet szerinti \mathbf{k}_e tenzort és \mathbf{V} kovarianciamátrixát ismerjük. Adott egy 3×3 -as, szimmetrikus,



7. ábra | Az orondpusztai mintacsoport három klasztere megfelel a magminták forrásául szolgáló három földtani rétegnek. a) 1. klaszter: Jelinek statisztika, b) 1. klaszter

Figure 7 | The three clusters of the specimens from Orondpuszta fit well to the three geological layers where the specimen were taken from. a) Cluster 1: Jelinek statistics, (b) Cluster 1



7. ábra | Az orondpusztai mintacsoport három klasztere megfelel a magminták forrásául szolgáló három földtani rétegnek. c) 2. klaszter: Jelinek statisztika, d) 2. klaszter, e) 3. klaszter: Jelinek statisztika, f) 3. klaszter
Figure 7 | The three clusters of the specimens from Orondpuszta fit well to the three geological layers where the specimen were taken from
 c) Cluster 2: Jelinek statistics, d) Cluster 2, e) Cluster 3: Jelinek statistics, f) Cluster 3

valós elemű σ tenzor, egyenlőre ennek szórásától tekintünk el. Célunk olyan statisztikai próbák felállításása, amelyekkel a két tenzor azonosságát igazolni tudjuk. Mindezek előtt tisztáznunk kell, hogy pontosan mit értünk azonosság alatt. Már utaltunk rá, hogy a geofizikában a tenzorok sajátirányainak van kitüntetett szerepe, ezen túl a sajátértékből képzett arányok lehetnek még fontosak (pl. lineációs fok). A 2. fejezetben rámutattunk, hogy a sajátvektorok statisztikai elemzése nem triviális feladat. Tenzorok összehasonlításakor dönthetünk úgy, hogy a két tenzor ábrázolására szolgáló mátrixok azonosságát vizsgáljuk. Megmutat-

juk, hogy a tenzorok elemenkénti összehasonlítása még akkor is járható út, ha a sajátvektorok azonos állását szeretnénk igazolni. A mátrixok összehasonlításának nehézsége abban rejlik, hogy a k_e és a σ tenzor skalárinvariánsai (Itskov 2007, Roman 2005) akár jelentősen is eltérhetnek. (A tenzorok normálása kapcsán már érintettük ezt a problémát.) Olyan lineáris transzformációt keresünk, amely a tenzor sajátvektorainak irányát nem változtatja meg, azonban a mátrixelemekben a lehető legkisebb eltérést eredményezi. A választott transzformációt a σ tenzoron mutatjuk be:

$$\hat{\sigma} = t_1 \sigma + t_2 \mathbf{I}, \quad (23)$$

ahol \mathbf{I} az egységtenzor, t_1 és t_2 tetszőleges valós számok, $t_1 \neq 0$. Legyen a σ tenzor egy \mathbf{v}_i sajátvektorához tartozó sajátérték μ_i (összhangban a (8) összefüggéssel: $\sigma \mathbf{v}_i = \mu_i \mathbf{v}_i$)! Vizsgáljuk $\hat{\sigma}$ és \mathbf{v}_i szorzatát:

$$\hat{\sigma} \mathbf{v}_i = (t_1 \sigma + t_2 \mathbf{I}) \mathbf{v}_i = t_1 \mu_i \mathbf{v}_i + t_2 \mathbf{v}_i = (t_1 \mu_i + t_2) \mathbf{v}_i. \quad (24)$$

Tehát a transzformált tenzor megőrzi az eredeti σ tenzor sajátvektorait, i -edik sajátértéke pedig a $t_1 \mu_i + t_2$ értéket veszi fel. (Megjegyezzük, hogy a (23) transzformáció a szimmetrikus σ tenzorhoz a szimmetrikus $\hat{\sigma}$ -t rendeli hozzá.) Kérdés, hogyan vegyük fel a t_1 és t_2 szorzókat. Az egyik lehetőség, hogy \mathbf{k}_e és $\hat{\sigma}$ tenzor pontosan két skalárinvariánsát egyenlővé tesszük. Statisztikai szempontból azonban ez nem feltétlenül optimális. A \mathbf{k}_e és a $\hat{\sigma}$ tenzorok elemei között legkisebb eltérését akkor kapjuk, ha t_1 és t_2 számokat legkisebb négyzetek módszere szerint vesszük fel (Timm 2002).

A két összehasonlítandó tenzor egyezését vizsgálhatnánk elemenként, mind a 6 (normált esetben 5) paraméterre t -próbát illetve. Azonban ismeretes, hogy ez a megközelítés szorosabb összefüggést mutat, hiszen nem veszi figyelembe, hogy a 6 (normált esetben 5) paraméter egymástól nem független valószínűségi változó. Ezért a t -próba 2. fejezetben már bemutatott, többdimenziós változatát, a Hotelling-féle T^2 -eljárást használjuk. Nem normált vizsgálatnál \mathbf{k}_E és $\hat{\sigma}$ elemeiből képezzük a következő vektorokat:

$$\tilde{\mathbf{k}} = [k_{11}, k_{22}, k_{33}, k_{12}, k_{23}, k_{13}]^T, \quad (25)$$

$$\tilde{\sigma} = [\hat{\sigma}_{11}, \hat{\sigma}_{22}, \hat{\sigma}_{33}, \hat{\sigma}_{12}, \hat{\sigma}_{23}, \hat{\sigma}_{13}]^T, \quad (26)$$

normált esetben pedig

$$\tilde{\mathbf{k}} = [k_{22}, k_{33}, k_{12}, k_{23}, k_{13}]^T, \quad (27)$$

$$\tilde{\sigma} = [\hat{\sigma}_{22}, \hat{\sigma}_{33}, \hat{\sigma}_{12}, \hat{\sigma}_{23}, \hat{\sigma}_{13}]^T. \quad (28)$$

A statisztikai próbához a H_0 nullhipotézis és a H_1 alternatív hipotézis:

$$\begin{aligned} H_0 : \tilde{\sigma} &= \tilde{\mathbf{k}} \\ H_1 : \tilde{\sigma} &\neq \tilde{\mathbf{k}} \end{aligned} \quad (29)$$

A Hotelling-féle T^2 próbatasztiztikát és az α szignifikanciaszinten a T_0 küszöbértéket a következő összefüggések szolgáltatják:

$$T^2 = N(\tilde{\mathbf{k}} - \tilde{\sigma})^T \mathbf{V}(\tilde{\mathbf{k}} - \tilde{\sigma}), \quad (30)$$

$$T_0 = \frac{p(N-1)}{N-p} F_{1-\alpha, p, N-p}, \quad (31)$$

ahol $F_{1-\alpha, p, N-p}$ a p és $(N-p)$ paraméterű F -eloszlás, $p = 6$ normálás nélküli és $p = 5$ normált statisztikai mintára. Amennyiben $T^2 < T_0$, a H_0 hipotézis elutasítására nincs okunk, a két tenzor statisztikai értelemben azonos, az azonos szorosságát mérhetjük a

$$C = (T_0 - T^2) / T_0 \quad (32)$$

hányadossal. (Ezt természetesen a cikkünkben szereplő összes próba esetén megtehetjük.)

Tegyük fel, hogy σ elemei \mathbf{k}_e tenzorhoz hasonlóan normális eloszlású valószínűségi változók. Legyen σ egy M mérésből álló adathalmaz várható értéke, a tenzorelemek kapcsolatát jellemző variancia-kovariancia mátrixot jelölje Θ ! A (23) transzformáció lineáris, ezért $\hat{\sigma}$ elemei is normális eloszlást követnek, kovariancia mátrixuk $\hat{\Theta} = t_1^2 \Theta$. Tegyük fel, hogy $\hat{\Theta} \cong \mathbf{V}$ teljesül. A kétmintás T^2 -próba végrehajtásához a következő összefüggések adódnak:

$$\mathbf{W} = \frac{(N-1)\mathbf{V} + (M-1)\hat{\Theta}}{N+M-2}, \quad (33)$$

$$T^2 = \frac{NM}{N+M} (\tilde{\mathbf{k}} - \tilde{\sigma})^T \mathbf{W}^{-1} (\tilde{\mathbf{k}} - \tilde{\sigma}), \quad (34)$$

$$T_0 = \frac{p(N+M-2)}{N+M-p-1} F_{1-\alpha, p, N+M-p-1}. \quad (35)$$

Az ímént ismertett próbákat közvetlenül a tenzorok elemein hajtjuk végre, ezért a H_0 hipotézis teljesülése a közel eső sajátirányok mellett a tenzorok skalárinvariánsainak közelségét is valószínűsíti. Ennek nyomán egyes, a tenzornak megfeleltethető ellipszoid jellemzők is közeliek lesznek, mégha a főtengeleyarányok a (23) transzformáció következtében eltérőek is. Jó példa erre a szerkezetföldtani irodalomban (Angelier, 1990) használatos, az ellipszoid lapultságát mérő következő skalár:

$$\Phi = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (36)$$

amely a (23) transzformáció alatt invariáns. A (29) próba H_0 hipotézise a sajátirányok közelségén túl azt is valószínűsíti, hogy a Φ skalár \mathbf{k}_e és σ tenzorokra nem mutat szignifikáns eltérést.

4.2. Tenzorok összehasonlítása sajátvektoraik alapján

A geofizikai gyakorlat számára talán természetesebb lenne, ha közvetlenül a sajátirányok alapján lehetne elvégezni a statisztikai összehasonlítást. Esetenként ez nemcsak tenzorok összehasonlításakor jelentkezik, hanem például \mathbf{k}_e egyik vagy másik sajátvektorát szeretnénk egy más forrásból ismert \mathbf{v} vektorral összevetni (például a földrajzi helyen mért csapásirány és a szuszceptibilitási tenzor maximális, lineációs iránya közötti egyezést szeretnénk kimutatni). Ennek nehézsége, ahogy azt már korábban említettük abban áll, hogy a tenzorelemek mérési hibája ránézésre nem megjósolható módon befolyásolja a sajátvektorok pontosságát.

Akár a \mathbf{v} vektor, akár a σ tenzor sajátirányaival dolgozunk, kézenfekvő a 2. fejezet módszerét felhasználni. Az ismert \mathbf{v} vektorról a 2. fejezet (15) próbájával tudjuk eldönteni, hogy lehet-e a \mathbf{k}_e valamely sajátvektora. Értelemszerűen ez a vizsgálat akkor jelent értékelhető eredményt, ha a \mathbf{k}_e sajátvektorának bizonytalansága kicsi. Azaz a próba elvégzésén túl szükségesnek látszik a 2. fejezetben részletesen ismertett módon a sztereogramon feltüntetni az összes pszeudo-sajátvektort. Amennyiben \mathbf{v} környezetében csak kis szögeltérésekkel helyezkednek el pszeudo-sajátvektorok, akkor joggal mondhatjuk, hogy \mathbf{v} a megfelelő sajátvektorral statisztikai értelemben megegyezik.

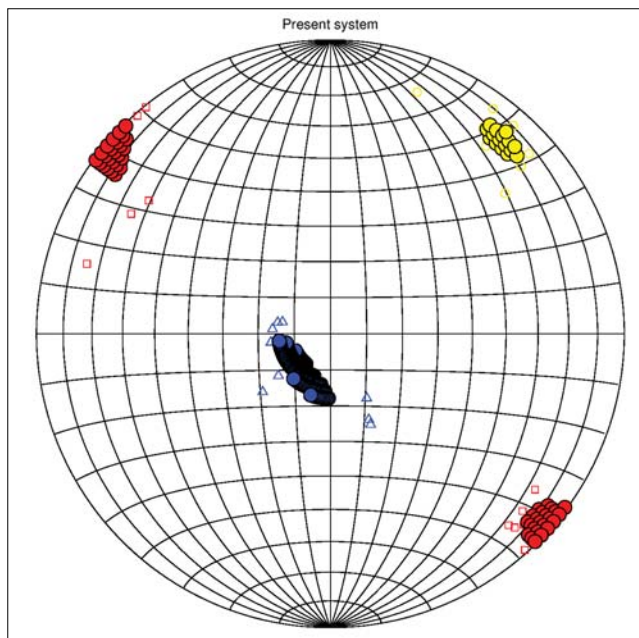
Tenzorok összehasonlításakor dönthetünk úgy, hogy σ sajátvektorait egyesével elemezzük. Ha egyik sajátvektor esetén sem tudjuk a (15) H_0 hipotézisét elvetni, akkor az α szignifikanciaszint mellett a két tenzor különbsége nem állapítható meg (legalább is a sajátvektor irányai alapján). Azonban ebben az esetben nem vettük figyelembe a (9) egyenletben definiált vektor elemei közötti kovarianciát. Ez a megközelítés azt a kritikát veti fel, hogy lényegében itt három, egymástól független vektorként tekintünk σ sajátvektoraira. Egzaktabb eljáráshoz elő kell állítani a σ tenzor minden egyes v_i sajátvektorához ($i = 1, 2, 3$) az A_i vektort és a 3×6 -os (normált esetben 3×5) B mátrixot (ld. a (11)–(13) egyenleteket). Legyen $A = [A_1^T A_2^T A_3^T]^T$ és

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Meg lehet mutatni, hogy v_i tulajdonságaiból (ortogonális egységvektorok) következik, hogy B rangja 3. A lineárisan függő sorokat törölve nyerjük az \hat{A} vektort és a \hat{B} mátrixot. A T^2 -próbával vizsgálandó vektor pedig $\hat{e} = \hat{A} + \hat{B}k_e$. Az \hat{e} vektor zérus voltát a (15) próbával analóg módon, $p = 3$ paraméteres vizsgálattal igazoljuk vagy vetjük el.

4.3. Példák

Egy vektor és a k_e tenzor egy sajátirányának összehasonlítását a csapásirány és a maximális szuszceptibilitás (lineáció) összevetésén mutatjuk be. Az $N = 15$ elemű minta Lengyelországból, Chmiel helység mellől származik. A minta



8. ábra | A Chmiel (Lengyelország) helyiségnél vett mintacsoport. A helyszínen mért csapásirány (310° – 130°) jól egyezik az anizotrópiatenzor maximális főirányával

Figure 8 | The specimens from Chmiel, Poland. The strike (310° – 130°) of the locality fits well to lineation of the anisotropy tensor

a 2. fejezet szerinti elemzéssel anizotrop (3C) osztály (*8. ábra*). A helyszíni mérési adatok szerint a vetősík ($220^\circ/80^\circ$)-as, ebből a csapásirány (310° – 130°)-nak adódik. A csapásirány vektora nagyon jó egyezést mutat az eredő tenzor lineációjával, a (32) egyenlet szerinti arányszám $C = 0,95!$

Ugyanezen minta esetén merült fel az a kérdés, hogy statisztikai alapon elkülöníthető-e az első $N_1 = 5$ mérés az utolsó $N_2 = 10$ méréstől, hiszen ezek ugyanazon mérési hely mélyebb rétegeiből származnak. A 3. fejezet szerinti eljárás szerint nem különíthető el két klaszter. Ennek ellenére vizsgáljuk meg a két részhalmaz eredő tenzorait! A 4.1. alfejezet szerinti összehasonlítás $C = 0,39$ -et eredményez, ami a két részhalmaz azonosságát mutatja. A sajátirányok összehasonlítása eltérő eredményre vezet: amíg az 5 elemes részhalmaz pseudo-sajátvektorai tartalmazzák a 10 elemes részhalmaz eredő tenzorának sajátvektorait, addig a fordított vizsgálatnál ez nem igazolható. Mivel a 4.2. alfejezet vizsgálatainál v és σ szórását nem vettük figyelembe, a próbák eltérő viselkedése nem meglepő. A két részhalmaz 2. fejezet szerinti ábrázolása minden kétséget eloszlat: amíg az 5 elemes részhalmaz kevés és nagy szórású adata miatt forgási anizotrópiát mutat, addig a 10 elemes részhalmaz anizotrop. Összességében a statisztikai elemzés alapján nem lehet kijelenteni, hogy a két részhalmaz elkülöníthető (ennek elsődleges oka az ötelemes részhalmaz kicsiny elemszáma).

Befejezésként a 3. fejezetben bemutatott, orondpusztai mérést elemezzük (*6. és 7. ábra*). A klaszterek száma $c = 3$. Az i -edik klaszter esetén megvizsgáljuk, hogy lehet-e azonos a j -edik klaszterrel ($i, j = 1, 2, \dots, c, i \neq j$). Ehhez a (33) összefüggésekkel adott próbát hajtjuk végre. (Mivel mindegyik klaszter adatait normalizáljuk, a (23) transzformáció alkalmazására nincs is szükség.) Minden esetben a próba H_1 hipotézisét kell elfogadnunk, azaz módszerünk valószínűsíti a három klaszter létét, a mérési eredmények különválasztását eljárásunk alátámasztja. A sajátvektorok 4.2. alfejezet szerinti vizsgálata ugyanerre az eredményre vezet, amit a *7. ábra* jobb oldalán szereplő sztereogramok vizuális összehasonlításával is könnyű belátni.

5. Összefoglalás

Cikkünkben közel izotrop, stocasztikus tenzorok sajátértékeinek és sajátvektorainak elemzésére szolgáló statisztikai módszereket ismertettünk. Rámutattunk arra, hogy amennyiben a tenzor ábrázolására használt mátrix elemei valószínűségi változók, akkor a sajátirányok elkülönülő halmazainak száma és a sajátértékek multiplicitása közötti kölcsönös összefüggés nem áll fenn. Ez drasztikusan eltér a determinisztikus tenzorok esetén megszokott képtől. A stocasztikus tenzorokra bevezetett új osztályozás ígéretes alkalmazási területe a harmadidőszaki üledékeken mért mágneses szuszceptibilitási minták eddigieknél finomabb és részletesebb elemzése.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Mártonné Szalay Emőnek (MFGI Paleomágneses Laboratórium), hogy felhívta figyelmemem a forgási anizotrópia problémájára és Sipos-Benkő Krisztínának, hogy segített a terepi eredmények kiértékelésében. A kutatást az OTKA 105245. témája támogatta.

A tanulmány szerzője

Sipos András Árpád

Hivatkozások

- Angelier J., 1990: Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress – III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophys. J. Int.* 103, 363–376
- Borradaile G., 2003: *Statistics of Earth Science Data*. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg
- Constable C., Tauxe L., 1990: The bootstrap for magnetic susceptibility tensors. *J. Geophys. Res.* 95, 8383–8395
- Ester M., Kriegel H. P., Sander J., Xu X., 1996: A density based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of 2nd International Conference of Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 226–231
- Fisher N. I., Lewis T., Embleton B. J. J., 1993: *Statistical analysis of spherical data*. Cambridge University Press

Appendix

A.1. 3×3 szimmetrikus tenzor kétszeres multiplicitású sajátértékkel

Tekintsünk a forgási anizotrop \mathbf{k} tenzort, ennek kétszeres multiplicitású sajátértékét jelölje $\lambda_{12} = \lambda_1 = \lambda_2$ (a hozzá tartozó sajátvektorok \mathbf{u}_1 és \mathbf{u}_2), az egyszeres multiplicitású sajátérték legyen λ_3 ! Tegyük fel, hogy \mathbf{k} a (23) transzformáció eredményeként állt elő. $t_1 = 1$ és $t_2 = \lambda_{12}$ helyettesítéssel kapjuk:

$$\mathbf{k} = \hat{\mathbf{k}} + \lambda_{12} \mathbf{I}. \quad (38)$$

Ekkor a $\hat{\mathbf{k}}$ tenzor sajátértékei: $\hat{\lambda}_{12} = \hat{\lambda}_1 = \hat{\lambda}_2 = 0$ (kétszeres multiplicitású) és $\hat{\lambda}_3 = \lambda_3 - \lambda_{12} \neq 0$. A (8) definíció és a (23) transzformáció tulajdonságai alapján teljesül, hogy

$$\hat{\mathbf{k}}\mathbf{u}_1 = \hat{\mathbf{k}}\mathbf{u}_2 = 0, \quad (39)$$

azaz a $\hat{\mathbf{k}}$ tenzor sorvektorai az \mathbf{u}_1 és \mathbf{u}_2 vektorok által kifesztített síkra merőlegesek (ami egyben azt jelenti, hogy \mathbf{u}_3 skalárszorosai). Így

$$\hat{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} \hat{k}_1 \\ p\hat{k}_1 \\ q\hat{k}_1 \end{bmatrix}, \quad (40)$$

ahol a $\hat{\mathbf{k}}_1$ vektor a tenzor első sora, p és q tetszőleges, nem zérus valós szám. Azonban a feltevéseink nyomán $\hat{\mathbf{k}}$ szim-

metrikus, így (40) alapján elemeire a következő összefüggéseknek kell fennállniuk:

Henry B., Le Goff M., 1995: Application de l'extension bivariate de la statistique Fisher aux données d'anisotropie de susceptibilité magnétique: intégration des incertitudes de mesure sur l'orientation des directions principales. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Iia* 320, 1037–1042

Hext G. R., 1963: The estimation of second-order tensors, with related tests and designs. *Biometrika* 50/3–4, 353–373

Itskov M., 2007: *Tensor algebra and tensor analysis for engineers. With applications to continuum mechanics*. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg

Jelinek V., 1978: Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geoph. et Geod.* 22, 50–62

Jelinek V., 1988: *The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and its application*. Geofizika, Brno

Roman S., 2005: *Advanced linear algebra*. 2nd ed., Springer

Sipos-Benkő K., Márton E., Fodor L., Pethe M., 2014: An integrated magnetic susceptibility anisotropy (AMS) and structural geological study on Cenozoic clay rich sediments from the Transdanubian Range. *Central European Geology* 57, közlésre elfogadva

Tauxe L., Kylstra N., Constable C., 1991: Bootstrap statistics for paleomagnetic data. *J. Geophys. Res.* 96, 11723–11740

Tauxe L., Constable C., Stokking L., Badgley C., 1990: Use of anisotropy to determine the origin of characteristic remanence in the Siwalik Red Beds of northern Pakistan. *J. Geophys. Res.* 95, 4391–4404

Timm N. H., 2002: *Applied multivariate analysis*. Springer

Wetfl F., 2011: *Lineáris algebra*. BME TTK

metrikus, így (40) alapján elemeire a következő összefüggéseknek kell fennállniuk:

$$\hat{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} \hat{k}_{11} & p\hat{k}_{11} & q\hat{k}_{11} \\ p\hat{k}_{11} & p^2\hat{k}_{11} & pq\hat{k}_{11} \\ q\hat{k}_{11} & pq\hat{k}_{11} & q^2\hat{k}_{11} \end{bmatrix}, \quad (41)$$

ahol \hat{k}_{11} a $\hat{\mathbf{k}}$ tenzor bal felső eleme. Így az eredeti forgási anizotrop \mathbf{k} tenzor elemei között a teljesülnie kell, hogy

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{k}_{11} + \lambda_{12} & p\hat{k}_{11} & q\hat{k}_{11} \\ p\hat{k}_{11} & p^2\hat{k}_{11} + \lambda_{12} & pq\hat{k}_{11} \\ q\hat{k}_{11} & pq\hat{k}_{11} & q^2\hat{k}_{11} + \lambda_{12} \end{bmatrix}. \quad (42)$$

Ismeretlenjeink: \hat{k}_{11} , λ_{12} , p és q . A $\hat{\mathbf{k}}$ tenzor k_{11} , k_{12} , k_{13} és k_{23} elemei az ismeretleneket egyértelműen meghatározzák ($p = k_{23}/k_{13}$, $q = k_{23}/k_{12}$, $\hat{k}_{11} = k_{12}/p$ és $\lambda_{12} = k_{11} - \hat{k}_{11}$). Ezek segítségével a következő nemlineáris összefüggések adódnak:

$$k_{22} = p^2\hat{k}_{11} + \lambda_{12} = k_{11} + \left(\frac{k_{23}}{k_{13}}\right)^2 k_{11} - \frac{k_{12}}{k_{23}} k_{13}, \quad (43)$$

$$k_{33} = q^2\hat{k}_{11} + \lambda_{12} = k_{11} + \left(\frac{k_{23}}{k_{12}}\right)^2 k_{11} - \frac{k_{12}}{k_{23}} k_{13}. \quad (44)$$

Az Északi-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése

KISZELY M., GYŐRI E.

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, 1112 Budapest, Meredek utca 18.
E-mail: kiszely.marta@csfk.mta.hu; gyori.erzsebet@csfk.mta.hu

A földrengéskutatásban rendkívül fontos a mesterséges szeizmikus események elkülönítése a tektonikai folyamatokból származóktól. Jelen dolgozat a Mátra második legmagasabb csúcán elhelyezett, piszkéstetői szeizmológiai állomáson (PSZ) detektált bányarobbantások és az Északi-középhegység és Szlovákia déli területén kipattant földrengések jellemző paramétereit elemzi. A PSZ állomás 8 bánya robbantásait regisztrálja rendszeresen, a terület szeizmikus aktivitása pedig a 2013. év elején jelentősen megemelkedett az $M_L4,8$ hevesi és az $M_L4,2$ érsekvadkerti rengések és az azokat követő számos utórengés miatt. A dolgozatban a szeizmikus események időbeli eloszlását, hullámforma- és spektrális tulajdonságait elemeztük.

Kiszely, M. Győri, E.: Comparative analysis of earthquakes and explosions occurred in the Northern Mountains, Hungary and the southern part of Slovakia

It is very important to separate the tectonic earthquakes from artificial seismic events in seismology. The present study analyzes the characteristics of earthquakes and blasts of quarries occurred in Northern Mountain, Hungary and Slovakia that were detected in the seismological station Piskéstető (PSZ). The PSZ station detects regularly the nearby microearthquakes and blasts originated from 8 different quarries. The natural seismic activity is significantly increased at the beginning of year 2013, when an $M_L4.8$ earthquake shocked the region of Heves, and $M_L4.2$ occurred at Érsekvadkert. These mainshocks were followed by many aftershocks. We analyzed the temporal distribution, the waveform and spectral properties of these seismic events.

Beérkezett: 2014. január 8.; *elfogadva:* 2014. március 1.

Bevezetés

Történelmileg a különböző atomcsendegyezmények ellenőrzése miatt építették ki az 1960-as években a Nemzetközi Standardizált Mérőállomás Hálózatot (Worldwide Standardized Seismograph Network, WWSSN), amelyet egységesített műszerekkel szereltek fel. Ekkor kezdődött a különböző elkülönítési módszerek kidolgozása, amelyek lehetővé tették a nukleáris robbantások kiszűrését a földrengések közül. Az atomrobbantások kivitelezési technikájának finomodása miatt – mivel szerették volna azokat eltitkolni – már egyre kisebb méretű szeizmikus jeleket kellett elemezni, ami a mérőállomások számának gyarapodását és azok érzékenységeinek növelését eredményezte. A nemzeti hálózatok kiépülésével pedig már nemcsak az atomrobbantások és a nagyobb földrengések, hanem a kisebb ipari és bányarob-

bantások is a földrengésektől származó jelek közé kerültek, azok kiszűrése is szükségessé vált.

Magyarország területén is bővült a jó minőségű állomások száma (jelenleg, 2013 novemberében 12 állomás működik az MTA CSFK GGI keretében), így a detektált események között egyre több az olyan mikrorengés, amely már belesik a bányarobbantások mérettartományába. Több olyan terület is van hazánkban, ahol robbantásos bányaművelés és természetes szeizmikus aktivitás egyszerre van jelen. Ezek pl. a Vértes területe, a Börzsöny és a Mátra környéke. A robbantások helyét és idejét azonban sokszor nem ismerjük, vagy a bányakapitányságoktól kapott információkhoz csak hetek múlva lehet hozzájutni. Ezért robbantások is bekerülhetnek a katalógusba földrengésként, ami téves tektonikai következtetéseket, a földrengés-veszélyeztettség téves megítélését vonhatja maga után.

Hazánkban is szükségessé vált a robbantások és a mikrorengések jellemzőinek elemzése, hogy a kapott eredmények segítséget nyújtsanak a továbbiakban a mesterséges szeizmikus események kiszűrésére. Ez nagyon fontos például Budapest szeizmikus kockázatának elemzésénél is.

Jelen dolgozatban az elemzésre kiválasztott terület a Mát-ra környéke volt, ugyanis a Mát-ra tágabb környezete állandó szeizmikus aktivitást mutat. 2013-ban az $M_L 4,8$ hevesi és az $M_L 4,2$ érsekivadkerti, kisebb károkat okozó rengések és azok számos utórengése miatt megemelkedett a katalógusba került szeizmikus események száma (Gráczer et al. 2012, 2013). A Piszkestetőn (a Mát-ra második legmagasabb csúcsán) működő (PSZ) szeizmológiai állomás rendszeresen detektálja – a távolabbi nagyobb rengések mellett – a környék mikrorengéseit, valamint a Mátrában és a Szlovákia déli részén működő kőbányák robbantásait.

Elemzésünk során az időpont-, hullámformaadatok és spektrumjellegzetességek alapján elemeztük a PSZ állomás által detektált bányarobbantásokat és közeli földrengéseket. Összesen 204 eseményt vizsgáltunk, amelynek a fele volt robbantás, fele földrengés. Azt vártuk, hogy az egy bányából származó robbantások szeizmogramjai hasonlóak lesznek, mivel a szeizmikus hullámok által átszelt út a forrás és állomás között ugyanaz, és sikerül az ugyanabból a bányából származó robbantásokat azonosítani. A spektrumok elemzésével pedig a bányarobbantások esetében alkalmazott késleltetett robbantási módszer kimutathatóságát kerestük.

A cikkben először a bányarobbantások leggyakrabban használt elkülönítési módszereit mutatjuk be, majd az elemzésben érintett bányákat ismertetjük. A felhasznált robbantások és földrengések paramétereit két táblázatban foglaljuk össze. Végül a listában közölt hazai robbantások és földrengések esetére kapott eredményeket ismertetjük

Az elkülönítés módszerei

A megfigyelések szerint az ugyanabban a bányában végzett robbantások szeizmogramjai nagyon hasonlítanak egymásra, illetve a robbantások szeizmogramjain felismerhetőek olyan ismertető jegyek, amelyek arról árulkodnak, hogy nem földrengésből származtak. Ilyen például az, hogy az S hullámok kevésbé dominálnak, R_g hullámok jelennek meg a regisztrátumon, az első beérkezés iránya pedig kompressziós. Ha egy szeizmikus esemény hasonlít valamely ismert bánya korábbi robbantásához, akkor ez is támpontot ad azonosítására. Az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) ezek alapján egy döntési protokollt állított fel a földrengések és a robbantások gyors kiszűrésére.

Javaslatuk 5 alappilléren nyugszik:

1. *Helyszín:* sok esetben köthető egy működő bányához egy ahhoz közeli esemény, főleg akkor, ha hasonló méretű események ott rendszeresen előfordulnak.
2. *Időpont:* a bányák általában hétköznap, hasonló napszakban, munkaórákban végeznek robbantásokat. A kerek óra időpont is árulkodó lehet.

3. *Hullámforma:* ugyanabban a bányában végzett robbantásoknak ugyanazon állomáson detektált hullámformái nagyon hasonlóak lesznek. Mivel egy robbantás felszíni esemény, jellemző az erős felszíni R_g hullám, és a robbantás izotróp jellege miatt nem alakul ki vagy nem túl erős az S nyíró hullám. A spektrumban pedig megjelenik a késleltetett robbantási technika nyoma.
4. *Hatás:* az eseményt nem jelzi „érezhetőnek” a lakosság, pedig a számított magnitúdó alapján olyan földrengés történt, amelyet a közeli településeken érezhettek volna, és jelteni szoktak, de nem tették.
5. *Bányák bejelentése:* sok esetben rendelkezésre áll a bányakapitányságoktól kapott független robbantási információ.

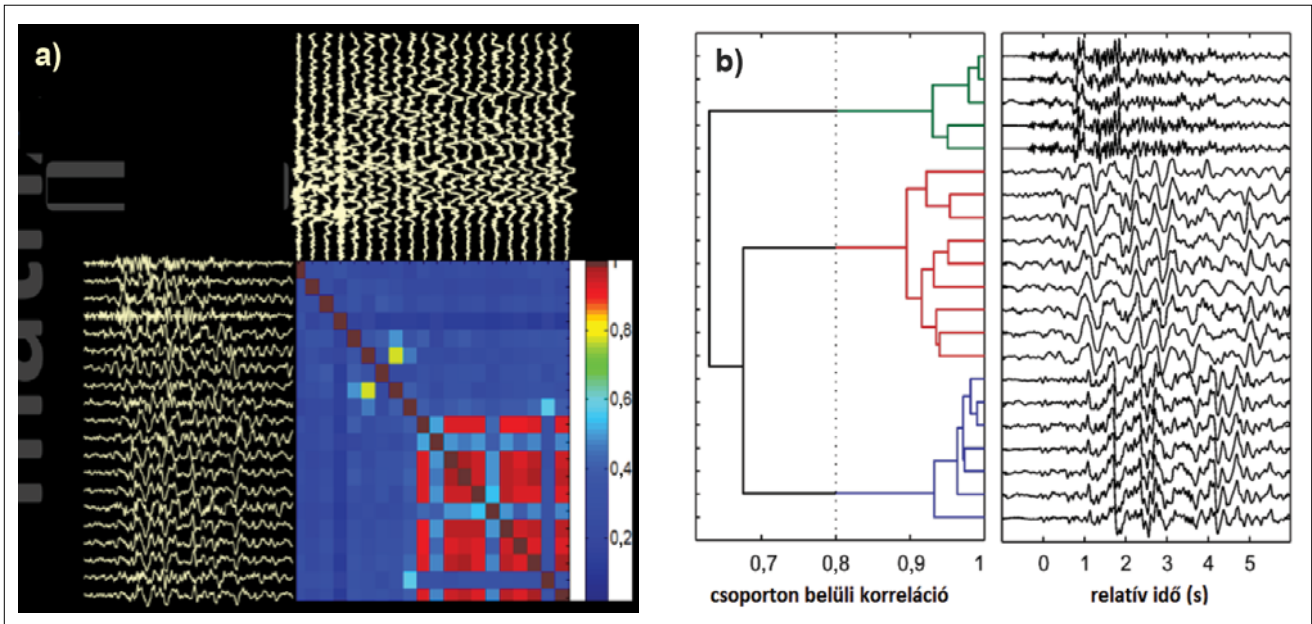
A lista alapján egy szeizmikus esemény besorolását leggyorsabban a helye alapján lehetne eldönteni. Ha az epicentrum egy működő bánya területére esett, akkor valószínűleg robbantás történt. Sok helyen azonban a bányaművelés tektonikailag aktív területre esik, ráadásul az epicentrum meghatározása akár 10 km-es hibával is terhelt, így nem egyértelmű a besorolás. A beérkezett jelek időpontja is kevés önmagában az esemény osztályozására, mert földrengések keletkezhetnek természetesen a bányaművelés aktív óráiban is.

Ugyanannak a bányának a robbantásai nagyon hasonló szeizmikus hullámokat keltenek. Általános megfigyelés az is, hogy egy nagyobb rengést követő utórengések is rengésrajokat, „klasztereket” alkotnak (Massa et al. 2006, Hage, Joswig 2009), ami egymáshoz nagyon hasonlító események csoportját jelenti (Aster, Scott 1993). Jellemzők még a páros események, „dublettek”, amelyek szinte teljesen egyformák, és gyakran másodperces vagy órás késéssel követik egymást. Baisch és munkatársai (2008) szintetikus szeizmogramok elemzésével bebizonyították, hogy a közel egyforma hullámformájú rengések hipocentrumai nagyon közel helyezkednek el egymáshoz képest, gyakorlatilag 100–200 m-re. Ezt a távolságot a szeizmogram jellemző hullámhosszának a negyedére becsülték, ez az ún. „ $\lambda/4$ ” kritérium. A hullámforma nagyfokú hasonlóságát a közeli epicentrumon kívül a nagyon hasonló fészekmechanizmus okozza (Deichmann, Garcia-Fernandez 1992).

Két hullámforma közötti hasonlóság a c_{xy} keresztkorrelációs együtthatóval jellemezhető:

$$c_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N W_x(t_i)W_y(t_i + \tau_{xy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N W_x(t_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N W_y(t_i + \tau_{xy})^2}},$$

ahol W_x és W_y a két szeizmogram elemei az idő függvényében, maximum N mintával eltolva, τ_{xy} a maximális c_{xy} értékéhez tartozó eltolási idő. A kritikus c_{xy} korrelációs együttható értékét – amely fölött hasonlóknak tekintenek két hullámformát – általában 0,6–0,95 között szokták megadni. Az alsó érték egy gyenge, 1-hez közeli erős hasonlóságot jelent.



1. ábra | A hullámforma-korreláció elemzése eredményének kétféle grafikus megjelenítése: a) kereszt-korrelációs mátrix és b) a dendrogram
Figure 1 | Two graphical representations of the results of waveform correlation analysis: a) the cross-correlation matrix and b) the dendrogram

Közeli kis eseményeknél az N mintaelemek száma a beérkező hullám időtartamának (általában 6–30 s) és a mintavételi időnek a függvénye.

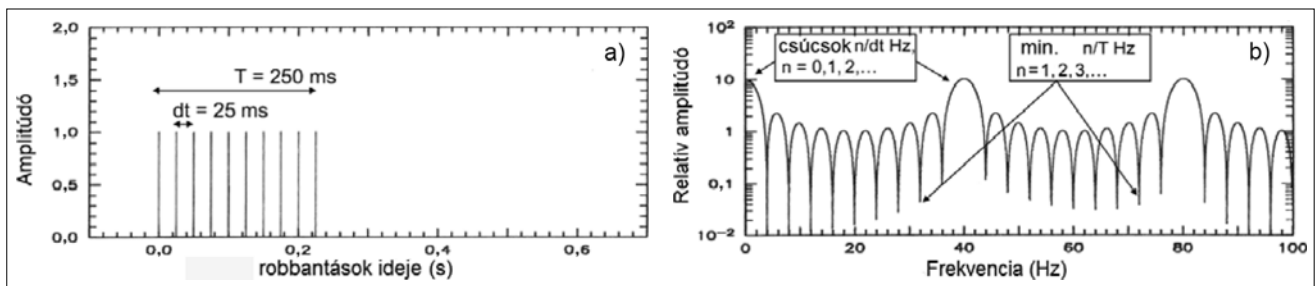
Ha sok esemény egymáshoz képesti hasonlóságát vizsgáljuk, az eredmény egy kereszt-korrelációs mátrix (1a. ábra), ahol a főtlóban azok a kereszt-korrelációs együtthatók láthatók, amikor önmagával hasonlítottuk össze az eseményt, így értékük 1.

Az események közötti hasonlóság mint „távolság” alapján a hullámformák rokonsági ágakba, csoportokba rendezhetők, ezt *dendrogramnak* nevezünk (1b. ábra). A csoportokba rendezett események száma és a csoportok összetétele változik a kritikus korrelációs együttható értékének változtatásával. Pechmann és Kanamori (1982) kimutatták, hogy vannak „erős párok”, amelyeknek a forrásai szinte egybeesnek, és „gyenge párok”, ahol bár a fészekmechanizmus nagyon hasonló, távolabb esnek a fészkek egymástól. Ekkor a szeizmogramok főleg a nagyfrekvenciás tartományban különböznek. Ha két esemény hullámformája eltér, az nem-

csak azzal magyarázható, hogy epicentrumaik távol vannak egymástól, hanem azok eltérő fészekmechanizmusával is.

A hazai kőbányák a késleltetett robbantási módszert (*ripple-firing*) alkalmazzák, amelynél négyzetláncos szerkezetben, néhány milliszekundumos időkülönbséggel (*delay*) egymás után robbantják fel a felszín alatt 1-2 m-re lefűrt tölteteket. Az ilyen technikájú robbantások forrás-idő függvénye az egyedi robbantások lineáris szuperpozíciója lesz. Az egyes robbantások keltette hullámok között konstruktív, illetve destruktív interferencia alakul ki, így a spektrumban bizonyos frekvenciákon megnő, másokon lecsökken az energia, a spektrum „csipkézett” lesz.

A spektrummoduláció matematikai hátterét Gitterman és munkatársai (1993) vezették le. A spektrum szerkezetét három fő paraméter határozza meg: az egy sorban elhelyezett töltetek közötti és a sorok közötti késleltetési idők, valamint az összes töltet felrobbantásának teljes időtartama (2a. ábra). A robbantások spektrumának vizsgálata így lehetőséget ad a földrengésektől való elkülönítésükre.



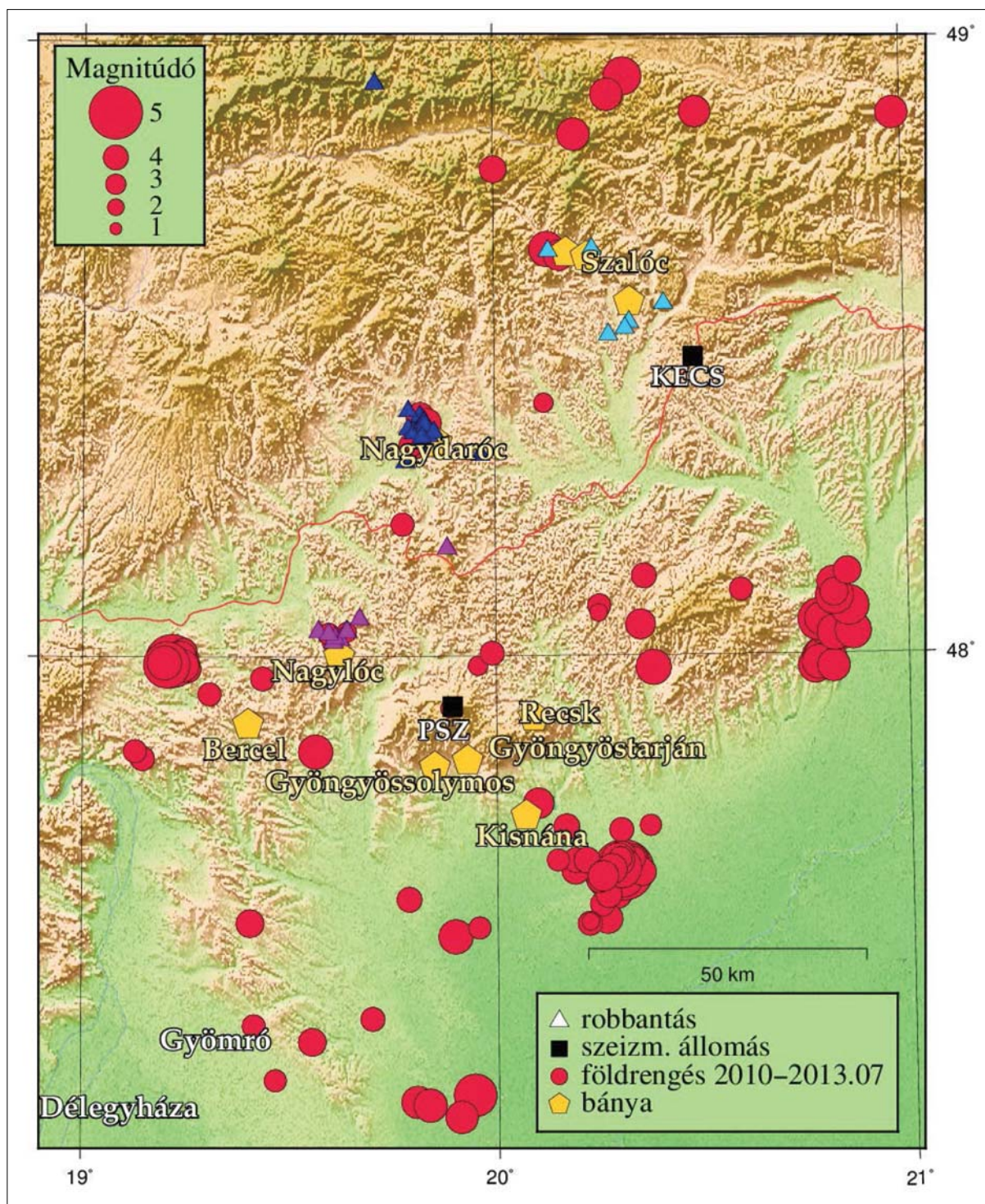
2. ábra | A csipkézett spektrum keletkezése egysoros késleltetett robbantás esetén: a) töltetek felrobbantásának teljes időtartama és a késleltetési idők, b) a spektrumcsúcsok és -minimumok (Chapman et al. 1992 nyomán)

Figure 2 | The origin of spectral scalloping in case of single row explosions: a) the full time of charges and the delay time, b) the spectral minima and maxima (Chapman et al. 1992)

A spektrumok elemzése a késleltetett robbantási technika nyomának a kimutatását célozta.

A *bináris spektrum* révén a megemelt energiájú sávok időbeli függetlenségét elemezhetjük. A cél az időtől független spektrummodulációk felerősítése és a véletlenszerű összetevők kiejtése. Földrengésekre ez az időtől független moduláció nem jellemző. A módszert szeizmológiai célra

Hedlin és munkatársai (1989) fejlesztették ki. Carr és Garbin (1998) az 1990 és 1992 között az Egyesült Államok Wyoming területén történt földrengések és késleltetett robbantások bináris spektrumát elemezte. Az állomások mintavételi ideje lehetővé tette (100 Hz), hogy 50 Hz-ig kövessék a spektrumokat. A robbantások 50%-ában sikerült a spektrumban a sávokat kimutatni, 22%-ban kialakultak sávok, de



3. ábra | A 2010–2013.07 között regisztrált földrengések és bányarobbantások epicentrumai, és az érintett bányák elhelyezkedése
Figure 3 | The epicenter map of earthquakes registered between 2010–2013.07 and the quarry blasts and the location of affected mines

azok nem voltak stabilak, míg a többi esetben nem vezetett sikerre a módszer.

A földrengések és a robbantások fészekmechanizmusukban is különböznek egymástól.

A robbantások izotrop hullámforrásoknak tekinthetők, amikor minden irányban szinte azonos erősségű kompressziós, azaz nyomáshullámok indulnak el. A tektonikus eredetű földrengések esetében viszont főként nyírási deformációk jönnek létre, a felszabaduló energia nagyobb része S hullámok formájában terjed tovább. A detektált hullámok amplitúdója pedig függ a törési sík és az azon történő elmozdulás irányától. Ez a magyarázata annak, hogy a P/S amplitúdóarány nagyobb lesz robbantások esetén. Így ez egy általánosan használt paraméter a földrengések és robbantások elkülönítésére (pl. Kim et al. 1998, Koch, Fäch 2002).

Az P/S amplitúdóarány értéke területenként változhat, függ a vizsgált frekvenciasávtól, a felhasznált fázisoktól (P_g, P_n, S_g, S_n, L_g) és a terjedési úttól. Bizonyos körülmények között azonban a P/S amplitúdóarány robbantások esetében kisebb is lehet a földrengésekénél. Az arányok számítására az 1980-as években még csak az 1 Hz körüli, szűk sávú hullámformaadatokat használták fel. Baumgardt és Young (1990), valamint Kim és munkatársai (1993) nagyobb, 5 Hz-ig terjedő frekvenciákra is kiterjesztették számításukat. Tapasztalataik szerint ebben a sávban jobb elkülönülést kaptak, mint alacsonyabb frekvenciák esetében.

Robbantásokra és a sekély fészekmélységű földrengésekre jellemző az R_g hullám kialakulása. Ez egy felületi hullámtípus, amely a térhullámokkal ellentétben éles beérkezés nélküli, hosszan kiterjedő hullámvonulatot alkot. Az R_g rövid periódusú Rayleigh-hullámokból áll, spektruma általában 0,66–2 Hz között maximális. Jelölésében a „g” a kéreg gránitos részére utal, ahol terjedése történik. Átlagsebessége kb. 3 km/s, és a 100–200 km-nél közelebbi szeizmogramok domináns fázisa lehet.

A dolgozatban az események időbeli eloszlásán, a hullámformák hasonlóságán és a spektrumok jellegzetességén alapuló elkülönítési módszerek alkalmazhatóságát vizsgáljuk.

A vizsgált bányarobbantások

A PSZ szeizmológiai állomás 8 magyarországi és dél-szlovákiai kőbányarobbantásait detektálja rendszeresen. Elhelyezkedésük a 3. ábrán látható.

Ezek sorrendben:

1. Berceli Nógrádkövesd andezitbánya
2. Gyöngyössolymosi Cserkő andezitbánya
3. Gyöngyöstarjáni Füledugó andezitbánya
4. Kislánai andezitbánya
5. Nagylóci Zsunyi-hegy andezitbánya
6. Recski Csákánykő andezitbánya
7. Szlovákiai nagydaróci bánya
8. Szlovákiai szalóci bányák

A bányák robbantásait, illetve hogy mely bányák érintettek, több hónapos munka révén sikerült kideríteni. A robbantási időpontokat a budapesti és miskolci bányakapitányságok segítségével sikerült megkapnunk. A kapitányságok általában napra pontosan, néhány bánya esetében óra/perc pontossággal őrzik az időpontokat. Néhány bánya esetében – ahol ritkábban robbantanak – igyekeztünk évekre visszamenőleg megtudni a robbantási időpontokat, hogy minél több eseményt sikerüljön egy-egy adott bányához kapcsolni.

A bányák és az elemzésbe bevont robbantások adatait, a koordinátákat, a bányáknak a PSZ állomástól való távolságát az 1. táblázat tartalmazza. A B jel a sorszám előtt az angol 'blast', robbantás szóra utal. A táblázatban csak abban az esetben adtuk meg a hipocentrumot, ha sikerült azokat a fázisok beérkezési időiből meghatározni. A többi esetben kizárólag a bányakapitányság listája alapján történt a besorolás. A robbantások mérete (lokális magnitúdó) M_L 0,6–2,4 közötti tartományra terjedt ki, fészekmélységük 30 esetben 0 km-nek, 6 esetben 10 km-nek, illetve egyszer 20 km-nek adódott.

A robbantások során felhasznált robbanóanyag tömege 1–5 tonna között változott.

A gyöngyössolymosi, gyöngyöstarjáni, kislánai és berceli bánya robbantásait csak a PSZ állomás regisztrálta, így nem lehetett az epicentrumot meghatározni, mivel ahhoz legalább 3 állomás beérkezési időpontjaira lett volna szükség. Tisztázva eredetüket, az összehasonlító elemzésbe viszont be tudtuk vonni őket. A gyöngyöstarjáni robbantások közül a B17 kiemelten szerepel az 1. táblázatban, mivel korábban – a földrengésekhez hasonló jellege miatt – földrengésként szerepelt a katalógusban. Később a bánya robbantási listája alapján a robbantásokhoz került.

A Szlovákia területén működő nagydaróci és szalóci bányák esetében az ottani jelentések robbantásnak jelölték az 1. táblázatban felsorolt eseményeket. Mivel több állomás is detektálta ezeket, helyüket a beérkezett fázisok ideje alapján számítottuk. Ahogy ez a 3. ábrán is látható, a kapott koordináták nem egyeztek meg pontosan a bányákéval, de kisebb-nagyobb szórással azok környezetére estek.

A 2011 végén bezárt nagylóci bánya közelébe eső 9 esemény közül 4-et igazolt vissza a bányát működtető társaság, de jelezték, hogy nem teljes és pontos a listájuk. A többi 5 esemény eredete kérdéses. Lehet, hogy robbantások voltak ezek is, amelyek kimaradtak a bánya listájából, az analízis során ennek az eldöntése is célunk volt.

A recski bánya robbantásainak detektálására csak 2013 során derült fény. Ekkor több robbantásos jellegű eseményt is regisztráltunk a PSZ állomáson, amelyek nem szerepeltek a már felsorolt bányák listáján. Ezek között egy rendkívül nagy is volt, amit visszaigazolt a recski bánya robbantómestere. A B96 sorszámú esemény korábban is robbantásként szerepelt a katalógusban, de nem sikerült egyik bányához sem kötni azt. A B98 esemény pedig tévesen földrengésként szerepelt a havi jelentésben. 2013-ban a recski robbantómester listája révén sikerült azokat beazonosítani.

1. táblázat | A bányarobbantások adatai. Ahol hiányoznak a hipocentrum koordináták, ott csak a Bányakapitányság jelentése alapján történt a besorolás

Bányák	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Megjegyzés
Gyöngyössolymos $\varphi = 47,836^\circ$; $\lambda = 19,934^\circ$ 10 km-re PSZ-től	B1	2012.05.10	06:10:00			–	–	
	B2	2012.07.02	07:02:00			–	–	
	B3	2012.08.14	07:56:00			–	–	
	B4	2012.09.06	07:00:00			–	–	
	B5	2012.11.29	08:30:00			–	–	
	B6	2013.04.08	08:00:00			–	–	
	B7	2013.05.16	07:35:00			–	–	
	B8	2013.06.17	06:20:00			–	–	
	B9	2013.06.21	07:30:00			–	–	
	B10	2013.06.28	08:00:00			–	–	
	B11	2013.07.01	07:20:00			–	–	
	B12	2013.07.09	06:40:00			–	–	
Gyöngyöstarján $\varphi = 47,822^\circ$; $\lambda = 19,857^\circ$ 11 km-re PSZ-től	B13	2007.01.20	12:04:00			–	–	
	B14	2007.06.20	10:22:00			–	–	
	B15	2007.10.18	10:26:00			–	–	
	B16	2007.10.20	11:57:00			–	–	
	B17	2008.04.01	10:09:41	47,94	19,80	20	1,5	Mátraverebély
	B18	2011.04.14	08:56:00			–	–	
	B19	2012.06.04	09:49:00			–	–	
	B20	2012.06.08	10:36:00			–	–	
	B21	2013.02.28	11:37:00			–	–	
Kisnána $\varphi = 47,741^\circ$; $\lambda = 20,070^\circ$ 20 km-re PSZ-től	B22	2007.10.20	10:16:00			–	–	
	B23	2011.05.18	14:49:00			–	–	
	B24	2011.05.30	10:25:00			–	–	
	B25	2011.06.15	12:18:00			–	–	
	B26	2011.07.23	10:21:00			–	–	
	B27	2011.08.11	11:50:00			–	–	
	B28	2011.08.19	09:43:00			–	–	
	B29	2011.08.26	09:30:00			–	–	
	B30	2011.09.01	12:15:00			–	–	
	B31	2011.10.20	11:30:00			–	–	
	B32	2011.11.25	10:44:00			–	–	
	B33	2012.02.27	15:02:00			–	–	
	B34	2012.05.10	12:03:00			–	–	
	B35	2012.05.17	12:44:00			–	–	
	B36	2012.05.25	10:15:00			–	–	
	B37	2012.06.11	12:34:00			–	–	
	B38	2012.06.21	12:14:00			–	–	
B39	2012.07.12	10:05:00			–	–		
B40	2012.07.17	09:32:00			–	–		
B41	2012.07.30	10:38:00			–	–		
B42	2013.02.25	15:40:00			–	–		
B43	2013.03.13	09:40:00			–	–		

1. táblázat | (folyt.)

Bányák	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Megjegyzés
Kisnána $\varphi = 47,741^\circ; \lambda = 20,070^\circ$ 20 km-re PSZ-től	B44	2013.03.26	13:37:00			–	–	
	B45	2013.04.10	11:21:00			–	–	
	B46	2013.05.14	13:30:00			–	–	
	B47	2013.05.27	14:37:00			–	–	
	B48	2013.06.05	11:55:00			–	–	
	B49	2013.06.13	08:00:00			–	–	
	B50	2013.06.22	10:20:00			–	–	
Bercel $\varphi = 47,893^\circ; \lambda = 19,406^\circ$ 37 km-re PSZ-től	B51	2012.05.17	10:35:00			–	–	
	B52	2012.05.24	09:30:00			–	–	
	B53	2012.06.29	09:15:00			–	–	
	B54	2012.07.16	09:36:00			–	–	
	B55	2012.08.02	10:23:00			–	–	
	B56	2012.09.20	11:00:00			–	–	
	B57	2013.06.05	10:20:00			–	–	
	B58	2013.07.15	10:18:00			–	–	
Nagydaróc $\varphi=48,346^\circ; \lambda=19,858^\circ$ 49km-re PSZ-től	B59	2010.04.19	10:36:22	48,37	19,83	0	2,0	
	B60	2010.04.30	12:43:07	48,32	19,78	0	1,7	
	B61	2010.07.02	08:10:24	48,33	19,97	0	1,4	
	B62	2010.08.31	09:15:00	48,36	19,81	0	1,8	
	B63	2010.10.04	09:37:59	48,37	19,79	0	1,9	
	B64	2010.11.15	09:38:48	48,36	19,80	0	1,7	
	B65	2011.03.03	08:49:15	48,39	19,82	7	1,7	
	B66	2011.03.17	10:50:27	48,38	19,82	0	1,8	
	B67	2011.05.20	13:22:23	48,35	19,82	0	2	
	B68	2011.06.03	07:48:31	48,36	19,84	0	1,5	
	B69	2011.06.16	08:32:26	48,38	19,82	0	2,0	
	B70	2011.06.21	07:51:48	48,40	19,80	0	1,1	
	B71	2011.07.06	09:38:28	48,93	20,71	7	1,9	
	B72	2011.08.03	07:58:45	48,38	19,83	0	1,9	
	B73	2011.10.12	08:48:43	48,37	19,83	0	2,2	
	B74	2011.12.09	12:48:11	48,36	19,85	0	2,3	
	B75	2012.02.01	10:00:49	48,36	19,82	0	2,0	
	B76	2012.07.13	08:17:00	48,34	19,85	–	–	
	B77	2012.10.11	07:55:00	–	–	–	–	
B78	2013.06.03	12:30:33	48,375	19,83	0,0	1,8	Nagydaróc reng	
B79	2013.06.22	10:09:00	–	–	–	–		
Szalóc $\varphi=48,573^\circ; \lambda=20,331^\circ$ 83km-re PSZ-től	B80	2010.11.05	10:05:03	48,52	20,28	0	1,6	
	B81	2011.04.14	10:41:26	48,54	20,33	0	1,7	
	B82	2011.08.04	08:52:52	48,57	20,42	0	1,5	
	B83	2012.02.11	12:29:15	48,66	20,13	1	2,4	
	B84	2012.05.18	12:20:32	48,53	20,32	0	1,6	
	B85	2012.06.30	09:57:30	48,659	20,24	0	1,5	
	B86	2013.06.03	09:00:30	48,620	20,56	0	1,5	zajos

1. táblázat | (folyt.)

Bányák	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Megjegyzés
Nagylóc környéki események $\varphi = 48,005^\circ$; $\lambda = 19,627^\circ$ 22 km-re PSZ-től	B87	2011.02.14	10:28:38	48,03	19,62	0	1,1	Nagylóc robb.
	B88	2011.03.05	14:31:44	48,02	19,60	10	1,1	Nagylóc
	B89	2011.03.21	10:27:28	48,03	19,61	0	0,9	Nagylóc
	B90	2011.04.22	17:07:35	48,06	19,67	0	1,7	Sóshartyán
	B91	2011.06.09	08:53:29	48,04	19,57	0	0,6	Nagylóc
	B92	2011.09.26	11:30:13	48,04	19,64	0	1,9	Sóshartyán robb.
	B93	2011.12.04	09:19:33	48,18	19,88	0	1,2	Salgóháza robb.
	B94	2011.12.28	09:20:30	48,04	19,60	10	1,0	Nagylóc robb.
	B95	2011.12.29	09:07:06	48,04	19,64	8	0,9	Sóshartyán
	Recsk $\varphi = 47,90^\circ$; $\lambda = 20,09^\circ$ 15 km-re PSZ-től	B96	2011.11.25	12:18:10	47,980	19,91	0,0	1,1
B97		2013.05.27	08:00:00	–	–	–	–	szónikus jel
B98		2013.06.06	10:21:15	47,986	19,99	0,0	1,6	Mátraballa
B99		2013.07.12	05:40:00	–	–	–	–	
B100		2013.07.18	06:00:00	–	–	–	–	

A vizsgált földrengések

Az elemzést a 3. ábrán látható területen 2010.01.01 és 2013.07.31 között kipattant és epicentrumadattal rendelkező összes földrengéssel végeztük (Gráczter et al. 2012, 2013, Tóth et al. 2011, 2012, 2013). Összesen 104 földrengés került a listára, melyek paramétereit a 2. táblázatban közöljük. A sorszám előtti EQ jel az angol 'earthquake', földrengés szóra utal. A rengések távolsága a PSZ állomástól 7 és 117 km között, méretük pedig M_L 0,7–4,8 között változott. A robbantások előző fejezetben megadott M_L 0,6–2,4 mérettartományába több mint 80 földrengés esett. Közülük

9 érezhető volt, és ezekből 3 kisebb károkat okozott az epicentrum közvetlen közelében. EMS skála (European Macroseismic Scale) szerinti besorolásuk a 2. táblázatban, a helységnevé mellett látható. Néhány, a földrengések között felsorolt esemény esetén (EQ97, EQ101-102) hiányoznak az epicentrumadatok, mivel ezeket kevés állomás detektálta. Hullámformáik viszont nagyon hasonlítottak a korábbi eseményekhez, ezért bevettük őket az elemzésbe, remélve, hogy sikerül bizonyítani, hogy valamelyik utóregés csoporthoz tartoznak. Az EQ25 eseményről a korrelációs vizsgálat során derült ki, hogy robbantás, s ezt kiemelten jelöltük a 2. táblázatban.

2. táblázat | A földrengések hipocentrum adatai és távolságuk a PSZ állomástól. Ahol hiányoznak a koordináták, ott a kevés adat miatt nem történt epicentrum meghatározás

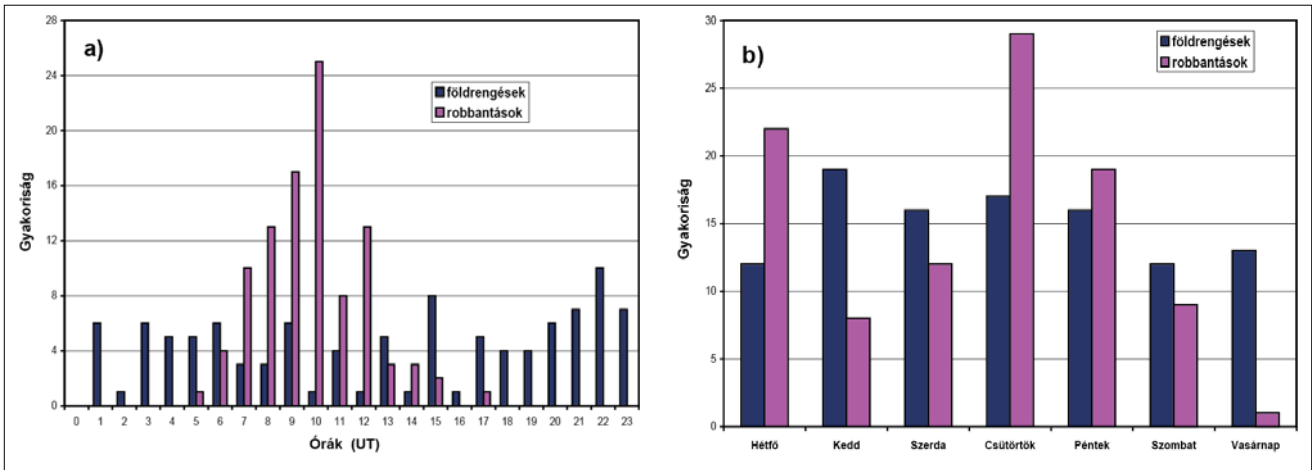
N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnevé	táv. (km)
EQ1	2010.05.25	06:55:26	47,286	19,943	15,0	3,1	Újszilvás (EMS5)	70,4
EQ2	2010.07.23	07:01:37	47,984	19,956	10,0	0,9	Mátramindszent	8,6
EQ3	2010.08.14	06:57:26	47,988	20,802	3,3	2,7	Miskolc (EMS3-4)	68,2
EQ4	2010.08.14	22:12:43	48,047	20,781	10,0	1,9	Miskolctapolca	67,6
EQ5	2010.08.17	05:32:43	47,994	20,783	10,0	2,4	Miskolc (EMS4)	68
EQ6	2010.08.19	01:29:05	48,055	20,782	10,0	3,0	Miskolc (EMS4-5)	68
EQ7	2010.08.19	14:48:07	48,041	20,796	1,8	2,4	Miskolc (EMS4-5)	68,7
EQ8	2010.08.19	17:45:32	48,054	20,786	10,0	2,1	Szirma	68,3
EQ9	2010.08.19	22:24:21	47,996	20,785	10,0	2,1	Bükkaranyos	67
EQ10	2010.08.20	11:39:26	47,979	20,772	10,0	2,3	Bükkaranyos	66
EQ11	2010.08.20	16:06:55	47,985	20,781	10,0	2,3	Bükkaranyos	67
EQ12	2010.08.20	19:17:32	48,027	20,847	2,6	1,6	Kistokaj	72
EQ13	2010.08.21	04:58:48	48,032	20,820	3,5	2,4	Kistokaj	70

2. táblázat (folyt.)

N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnév	táv. (km)
EQ14	2010.08.21	11:18:32	47,979	20,816	10,0	2,1	Kistokaj	70
EQ15	2010.09.26	05:02:15	48,049	20,350	7,0	1,8	Bélapátfalva	69
EQ16	2010.12.14	17:38:17	48,035	20,864	0,6	2,5	Sajópetri	53
EQ17	2010.12.14	21:29:03	48,075	20,855	1,3	2,8	Felsőzsolca EMS4-5	74
EQ18	2010.12.14	21:32:48	48,114	20,816	2,4	2,0	Felsőzsolca	72
EQ19	2010.12.14	23:07:23	48,092	20,821	1,6	2,6	Szirma	72
EQ20	2011.02.20	08:53:58	47,834	19,145	10,0	1,3	Szirma	57
EQ21	2011.03.12	05:47:01	47,566	19,404	10,0	1,7	Isaszeg	53,7
EQ22	2011.05.20	09:08:09	47,544	19,899	10,0	2,3	Jászdózsa EMS3	41,7
EQ23	2011.06.06	21:55:08	48,128	20,359	10,0	1,4	Bükkmogyorósd	41,8
EQ24	2011.06.18	03:47:34	47,604	19,788	10,0	1,4	Jászágó	35,8
EQ25	2011.07.26	05:52:26	47,915	19,887	5,0	0,8	Mátraszentimre	0,6
EQ26	2011.09.07	22:38:20	47,845	19,563	1,0	2,3	EMS4 Kisbágyon	26,1
EQ27	2011.10.28	09:25:54	47,978	19,990	2,0	1,3	Mátraterenye	11,9
EQ28	2011.11.03	03:29:28	47,399	19,413	7,0	1,2	Péteri	30,8
EQ29	2011.11.27	06:54:33	47,939	19,307	1,0	1,2	Kisecset	44
EQ30	2012.02.01	09:42:22	47,250	19,906	8,0	2,1	Újszilvás	74
EQ31	2012.03.20	01:21:22	47,980	20,380	4,0	2,4	Felsőtárkány	36,6
EQ32	2012.03.23	15:40:43	48,646	20,164	8,0	1,9	Szlovákia	83,3
EQ33	2012.05.31	21:35:42	48,944	20,315	0,0	2,6	Szlovákia	118
EQ34	2012.06.01	03:47:40	48,910	20,280	1,0	2,1	Szlovákia	114
EQ35	2012.06.14	08:13:46	48,075	20,250	8,0	1,2	Bekőlce	31,7
EQ36	2012.06.21	20:32:03	48,79	20,00	15,0	1,6	Szlovákia	97,5
EQ37	2012.07.08	18:46:26	47,410	19,698	10,0	1,3	Nagykátá	70,4
EQ38	2012.07.16	09:36:37	47,964	19,435	14,0	1,3	Terény	8,6
EQ39	2012.07.17	15:12:26	48,068	20,249	10,0	0,7	Egercsehi	68,2
EQ40	2012.07.19	09:22:43	48,881	20,497	7,0	2,0	Szlovákia	67,6
EQ41	2012.08.09	04:35:43	47,373	19,553	14,0	1,7	Gomba	68
EQ42	2012.10.29	08:34:05	47,760	20,100	10,0	1,9	Detk	23
EQ43	2013.02.05	22:34:31	47,275	19,805	6,0	2,1	Tápiószőlős	72
EQ44	2013.02.09	01:13:12	47,311	19,465	10,0	1,1	Monorierdő	75
EQ45	2013.02.11	06:08:21	47,270	19,835	6,0	2,2	Tápiószőlős	72
EQ46	2013.02.16	17:18:42	47,643	20,269	10,0	3,6	Heves (EMS4-5)	42
EQ47	2013.02.17	13:21:48	47,647	20,300	1,0	2,5	Tenk	43
EQ48	2013.03.19	15:09:26	48,342	19,806	9,0	1,6	Szlovákia	47
EQ49	2013.03.20	23:48:46	48,097	20,82	10,0	1,7	Szirma	71
EQ50	2013.03.21	11:17:04	48,342	19,795	10,0	1,2	Szlovákia	47
EQ51	2013.04.22	22:28:47	47,650	20,302	10,0	4,8	Heves (EMS6)	44
EQ52	2013.04.22	22:33:48	47,650	20,187	10,0	1,7	Boconád	37
EQ53	2013.04.22	22:37:12	47,667	20,188	17,0	1,4	Tarnaszádány	45
EQ54	2013.04.22	23:01:43	47,617	20,285	10,0	2,1	Heves	45
EQ55	2013.04.22	23:24:24	47,673	20,304	5,0	2,2	Heves	44
EQ56	2013.04.23	03:30:41	47,667	20,309	10,0	1,6	Erdőtelek	42
EQ57	2013.04.23	04:23:49	47,667	20,214	10,0	1,5	Boconád	37
EQ58	2013.04.23	13:31:04	47,667	20,291	14,0	1,8	Erdőtelek	37

2. táblázat (folyt.)

N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnev	táv. (km)
EQ59	2013.04.24	01:09:25	47,667	20,333	10,0	1,4	Tenk	40
EQ60	2013.04.24	01:40:07	47,667	20,146	10,0	1,1	Tanaméra	34
EQ61	2013.04.24	03:39:37	47,636	20,304	3,0	2,5	Heves	78
EQ62	2013.04.24	10:05:14	48,846	20,198	2,0	2,1	Szlovákia	26,1
EQ63	2013.04.24	15:53:58	47,667	20,318	10,0	1,9	Erdőtelek	26,1
EQ64	2013.04.24	21:02:37	47,595	20,250	6,0	1,3	Heves	40
EQ65	2013.04.24	22:39:36	47,571	20,264	10,0	1,8	Heves	48
EQ66	2013.04.24	23:02:15	47,558	19,956	0,0	1,1	Jászdózsa	40
EQ67	2013.04.25	13:42:31	47,667	20,324	10,0	1,8	Tenk	43
EQ68	2013.04.26	09:14:19	47,667	20,323	10,0	2,0	Tenk	42
EQ69	2013.04.26	18:57:23	47,610	20,267	6,0	1,5	Heves	44
EQ70	2013.04.27	04:58:50	47,564	20,221	4,0	1,3	Jászszeptandrás	46
EQ71	2013.04.28	07:01:37	47,721	20,167	10,0	1,5	Nagyút	30
EQ72	2013.04.29	13:58:04	47,667	20,304	10,0	2,0	Erdőtelek	42
EQ73	2013.05.02	20:06:53	47,723	20,369	1,0	1,0	Füzesabony	42
EQ74	2013.05.03	17:52:38	47,67	20,317	10,0	1,3	Erdőtelek	42
EQ75	2013.05.05	20:58:49	47,716	20,299	4,0	1,3	Kál	38
EQ76	2013.05.05	23:15:31	47,649	20,251	4,0	1,0	Boconád	40
EQ77	2013.05.08	20:49:15	47,647	20,347	13,0	1,7	Tenk	45
EQ78	2013.05.09	01:42:19	47,669	20,327	10,0	1,2	Tenk	43
EQ79	2013.05.12	07:47:23	47,567	20,222	1,0	0,7	Jászszeptandrás	46
EQ80	2013.05.12	21:10:47	47,639	20,248	6,0	1,1	Heves	41
EQ81	2013.05.17	04:23:21	47,675	20,298	16,0	1,7	Erdőtelek	41
EQ82	2013.05.18	20:34:20	47,654	20,296	10,0	2,9	Erdőtelek (EMS4-5)	42
EQ83	2013.05.18	22:25:17	48,123	20,852	8,0	1,7	Onga	75
EQ84	2013.05.24	18:54:54	47,663	20,286	0,0	1,8	Erdőtelek (EMS4)	41
EQ85	2013.06.03	21:23:06	47,667	20,289	1,0	2,2	Erdőtelek	41
EQ86	2013.06.05	18:45:46	47,993	19,216	4,0	4,1	Érsekvadk. (EMS5-6)	51
EQ87	2013.06.05	20:46:37	47,980	19,252	6,0	1,7	Szente	48
EQ88	2013.06.05	22:00:56	47,992	19,228	2,0	1,5	Érsekvadkert	51
EQ89	2013.06.11	05:31:25	47,995	19,226	5,0	2,3	Érsekvadk. (EMS4-5)	51
EQ90	2013.06.14	06:35:53	48,009	19,224	10,0	1,5	Csesztve	49
EQ91	2013.06.16	15:10:26	48,00	19,236	5,0	2,0	Csesztve	50
EQ92	2013.06.19	11:22:40	48,213	19,775	4,0	1,2	Szlovákia	34
EQ93	2013.06.22	15:32:37	47,846	19,125	10,0	1,2	Szendehegy	58
EQ94	2013.06.23	03:47:21	47,989	19,208	2,0	2,3	Érsekvadkert	52
EQ95	2013.06.23	15:47:52	47,985	19,242	5,0	2,1	Csesztve	49
EQ96	2013.06.24	23:06:40	47,669	20,295	0,0	1,2	Erdőtelek	41
EQ97	2013.07.02	13:49:04	–	–	–	–	Szlovákia	47
EQ98	2013.07.02	17:44:03	47,652	20,274	1,0	1,9	Erdőtelek	41
EQ99	2013.07.02	19:07:32	47,987	19,204	4,0	3,4	Érsekvadkert (EMS5)	41
EQ100	2013.07.02	19:47:00	47,990	19,198	5,0	2,3	Érsekvadkert	41
EQ101	2013.07.04	02:26:52	–	–	–	–	Heves	
EQ102	2013.07.04	15:22:00	–	–	–	–	Heves	
EQ103	2013.07.05	19:34:58	47,633	20,243	1,0	1,3	Heves	41
EQ104	2013.07.11	06:10:21	47,641	20,254	1,0	1,9	Tenk (EMS3)	41

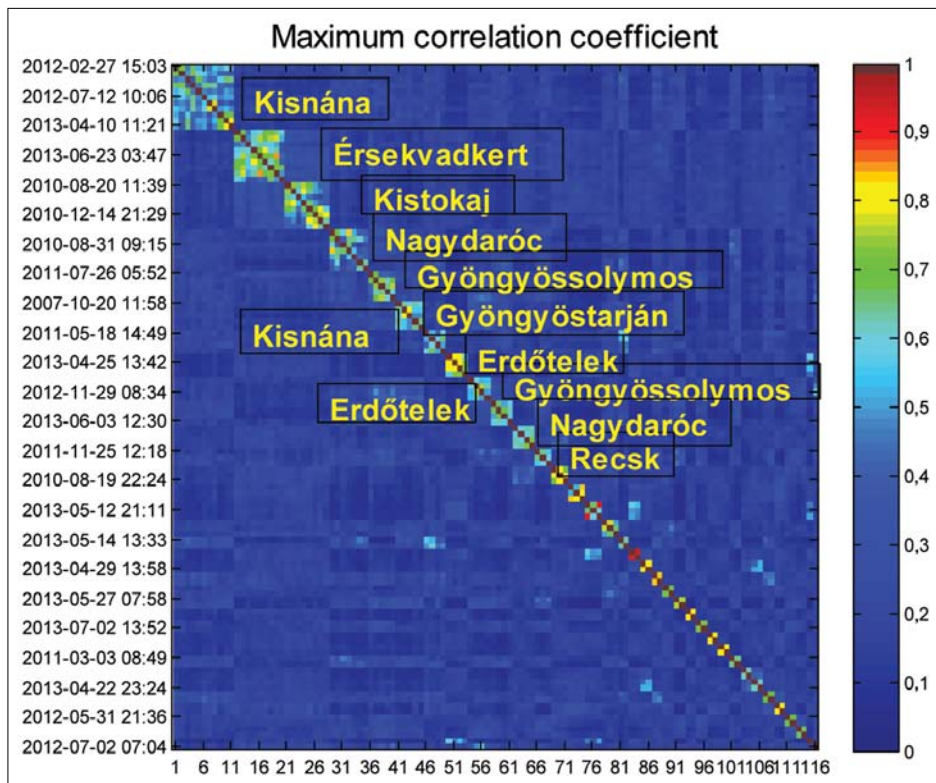


4. ábra A robbantások és földregések napi és heti eloszlása
 Figure 4 The diurnal and weekly distribution of blasts and earthquakes

A robbantások és földregések elkülönítése a keletkezési idők alapján

A 4. ábra a 204 esemény napi és heti eloszlását mutatja. Megfigyelhető, hogy mind a 8 bánya működése belesik a Typical binary spectra of a) blast and b) earthquake 5–15 h (UT) közötti időablakba, egyetlen esemény volt 17 óra után. A robbantások közül 90 munkanapra esett, 10 pedig hétvégére. Érdekes még a hétfői és csütörtöki csúcs, amely talán a bányaművelés ritmusából adódik. Ezzel szemben a földregések eloszlása sokkal egyenletesebb, nincs kiemelkedő nap vagy napszak. Emiatt, ha hétköznap, munkaidőben észlelt szeizmikus eseményről van szó, gyanítható, hogy az esetleg robbantás. A 2010.01 és 2012.12 közötti 3 év alatt 68 robbantást és 42 rengést tartalmazott a lista. A regisztrált események többsége a területen tehát robbantás volt. (Természetesen több olyan földregés is keletkezhetett, amelynek paramétereit nem sikerült meghatározni, így ezek nincsenek benne a listában.)

művelés ritmusából adódik. Ezzel szemben a földregések eloszlása sokkal egyenletesebb, nincs kiemelkedő nap vagy napszak. Emiatt, ha hétköznap, munkaidőben észlelt szeizmikus eseményről van szó, gyanítható, hogy az esetleg robbantás. A 2010.01 és 2012.12 közötti 3 év alatt 68 robbantást és 42 rengést tartalmazott a lista. A regisztrált események többsége a területen tehát robbantás volt. (Természetesen több olyan földregés is keletkezhetett, amelynek paramétereit nem sikerült meghatározni, így ezek nincsenek benne a listában.)



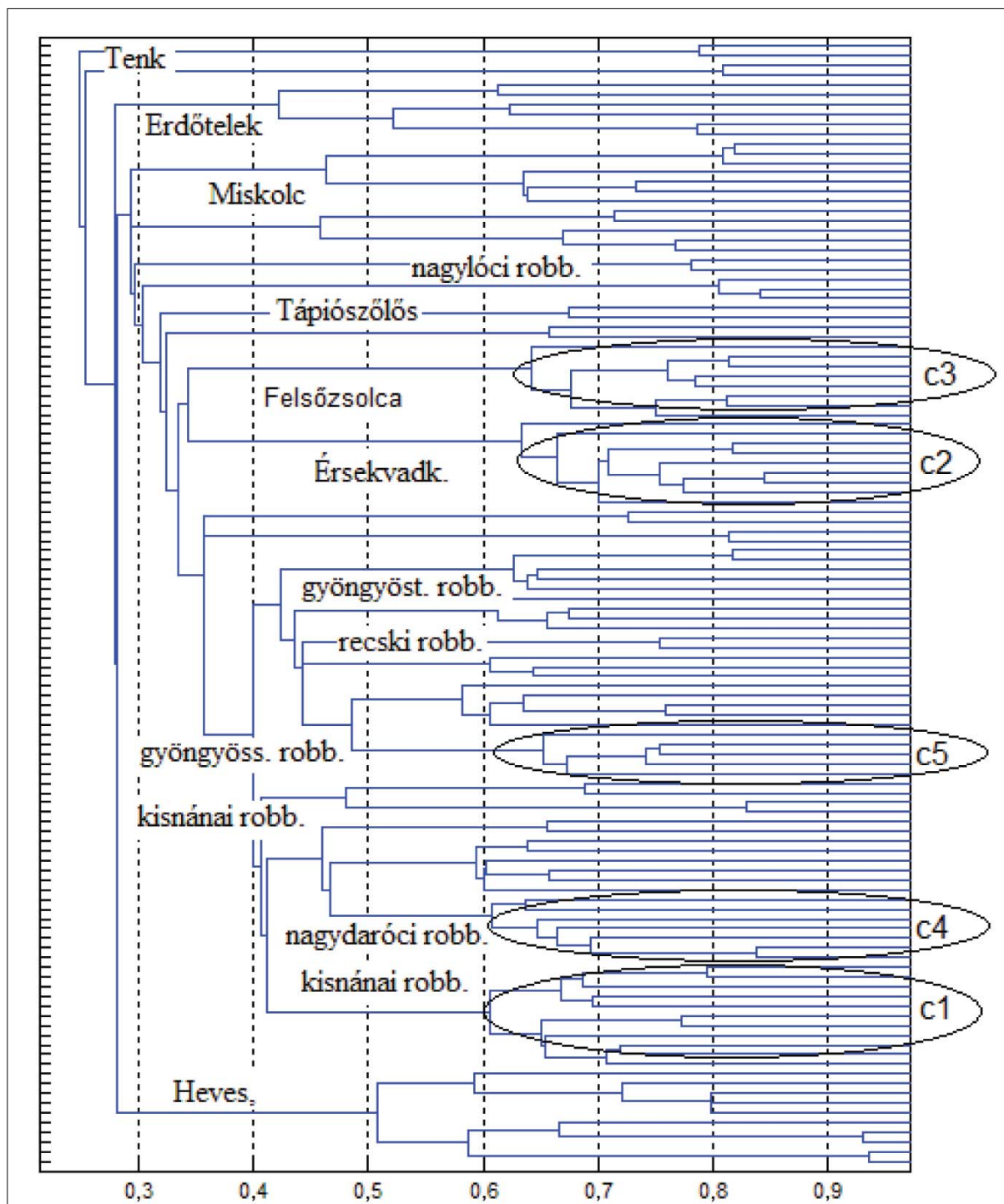
5. ábra A robbantások és földregések rendezett korrelációs mátrixa, a nagyobb klaszterek forrásának a feltüntetésével
 Figure 5 The arranged correlation matrix of blasts and earthquakes, the origin of biggest clusters were indicated

A robbantások és földrengések elkülönítése a hullámformák alapján

A hullámformák összehasonlítását a keresztkorrelációs együtthatók számításával végeztük, amihez az ilyen célra kifejlesztett GISMO, MATLAB programcsomagot használtunk. Az elemzéshez a horizontális csatornákat választottuk, mert ezeken a később beérkező S hullámok na-

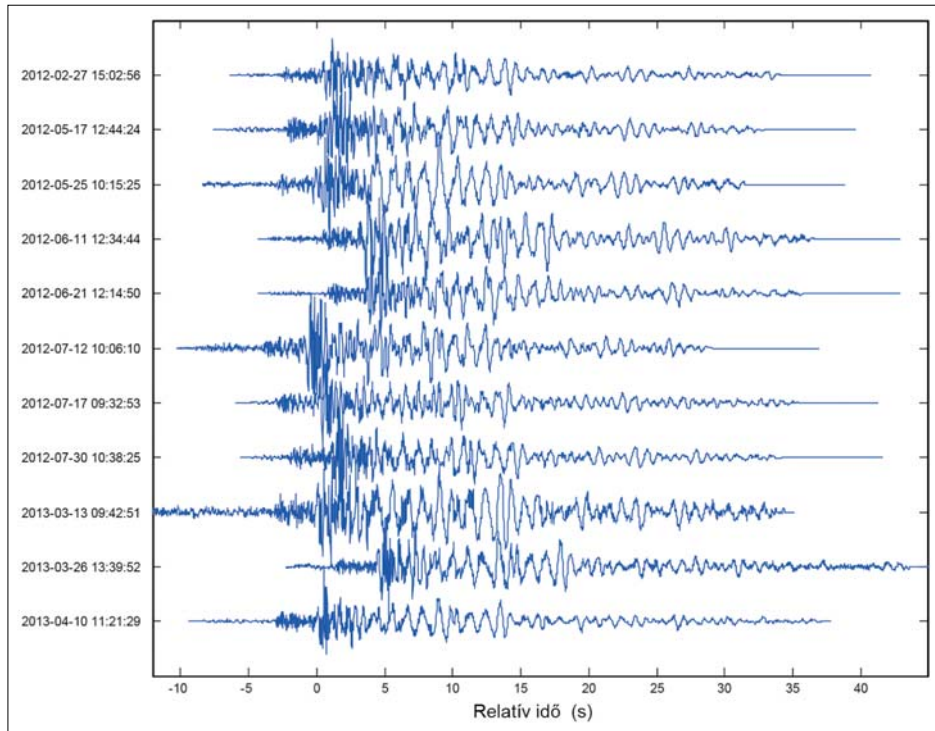
gyobb amplitúdóval jelentkeztek, ezért használhatóbbak voltak.

Először meghatároztuk azt az időablakot, amelyen belül összehasonlítottuk a szeizmogramokat. Az SHN (É–D) csatornákból egy-egy 25 másodperces hullámformát használtunk fel, amely a teljes esemény regisztrátumát, az S és Rg hullámvonalat nagy részét is tartalmazta. Ezután a szeizmogramokat 0,5–20 Hz közötti Butterworth-sáv-



6. ábra | A legalább egy másikkal hasonlóságot mutató ($c_{xy} > 0,6$) események dendrogramja. A jelentősebb klasztereket feliratoztuk

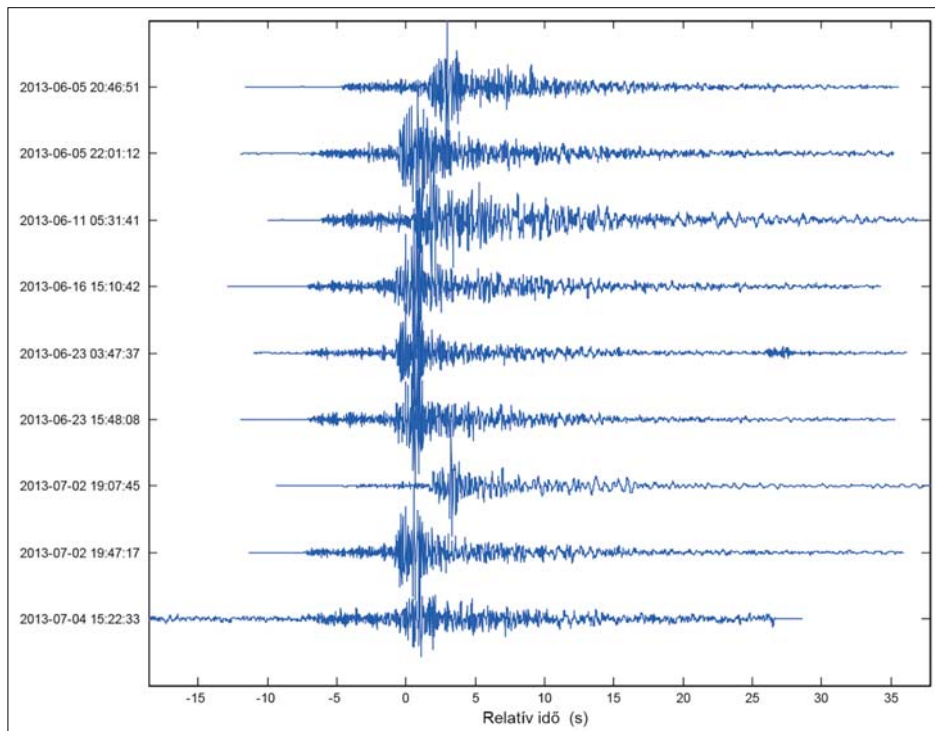
Figure 6 | The dendrogram of similar events above the critical correlation coefficient ($c_{xy} > 0.6$). The main cluster are labeled



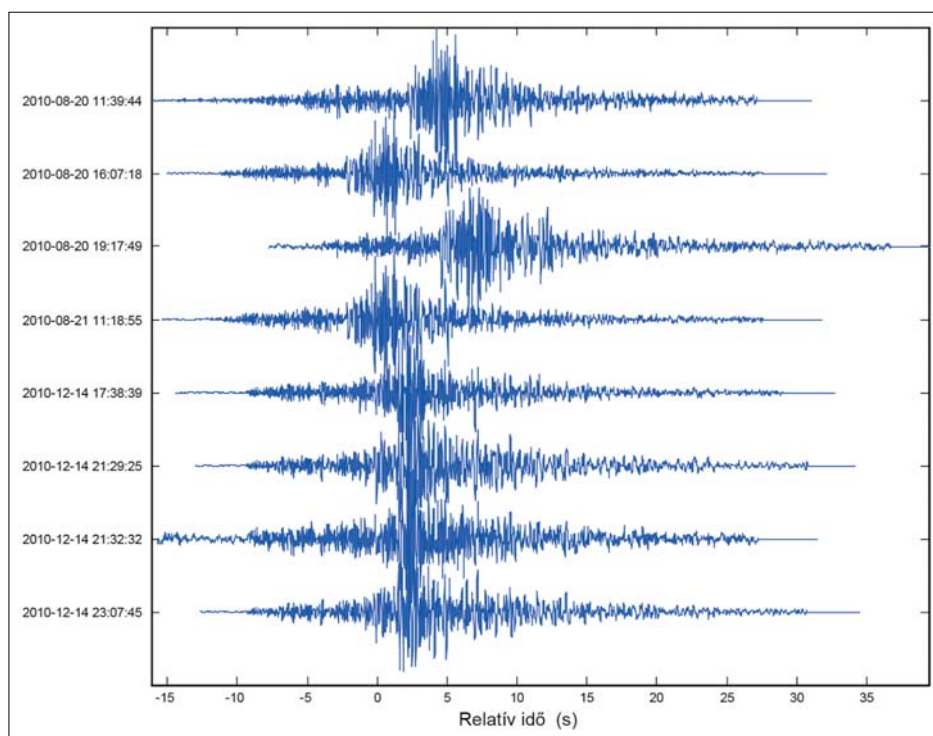
7. ábra | A legnagyobb (11 elemű) klaszter eseményei a kishánai bánya robbantásaiból származtak
Figure 7 | The events of the largest cluster (consisting of 11 elements) originated from the blasts of the Kishána mine

szűrővel megszűrtük, hogy a zavaró kis periódusú jeleket eltávolítsuk. Két esemény közötti korrelációs együttható meghatározásához eltoltuk egymáshoz képest a szeizmo-

grampárokat, megkerestük a két esemény közötti korrelációs együttható maximális értékét, és ezt minden lehetséges párra elvégeztük.



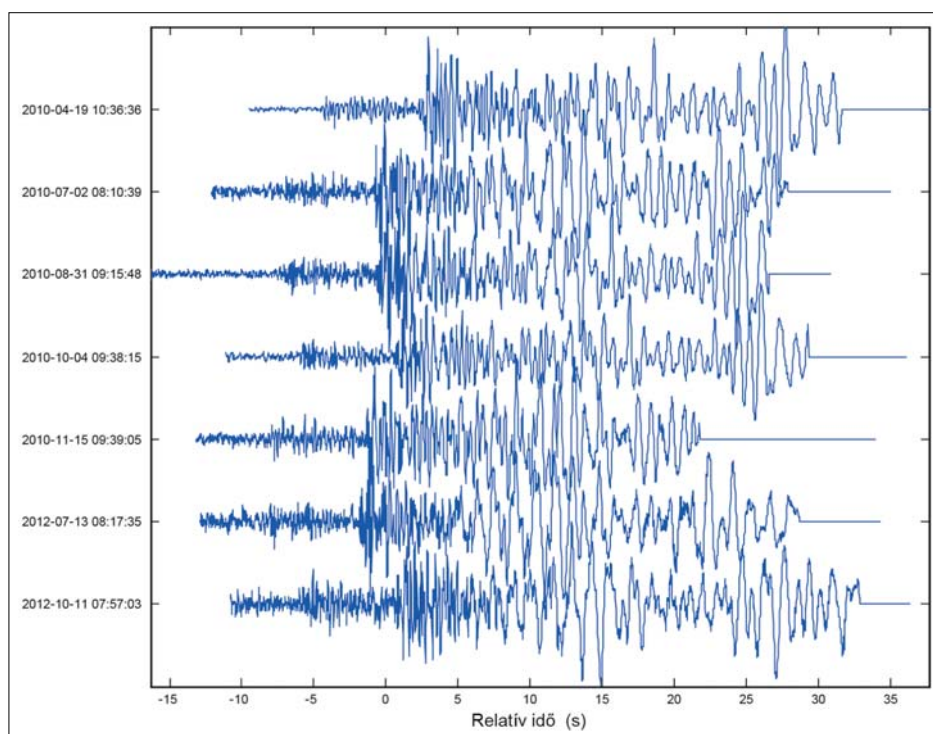
8. ábra | A második legnagyobb (9 elemű) klaszter elemei az Érsekvadkert térségében kipattant földrengésekhez tartoztak
Figure 8 | The second largest cluster (consisting of 9 events), were belonged to earthquakes of area Érsekvadkert



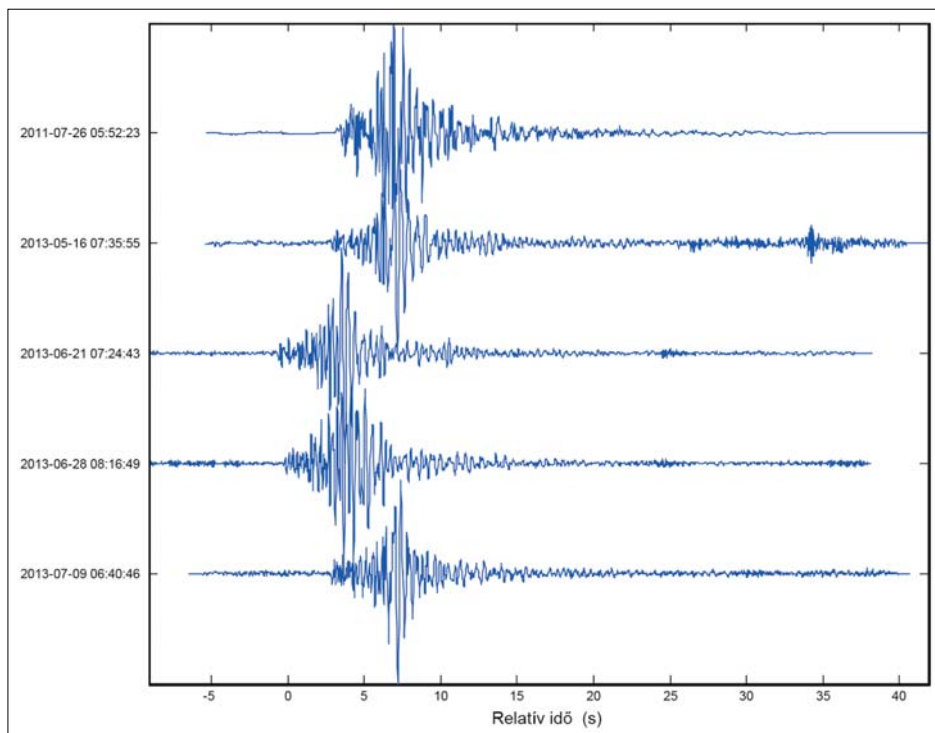
9. ábra | A harmadik legnagyobb (8 elemű) klaszter elemei a Felsőszolca–Bükkaranyos térség rengései voltak
Figure 9 | The third largest cluster consisting of 8 events, were belonged to earthquakes of area Felsőszolca–Bükkaranyos

A kritikus korrelációs együttható értékét, amely fölött hasonlóknak tekintettünk két eseményt, $c_{xy} = 0,6$ -nak választottuk, ami nem túl szigorú feltétel. Ennek alapján összesen

114 esemény mutatott a kritikus értéknél ($c_{xy} = 0,6$) nagyobb hasonlóságot valamely másik eseménnyel. Az elemzés vég-eredményét a rendezett korrelációs mátrix (5. ábra), a ha-



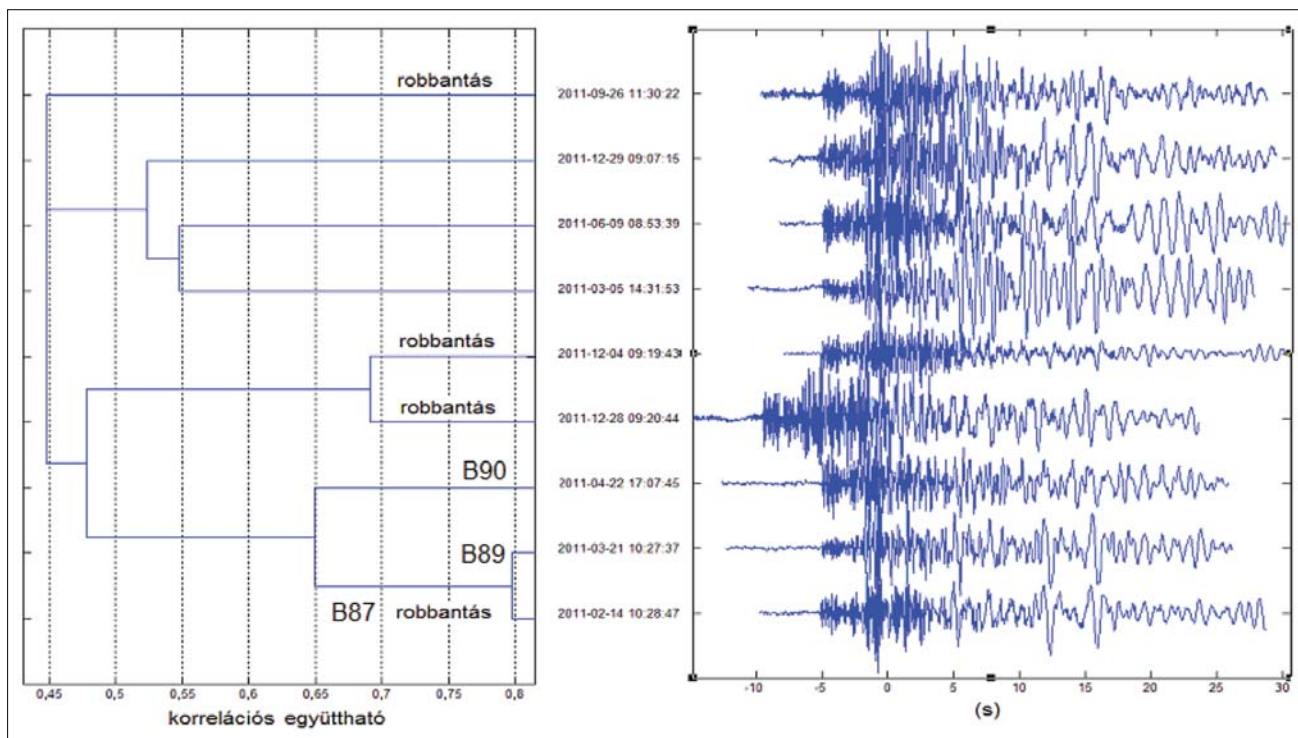
10. ábra | A 7 elemű klaszter eseményei *nagydaróci* robbantások voltak
Figure 10 | This cluster consisting of 7 events, were belonged to blasts of *Nagydaróc*



11. ábra | A gyöngyössolymosi bányarobbanás klasztere. Az EQ25 sorszámú mátraszentimrei földrengés (2011.07.26) hullámformája e robbantásokkal alkotott közös klasztert

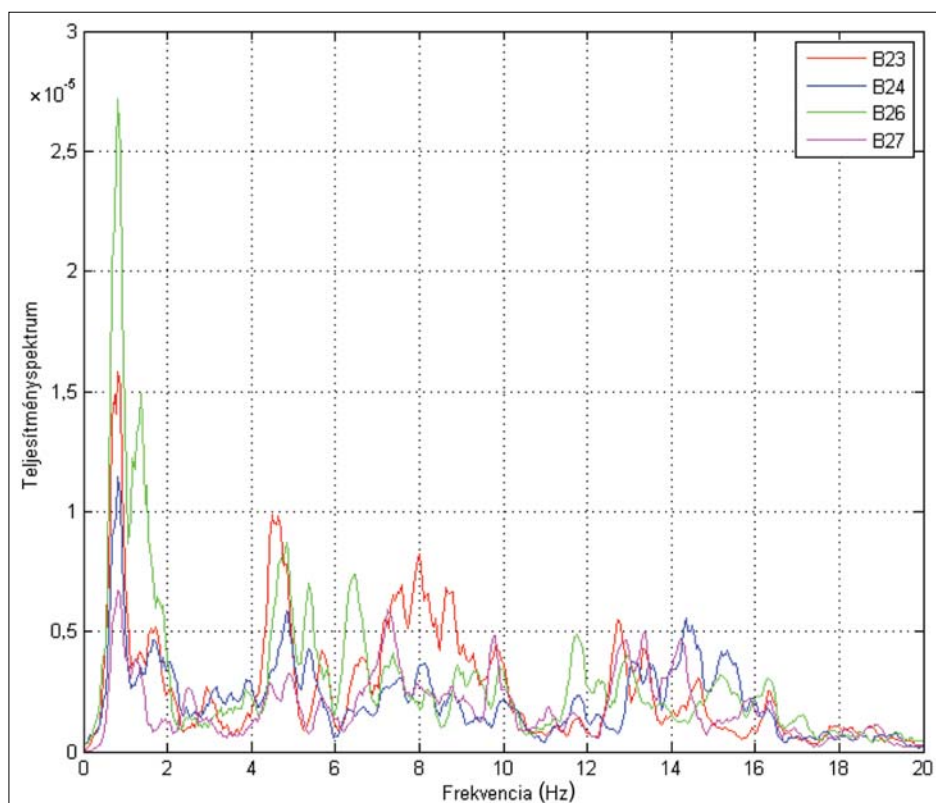
Figure 11 | The cluster of explosions of quarry Gyöngyössolymos. The waveform of EQ25 earthquake occurred in Mátraszentimre (2011.07.26) formed common cluster with these blasts

sonlóság alapján „rokonsági” ágakba csoportosított események dendrogramja (6. ábra) mutatja. Az ábrákon összesen 116 esemény szerepel. A legnagyobb hasonlóság alapján négy nagyobb klaszter alakult ki, egy-egy 11, 9, 8 és 7 ele-

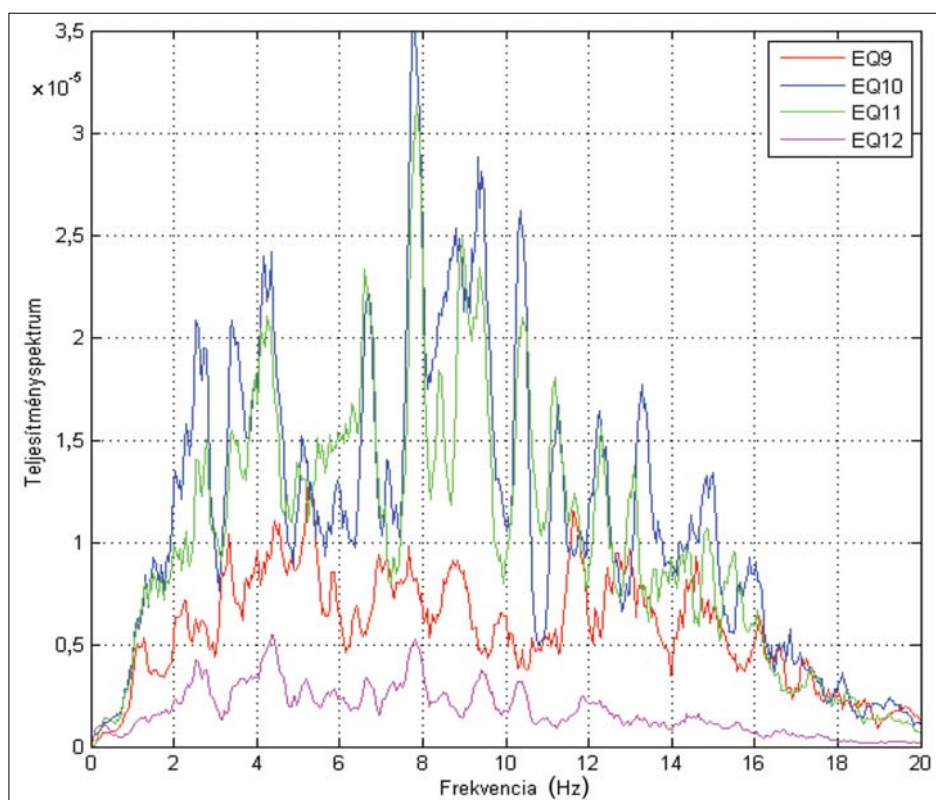


12. ábra | A nagylóci bánya robbantásai esetén egy 3 elemű klaszterbe került a kérdéses B89-B90 esemény 1 igazolt robbantással

Figure 12 | In the case of mine Nagylóc, the question B89 and B90 events formed a three element cluster with the proven B90 explosion



13. ábra | Néhány *kiszánai* robbantás spektruma
Figure 13 | Some blasting spectra of *Kiszána*



14. ábra | Néhány földrengés spektruma
Figure 14 | Some earthquake spectra

mű, valamint két 5 elemű és öt 4 elemű. Ezen kívül öt db 3 elemű és további tizenhat 2 elemű dubletet kaptunk még.

Az 5 legnagyobb klaszter a 6–11. ábrán látható. A 11. ábra a gyöngyössolymosi robbantások legnagyobb, 5 elemű klaszterét mutatja, ami azért érdekes, mert egy korábban földregésnek tekintett esemény (EQ25: 2011.07.26. Mátra-szentimre) több, 2013-as igazolt robbantáshoz hasonlít leginkább. Ez az esemény tehát tévesen került a földregések közé. A recski bányarobbanások 3 elemű klasztere pedig azért tanulságos, mert a B96 sorszámu, 2011.11.25-én végrehajtott, korábban egyik bányához sem köthető robbantás itt két, 2013-as igazolt bányarobbanással került egy csoportba.

Az egyes bányák esetében a robbantások nem mindig alkottak egyetlen csoportot. Például a *kisnánai* robbantások a legnagyobb klaszter (7. ábra) mellett 4 további kisebb csoportba rendeződtek. A *nagydaróci* bánya robbantásai 3, a *gyöngyössolymosi*, *berceli*, *gyöngyöstarjáni* és *recski* robbantások 2-2 klasztert hoztak létre. A *nagylóci* bánya robbantásai közül egy 3 és egy 2 elemű csoport jött létre. A 9 nagylóci esemény hasonlósági dendrogramját és szeizmogramjait a 12. ábra mutatja. Az események közül azonban csak 4-et igazolt vissza a bánya, ezeket felirattal jelöltük. Az előbbi azért fontos, mert két kérdéses eredetű esemény (B89-B90) egy igazolt robbantással (B87) mutatott nagy hasonlóságot. Ezért ezek az események robbantásnak tekinthetők. A *szalóci* bányavidék robbantásai nem alkottak egy klasztert sem, tehát egyik robbantás sem hasonlított a másikra.

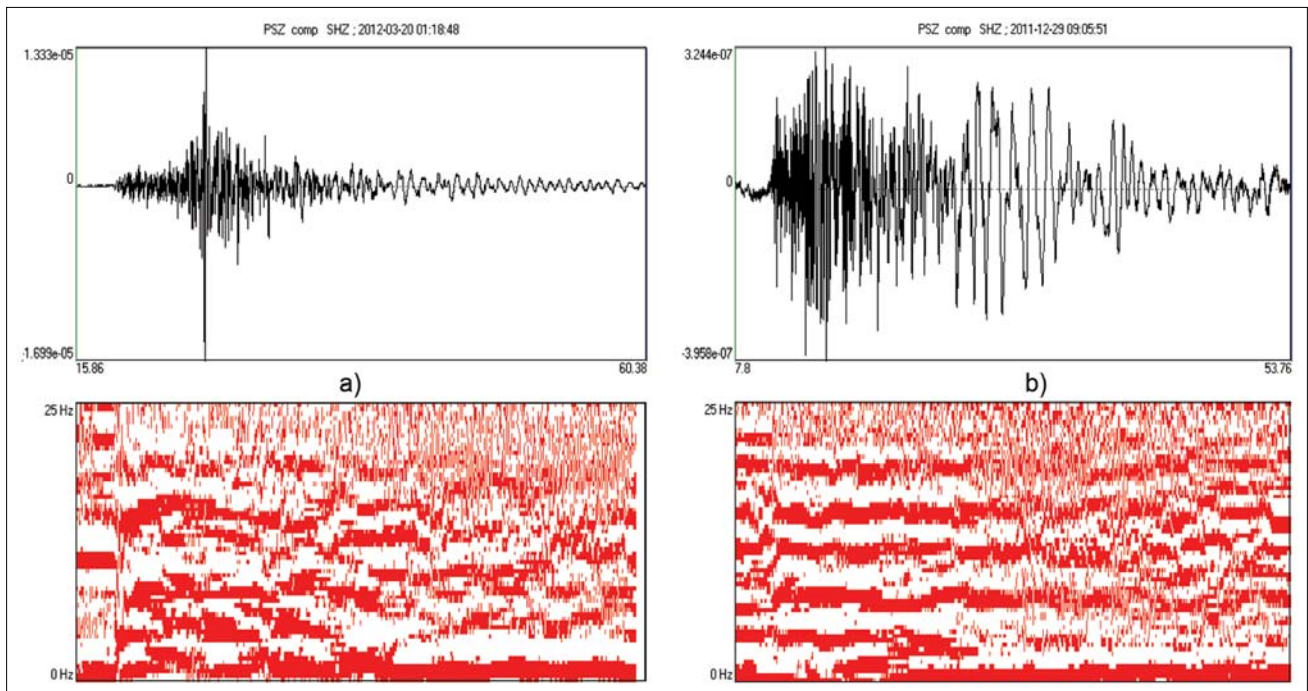
A földregések 17 hasonlósági csoportba rendeződtek, de a robbantásokkal egy esetben sem keveredtek.

Az 1. és 2. táblázatban felsorolt 204 esemény közül a $c_{xy} = 0,6$ feltétel szerint 114 esemény volt hasonló valamely

másik eseményhez, ebből 54 volt földregés és 60 robbantás, ami a regések 52, a robbantások 60%-ának felelt meg. A 28 *kisnánai* robbantás szeizmogramjai közül 21 került bele 5 különböző klaszterbe. A kritikus korrelációs együtttható értékét $c_{xy} = 0,5$ -re csökkentve még mindig nem keveredtek a robbantások a földregésekkel. Ekkor a robbantások 84, a regések 60%-a került bele különböző csoportokba. A $c_{xy} = 0,6$ esetén kialakult klaszterek részben bővültek, részben összeolvadtak. A *kisnánai* 28 robbantás 4 csoportjába most 24 esemény került bele, majdnem az összes robbantás. A földregések esetében érdekes, hogy ugyanarról a szűk területről több klaszter is kialakult, ezek talán mélységükben vagy fészekmechanizmusukban térhettek el egymástól.

A robbantások és földregések spektrumainak jellegzetességei

A vizsgált bányákban a robbantásokat a késleltetett robbantási technikával hajtották végre. Ezzel a módszerrel el lehet érni a köztömbök kellő szétzúzását, és csökkenteni a zajt valamint a környező települések megrázottságát, zavarását. E technika lenyomata a spektrumban annak csipkézettsége lesz. A 13. ábrán néhány *kisnánai* bányarobbanás, a 14. ábrán a *bükkaranyosi*, 2010-es évben kipattant néhány földregés simított spektruma látható. Megfigyelhető mindkét esetben az egyes csoportokhoz tartozó spektrumok hasonlósága és a robbantásoknál a jellemző csipkézettség. A robbantások esetében figyelembe véve az összes bányát, a legnagyobb maximum az első csúcsonál, alacsony frekvencián, 4 Hz alatt volt tapasztalható. A földregéseknél a legna-



15. ábra | Földregés a) és robbantás b) tipikus bináris spektruma

Figure 15 | Typical binary spectra of a) blast and b) earthquake

gyobb spektrumteljesítmény ennél magasabb frekvenciához tartozott. Ez a tapasztalat megegyezik pl. Wüster (1993) Németország és Csehország határán (Vogthland) kipattant M_L 1–3 mikroregések és kémiai robbantások spektrumainak elemzésével. Azt találta, hogy a földregések esetében az S hullámok spektruma magasabb frekvenciákra terjedt ki, és az 1–10 Hz közötti tartományban a teljesítménye lassabban csökkent, mint a robbantásoké.

A bináris spektrogramok elemzésével az időtől független spektrummodulációk meglétét követtük nyomon. A spektrumot két különböző hosszúságú ablakban futó átlagot számoló szűrővel alakítottuk át binárisá. Ha a rövid átlag értéke nagyobb volt, mint a hosszabbé, a spektrum '1', ha kisebb, '0' értéket kapott. A rövid átlagot 1,17 Hz, a hosszút pedig 3,5 Hz széles frekvenciaablakból számítottuk. A bináris spektrogram számításával piros/fehér színekkel kódolva a spektrum csipkézettiségeinek időbeli stabilitását követtük nyomon (15. ábra). A vizsgált földregésekre ez az időtől független moduláció nem volt jellemző, míg 100 robbantás közül csak 7 esetben nem alakult ki.

Következtetések

A szeizmicitásról alkotott kép kialakítása és a tektonikai értelmezés szempontjából hazánkban is nagyon fontos, hogy el tudjuk különíteni a mikroregéseket és a kémiai bányarobbantásokat. A dolgozatban a Mátra hegység második legmagasabb csúcsán elhelyezett pizskéstetői (PSZ) állomáson detektált 8 különböző bányarobbantásainak és a terület földregéseinek az időbeli eloszlását, hullámformájuk hasonlóságát és spektrumuk jellemzőit vizsgáltuk.

A legkézenfekvőbb elkülönítő módszer az esemény helyét és idejét használja fel. Mivel az epicentrumok meghatározási pontossága több vizsgált robbantás esetében az 5–10 km-t is meghaladta, csak az epicentrum alapján nem lehetett kiválogatni őket.

A bányák esetében ki tudtunk jelölni egy időablakot, amelyen belül általában a robbantások történtek. De ebben az időablakban történtek földregések is. A hétköznapi hétköznapi felosztás sem ad egyértelmű minősítést, mert a rengések 76%-a is hétköznapra esett.

A hullámformák hasonlóságának elemzésétől azt vártuk, hogy az ugyanabból a bányából származó események nagyon hasonlóak lesznek egymáshoz. De annak ellenére, hogy egy adott bánya és regisztráló állomás esetében a robbantás szeizmikus hullámjai mindig ugyanazokon a köztrétegeken hatolnak át, nem minden azonos bányából származó robbantás bizonyult egymáshoz hasonlóknak. A robbantások végrehajtása során használt eltérő mennyiségű robbanóanyag és töltetelrendezés ugyanis olyan egyedi hullámformákat hozott létre, ami miatt keresztkorrelációjuk kicsi lett. Mind a robbantások, mind a földregések több klaszterbe rendeződtek, de a robbantások nem keveredtek össze a földregésekkel. A különböző bányák robbantásai különböző klaszter(ek)e)t alkottak, ezért ha létrehozuk az egyes bányákhoz tartozó hullámforma-adatbázist (folyamatosan bő-

vítve azt), lehetővé válik a robbantások 100%-os kiszűrése. Ezek megerősítéséhez azonban nagyon fontosak a bányakapitányságoktól kapott információk is.

A csoportok elemei eltérő magnitúdójú eseményeket tartalmaztak, de a hullámformák hasonlóságára ez nem volt nagy hatással. Például a második legnagyobb klaszter legkisebb és legnagyobb eleme M_L 1,6, illetve M_L 3,4 méretű földregés volt. A recski, nagylóci és gyöngyössolyosi robbantások klaszterei esetében korábban földregésnek vagy ismeretlen eredetűnek tekintett robbantást sikerült azonosítani a hullámformák hasonlósága segítségével.

A miskolci, hevesi és érsekivádkerti utóregések is hasonlósági csoportokba rendeződtek. Ezeknek a regéseknek az epicentrumai nagyon közel (3–4 km) estek egymáshoz, időben pedig maximum néhány hónap különbséggel pattantak ki. Az utóregéseket tartalmazó klaszterek elemeiről elmondhatjuk, hogy hasonló epicentrumú és fészekmechanizmusú eseményekből állnak, ami a tektonikus feszültségek kioldódásának folyamatáról adhat információt.

Olyan földregés is bekerült a második legnagyobb klaszterbe, amelynek hipocentrumát a kevés regisztráló állomás miatt nem sikerült meghatározni (EQ101: 2013.07.04 15:22). Elméleti megfontolások alapján ennek az eseménynek epicentruma és fészekmechanizmusa hasonló a többi, vele egy klaszterbe került ismert földregéséhez. Hasonló példa volt még 2012-ben a Vértes hegységben található Gánton, ahol történt egy M_L 2,7 rengés, amelyet nagyon sok kisebb utóregés követett. Ezeket csak egyetlen állomás regisztrálta, epicentrumaikra így csak a hullámformák hasonlósága révén lehetett következtetéseket levonni (Kiszely 2013).

A spektrumok elemzése is figyelemre méltó eredményt adott, mivel a legtöbb robbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő csipkézettesség. A csipkézettesség kb. az 1–10 Hz közötti spektrum tartományra volt leginkább jellemző. Az egyes frekvenciák teljesítményének megemelkedése a nagyobb frekvenciák felé haladva újra jelentkezett, de egyre kisebb amplitúdóval. Robbantások esetén a teljesítményspektrumok amplitúdója az első „csipke” miatt az 1–4 Hz közötti sávban volt a legmagasabb. Néhány földregés esetén is meg lehetett figyelni egyes frekvenciák megemelkedett teljesítményét, de a spektrum szélesebb frekvenciatartományra terjedt ki, mint a robbantások esetében. A magasabb frekvenciák felé haladva gyorsabban csökkent a robbantások teljesítményspektruma, mint a földregések esetében.

A legtöbb bányarobbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő, időtől független moduláció (100 robbantás közül mindössze 7 esetben nem alakult ki). A bináris spektrogramon az időtől független moduláció az esemény végéig követhető volt, míg a földregések bináris spektrogramjára nem voltak jellemzőek a „sávok” szakaszok.

Összefoglalásként megállapítható, hogy az aktív vetők kijelölésekor a katalógusban szereplő mikroregések természetes eredetét ellenőrizni kell, mert ebben a mérettartományban már bányarobbantások is nagy számban előfordul-

nak hazánkban. A robbantások és földrendések elkülönítésére a hullámformák hasonlóságának elemzése jó eredményt adott. A klaszterekbe rendezett események szétváltak egymástól bányák szerint, és különböző rengésrajok szerint is. Vizsgálataink szerint a késleltetett robbantási módszer következtében kialakuló spektrum csipkézettsége és a spektrogramon nyomon követhető időtől független moduláció jelenléte jó elkülönítő paraméternek bizonyult. Fontos felvenni a kapcsolatot a területen az érintett bányakapitányságokkal a robbantási időpontok megismerése céljából, és egy több évet átfogó, az egyes bányákra vonatkozó robbantási hullámformamintát összeállítani.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a GeoRisk Földrengés Mérnöki Irodának, hogy a 2013-as eseményekre a havi földrendések tájékoztatóit felhasználhattuk az epicentrumok paramétereinek forrásaként. A cikk a 105399. sz. OTKA pályázat keretében végzett kutatás része.

A tanulmány szerzői

Kiszely Márta, Győri Erzsébet

Hivatkozások

Baisch S., Ceranna L., Harjes H-P., 2008: Earthquake cluster: What can we learn from waveform similarity? *BSSA* 98/6, 2806–2814
 Baumgardt D. R., Young G. B., 1990: Regional seismic waveform discrimination and case-based event identification using regional arrays. *BSSA* 80/6, 1874–1892
 Carr B. D., Carbin H. D., 1998: Discrimination ripple-fired explosions with high-frequency (>16 Hz) data. *BSSA* 88/4, 963–972
 Chapman M. C., Bollinger G. A., Sibol M. S., 1992: Modeling delay-fired explosion spectra at regional distances. *BSSA* 82/6, 2430–2447
 Gitterman Y., Van Eck T., 1993: High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions. *BSSA* 83/4, 1184–1212

Deichmann N., Garcia-Fernandez M., 1996: Rupture geometry from high-precision relative hypocenter locations of microearthquake clusters. *Geophys. J. Inst.* 110, 501–517
 Grácz Z., Czifra T., Kiszely M., Mónus P., Zsíros T., 2012: Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2011, Budapest, MTA CSFK GGI, 2012, p. 357
 Grácz Z., Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T., 2013: Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2012, Budapest, MTA CSFK GGI, 2012, p. 258
 Hage M., Joswig M., 2009: Mapping local microseismicity using short-term tripartite small array installations – Case study: Coy region (SE Spain), *Tectonophysics* 471, 225–231
 Hedlin M. A. H., Minster J. B., Orcutt J., 1989: The time–frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosion recorded in Kazakhstan, USSR. *Geophys. J. Int.* 99, 102–121
 Kim W. Y., Simpson D. W., Richard P. G., 1993: Discrimination of regional earthquakes and explosions in eastern United States using high-frequency data. *Geophys. Res.*
 Kiszely M., 2012: A hullámforma korreláció használata mikrorengések elemzésére – 2012. április 6., Vértes. *Geomatikai Közlemények* XV, 119–127; *Lett.*, 20, 1507–1510
 Koch K., Fáh D., 2002: Identification of earthquakes and explosions using amplitude ratios: The Voghtland area revisited. *Pure Appl. Geophys.* 159, 735–757
 Massa M., Eva E., Spallarossa D., Eva C., 2006: Detection of earthquake clusters on the basis of waveform similarity: An application in the Monferrato region (Piedmont, Italy). *Journal of Seismology* 10, 1–22
 Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T., 2011: Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2010. MTA GGKI és GeoRisk Kft., Budapest, 140 o., HU ISSN 1589-8326
 Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T., 2012: Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2011. GeoRisk Kft., Budapest, 160 o., HU ISSN 1589-8326
 Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T., 2013: Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2012. GeoRisk Kft., Budapest, 88 o., HU ISSN 1589-8326
 Wüster J., 1993: Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe – a case study. *BSSA* 83/4, 1184–1212
 USGS: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/mineblast/evidence.php> (2013)
 GISMO: <http://giest.alaska.edu/Seis/EQ/tools/matlab>

Nukleáris sajtótájékoztatók

Decemberben tartotta évvégi sajtótájékoztatóját a *Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft. (RHK Kft.)*. Dr. Kereki Ferenc ügyvezető igazgató számolt be a Kft. által végzett munkáról.

A beszámolóhoz kapcsolódóan tekintünk át röviden az RHK Kft. történetét és tevékenységét!

Magyarországon 1996-ban született meg az ún. Atomtörvény, amely megfogalmazta, hogy a radioaktív hulladékok végleges elhelyezése egy független, a kormány által kijelölt szerv feladata, és rendelkezett a Központi Nukleáris Pénzügyi Alap (amelynek kezelője az Országos Atomenergia Hivatal, de rövidesen átkerül a Nemzeti Fejlesztési Minisztériumba) létrehozásáról is. E törvény alapján alakult meg 1998-ban az RHK Kft., hogy legyen gazdája a radioaktív hulladékok tárolásának, végleges elhelyezésének, valamint a nukleáris létesítmények leszerelésének.

Magyarországon három helyen folyik a nukleáris hulladékok tárolása:

- a Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tárolóban (RHFT) Püspökszilágyon,
- a Nemzeti Radioaktív Hulladék-tárolóban (NRHT) Bataapátiban, valamint
- a Kiegészített Átmeneti Tárolójában (KKÁT) Pakson.

Valamennyi helyszínen sok éven át tartó geofizikai, földtani kutatásokat folytattak az ELGI, a MÁFI és a GGKI szakemberei, hogy a területek alkalmasságát megállapítsák.

A radioaktív hulladékokat kezdetben a Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) területén tárolták. 1960-ra készült el a solymári kísérleti izotóptemető. A létesítményt az Országos Atomenergia Bizottságtól (OAB) a Fővárosi Közegészségügyi és Járványügyi Állomás (KÖJÁL) 1960-ban vette át, így a radioaktív hulladékok országos összegyűjtése is ekkor kezdődhetett meg. A solymári létesítményt a KÖJÁL üzemeltette 1976-ig. A főváros közelsége és a talaj vízzáró tulajdonságainak elégtelensége azonban indokoltá tette egy új tároló kialakítását, és a solymári felszámolását.

A *Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló (RHFT)* Püspökszilágy és Kismémedi határában készült el 1976-ban. Ide szállították át a felszámolt solymári tároló hulladékát is. A paksi atomerőmű első reaktorának üzemelése megsokszorozta az éves szinten keletkező kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok mennyiségét. Az erőmű műszaki tervében leírt koncepció szerint az erőmű üzem-

idejére a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok tárolását az erőmű segédépületében irányozták elő. Ez azonban csak ideiglenes megoldást jelenthetett. Logikusnak tűnt, hogy az erőmű ilyen hulladékát is az RHFT-ben helyezték el véglegesen. Így 1983 és 1989 között az RHFT kapacitásából az erőmű jelentős helyet kötött le. A paksi atomerőmű igényeinek megfelelő bővítést azonban az RHFT területén felszínközeli megoldást figyelembe véve az elvégzett vizsgálatok szerint nem lehetett megvalósítani. A paksi hulladék püspökszilágyi elhelyezése ellen szólt a hosszú szállítási útvonal is.

Az atomerőmű jelentős erőfeszítéseket tett arra, hogy a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékainak elhelyezését egy önálló tárolóban megoldja. Ezek a törekvések 1990 januárjában megbuktak, amikor a tervezett ófalui tárolóval kapcsolatban a lakosság ellenállása miatt véglegesen negatív döntés született. Az ófalui tároló létesítési program meghiúsulását követően átmeneti megoldásként az RHFT-be történő szállítás feltételeit kellett megteremteni. Ezzel egyidejűleg megtörtént a püspökszilágyi RHFT tárolókapacitásának kibővítése is az erőmű finanszírozásával. A bővítéssel kapcsolatos engedélyezési eljárás során a Magyar Geológiai Szolgálat megkérdőjelezte a telephely alkalmasságát, ezért a továbbiakban a bővítményre csak ideiglenes üzemeltetési engedélyeket adtak ki négy ízben is.

1990 és 1991 között a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok beszállítása az RHFT-be lakossági tiltakozás miatt szünetelt. Ezt követően azonban 1992-től folytatódott a beszállítások.

2005-ben a tároló medencék megteltek, az újabb hulladékszállítványok fogadásához már csak az üzemi épület pincészetjén kialakított átmeneti tárolóteret lehetett használni. A térfogatbővítés lehetőségét úgy teremtették meg, hogy a meglévő tárolótereket hatékonyabban használják ki.

2007–2009 között négy, az 1980-as években lezárt tárolómedence felnyitásával több mint 200 m³ hulladék kiemelése történt meg. Ez a munka jelenleg is folyik. A régebben elhelyezett hulladéksomagokat a mai követelményeknek megfelelően átcsomagolják. Ez a hosszú távú biztonságot is növeli és kapacitásbővítést is jelent, így az RHFT még hosszú évtizedekig kielégíti az ország igényeit.

Bataapáti–Üveghuta térségében az alkalmas tárolóhely keresése során igen széleskörű vizsgálatokra került sor már a 90-es évek közepétől. (A létesítést célzó Nemzeti Projektről 1993-ban született döntés.) A MÁFI 1998-ban rögzítette, hogy a terület alkalmas a kis és közepes aktivitású radio-

aktív hulladékok végleges elhelyezésére. 1999-ban a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) is vizsgálatot indított a helyszín kiválasztásával kapcsolatban. Az ELGI és a MÁFI is tevékenyen részt vett a kutatások egész arzenálját – szeizmikus, paleomágneses és különböző elektromágneses stb. – kutatásokban. 2003-ban a felszíni földtani kutatás zárójelentése alapján a Magyar Geológiai Szolgálat Dél-dunántúli Területi Hivatala elfogadta az üveghutai telephely alkalmasságát. (És hogy mennyire figyelembe vették a lakosság véleményét is: 2005-ben Bábaapátiban véleménynyilvánító népszavazást tartottak a tároló megépítéséről – 75%-os részvétel mellett az igenre szavazók aránya csaknem 91% volt!) A föld alatti kutatási munkák 2005-ben a két lejtakna mélyítésével kezdődtek. A végső engedélyeket a *Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT)* létrehozására 2007-ben a Közép-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség, illetve 2008-ban az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat adta ki. Az NRHT felszíni létesítményei még abban az évben elkészültek, a vágathajtás pedig 2010-ben kezdődött. Ekkor eljött 2012 decembere, amikor hivatalosan átadták a tárolót és levitték az első hulladékcsomagot. (A hulladékot 200 literes fémhordókban speciális szállító teherautó viszi Bábaapátiba, ahol a hordók átvétele történik és a föld alatti tárolás technológiai előkészítését végzik. A végleges tárolásra kész hordók biztonságosan lezárt betonkonténerekbe kerülnek, amelyeket speciális szállítójármű visz le a 250 m mélyben levő tárolókamrába. Ma már több mint 160 konténer nyugszik végleges helyén.)

Jelenleg két tárolókamra áll rendelkezésre, ahol évtizedekig tudják fogadni a kis és közepes aktivitású erőművi hulladékokat. A további kamrák elkészítése, beleértve az előkészítési, engedélyezési és végrehajtási lépéseket is, követi az atomerőmű igényeit.

A nagy aktivitású hulladékok tárolásának problémájára jelent megoldást a *Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója (KKÁT)* Pakson.

A paksi atomerőmű műszaki tervének elfogadásakor az érvényes előirányzat az volt, hogy az erőmű pihentető medencében tárolt kiégett üzemanyag-kazettákat 3 éves pihentetés után a Szovjetunió térítésmentesen visszafogadja. Az erőmű első blokkjának üzembe helyezését követően a visszaszállítási feltételeket a Szovjetunió egyoldalúan módosította. Ezek szerint a szükséges pihentetési időt öt évre emelték, és a visszaszállítás fogadásáért mint szolgáltatásért egyre növekvő árat kértek. Az erőmű annak érdekében, hogy az új feltételeknek eleget tegyen, a pihentető medencék tárolókapacitását megkétszerezte. 1989–1998 között 2331 db kiégett üzemanyagköteg került vissza a Szovjetunióba (később Oroszországba).

A visszaszállítások körül jelentkező problémák hatására a paksi atomerőmű szakemberei vizsgálni kezdték a kiégett kazetták tárolásával, feldolgozásával és elhelyezésével kapcsolatos alternatív lehetőségeket, majd egy moduláris, kamrás kialakítású száraz tárolólétesítmény mellett döntöttek. 1992 szeptemberében a paksi atomerőmű szerződést kötött az angol GEC Alstommal a létesítmény megépítésére.

E konstrukció egyik előnye, hogy a kiégett kazetták hűtését természetes kéményhatás biztosítja, valamint a tároló a moduláris kialakítás következtében az igények szerint bővíthető.

A kazetták legalább 50 éves tárolását biztosítani képes létesítmény első három kamrából álló modulja és a kiszolgáló épület 1997-re épült meg. Ezt követően egy-egy négy kamrából álló modul adtak át 2000-ben és 2003-ban, majd megtörtént az újabb öt kamrából álló fázis építésének befejezése 2007-ben. 2012-ben elkészült a KKÁT 17–20. kamrája. Ezen kamrák tárolókapacitását 450-ről 527-re emelték, így a tároló összesen 9308 kazetta befogadására alkalmas.

A Nemzeti Projekt a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésén kívül természetesen foglalkozott a nagy aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésének feladatával is: kibővült a Nyugat-Mecsekben található *Bodai Aleurolit Formáció (BAF)*, amely a mecseki uránbánya része) vizsgálatával, majd egy önálló kutatási program keretében folytatódott. A vizsgálatok 1998 végén befejeződtek. A zárójelentés szerint nem merült fel olyan körülmény, amely a BAF-ban történő nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezését lehetetlenné teszi. Ennek hatására előterjesztés készült egy föld alatti kutatóbázis létesítésére, a BAF minősítésére és további kutatására. A gazdasági miniszter azonban 1999 nyarán elvetette a javaslatot. Ezzel egyidejűleg az uránbánya eredeti terv szerinti bezárásának folytatására is döntés született.

2003-ban újraindult a nagy aktivitású hulladékok elhelyezését célzó kutatási program a Nyugat-Mecsekben. A nagy aktivitású és hosszú élettartamú radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére új Kutatási Programot dolgoztak ki, melyet a OAH-t felügyelő miniszter jóváhagyott. A jóváhagyott Kutatási Program alapján 2003-ban vizsgálatok kezdődtek egy föld alatti laboratórium helyszínének kiválasztására, ezen belül megteremtődött a kutatások informatikai háttere (adatbázis, térinformatikai rendszer), és elkészült a felszín alatti földtani kutatások terve.

2004-ben megszületett a nagy aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére vonatkozó, 2008-ban pedig a kutatás hosszú távú programjáról szóló koncepcióterv. 2010-ben zárult le a kutatás I. fázisának 1. szakasza. 2014-ben tervezik a kutatások újraindítását a Nyugat-Mecsekben. A tervek szerint 12 mély- és 2 sekélyfúrást végeznének el a következő kutatási fázisban, a 14 fúrás összesített hossza pedig több mint 10 kilométer lenne. A legmélyebb fúrások 1300–1600 m mélyre hatolnának le, a kőzet elemzéséhez a felszínen kiásott kutatóárok hossza pedig 1 km hosszúságot tenne ki. 2030-ra szeretnék kijelölni a föld alatti laboratórium pontos helyét. A térségben előbb egy mélygeológiai laboratóriumot építenének, majd itt alakítanák ki azt a tárolót, amely a paksi atomerőműben keletkezett kiégett fűtőelemek és nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezésére szolgálna.

Ezekben a munkákban – valamennyi helyszín geofizikai és geológiai kutatásában – a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI), valamint két jogelődje, az Eötvös Loránd

Geofizikai Intézet (ELGI) és a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) igen jelentős erővel vett részt.

A jelen és jövő időt illetően egyetlen mondat írható: az MFGI tárgyal, és folyamatban van, hogy a BAF projektben történő közreműködésének körülményeit tisztázza.

2014 januárjában tartotta évindító sajtótájékoztatóját az Országos Atomenergia Hivatal (OAH). Fichtinger Gyula főigazgató elmondta: az eddigieknél is fontosabbá vált az atomenergia biztonságos alkalmazásának kérdése az üzemidő-hosszabbítás és a tervezett új blokkok miatt. Kiemelte: a „Biztonság mindenekelőtt!” mottó jelzi, hogy az OAH tevékenységét mennyire meghatározza a biztonság kérdésköre, a hatósági feladatok ellátásától kezdve a nemzetközi együttműködések keresztül a tájékoztatásig. Elmondta, hogy a paksi 1. blokk üzemidejének meghosszabbítása 2032-ig megtörtént, a 2. blokkra vonatkozó kérelem beérkezett. Az OAH bevonta a vizsgálatokba a környezetvédelmi szakhatóságot is. A hivatalnak 2014 végéig kell döntést hoznia.

Az OAH a paksi atomerőmű új blokkjainak létesítésére történő felkészülés keretében felülvizsgálta és az aktuális nemzetközi gyakorlattal összehangban kiegészítette, megújította a nukleáris biztonsági és védetség követelményeket. Ennek köszönhetően a jogi szabályozás már vonatkozik az új atomerőművek létesítésére is. Az OAH megkezdte a lehetséges szállítók által megajánlott erőműtípusok általános műszaki jellemzőinek megismerését, továbbá az új blokkok hatósági felügyeletéhez szükséges szaktudás és létszám meghatározását is.

(Újságírói kérdésként elhangzott: a 2014 januárjában Orbán Viktor magyar miniszterelnök és Vlagyimir Putyin orosz elnök által aláírt megállapodást megelőzően a magyar kormány kikérte-e az Országos Atomenergia Hivatal – mint a Magyarországon leginkább illetékes szakmai szerv – véleményét, illetve a magyar miniszterelnök milyen szakvélemények alapján döntött az orosz fél mellett, nem vizsgálva a világ többi, legalább 4-5 potenciális erőműszállítójának lehetőségeit? Fichtinger Gyula főigazgató rövid és egyértelmű válasza ez volt: az OAH véleményét a kormány nem kérte ki, de ez nem is feladata...)

Pakson az Európai Bizottság (EB) felkérésének eleget téve végezték el a célzott biztonsági felülvizsgálatot („stressz teszt”). A fukushimai atomerőmű-baleset hatására elrendelt vizsgálat következtetése, hogy a paksi atomerőmű ellenálló képessége megfelelő a feltételezhető negatív következményekkel járó eseményekkel, a külső veszélyeztető tényezőkkel szemben. Így az energiatermelő egységben a biztonságos üzemvitel fenntartásához azonnali beavatkozásra nincs szükség. Az erőmű megfelelő védelemmel rendelkezik a földrengések ellen, a Duna áradása a telephelyet – annak magasabb elhelyezkedése és kialakítása miatt – nem veszélyezteti, és a folyó rendkívül alacsony vízszintjének bekövetkeztét az erőmű megfelelő műszaki felkészültséggel, biztonságosan tudja kezelni. A vizsgált meteorológiai eredetű különleges esetek nem okozhatnak számottevő kárt a létesítményben. Az áramellátás vagy hűtővízellátás kimaradása esetére a reaktorok hűtéséhez a rendelkezésre

álló tartalékok elegendők. Természetesen szükség van kisebb, de a nukleáris biztonságot lényegesen nem befolyásoló módosításokra is. E munkákat folyamatosan végzik.

Lényeges változás, hogy a radioaktív hulladék-tárolók hatósági felügyelete 2014. június 30-tól az OAH hatáskörébe kerül. Ez azt jelenti, hogy a radioaktív hulladék-tárolók telephely-kiválasztásának, üzemeltetésének, átalakításának és lezárásának engedélyezési és ellenőrzési feladatait mind a biztonság, mind a védetség területén az OAH látja majd el.

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) tüzetesen átvilágította a nukleáris és radioaktív anyagok, valamint kapcsolódó létesítmények fizikai védelmének magyarországi rendszerét. A NAÜ szakértői számos jó gyakorlatot azonosítottak: az OAH szakemberei által az előkészítésre alkalmazott eljárást például az Amerikai Egyesült Államok nukleáris hatósága (USA NRC) követte.

Az OAH kiemelt fontosságúnak tartja a közvélemény pontos és hiteles tájékoztatását. 2013 végén az OAH javaslatára került sor az Atomtörvény olyan irányú módosítására, amely az átláthatóságot segíti elő. A törvény szabályozza azt is, hogy a hatóságnak mely eljárások során kell közmeghallgatást tartania. Ez a fórum lehetőséget biztosít a lakosság és a különböző szervezetek számára egy-egy adott ügy részleteinek megismerésére, véleményük kifejtésére. A lakosság tájékoztatását mintaszerűen oldják meg mind az erőmű, mind az egyes tárolóhelyek körül található településeken.

Tóth Lajos



A Paksról érkezett szállítmány elhelyezése a felszíni fogadóépületben (Bátaapáti, 2010)

Gayer Ferenc

1928–2014

Gayer Ferenc 1959. április 1-jén került az MTA Geofizikai Kutató Laboratóriumba (Sopron) gimnáziumi érettségi bizonyítvánnyal kutatási segéderői munkakörbe, és a fenti intézmény jogutódjától, az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetéből 1996. március 31-én ment nyugdíjba.

A fenti intézmények egyik legsokoldalúbban tevékenykedő és sokféle feladatot kiválóan ellátó munkatársa volt, akire a kutatók biztosan támaszkodhattak. Sokáig vezette az intézmény fotolaboratóriumát, tellurikus-magnetotellurikus terepi mérések szinte állandó résztvevője volt. Nemcsak a hazai, hanem a külföldi, így az Alpokban (Ausztria) végzett magnetotellu-



Gayer Ferenc
1928–2014

rikus mérésekben is segédkezett. Sok feladatot látott el az intézet Nagycenk melletti Széchenyi István Elektromágneses Obszervatóriumában is.

Feri mindig segítőkész, tevékeny és barátságos kolléga volt. Nyugdíjazása után is rendszeresen megjelent az egyesület évvégi záró rendezvényein is, így utoljára 2012-ben.

Emlékét a még élő, egykori nyugdíjas munkatársai különösen szeretettel őrzik meg.

Nyugodjék békében!

*MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai
Intézet (Sopron) munkatársai*

Rendezvénynaptár

2014. április		
2014. ápr. 6–9.	AAPG évi közgyűlés és kiállítás (www.aapg.org/houston2014/)	Houston, USA
2014. ápr. 7–10.	Földtudományok: beruházás a jövőbe – Saint Petersburg, 2014 (www.eage.org)	Szentpétervár, Oroszország
2014. ápr. 8.	Eötvös Loránd sírjának hagyományos koszorúzása a Kerepesi temetőben	Budapest
2014. ápr. 16.	„Földtudományi újdonságok” – 2014/1 előadóülés Az MFGI kiemelt kutatási témái (előadáscímek később, a honlapon)	Budapest, MFGI díszterem
2014. ápr. 21–25.	Mérnökgeofizika 2014 (www.eage.org)	Gelendszik, Oroszország
2014. ápr. 23.	Az MFGI nyílt napja a tanulóifjúság részére	Budapest, Stefánia út
2014. ápr. 23–25.	Fourth EAGE CO ₂ Geological Storage Workshop (www.eage.org)	Stavanger, Norvégia
2014. ápr. 24.	VIII. Bauxitnap – Bárdossy György tudománytörténeti emlékülés	Budapest, MFGI díszterem
2014. ápr. 24–27.	5th International Students Geological Conference (isgc2014.elte.hu)	ELTE Lágymányosi campus
2014. ápr. 25. 13:30 h	Az Egyesület évi rendes közgyűlése	MBFH konferenciaterem, Budapest, Columbus u.
2014. ápr. 27. – máj. 2.	Európai Geofizikai Unió (EGU) közgyűlése (www.egu2014.eu)	Bécs, Ausztria
2014. május		
2014. máj. 12–15.	Geoinformatics 2014 (www.eage.org)	Kiev, Ukrajna
2014. máj. 21.	„Földtudományi újdonságok” – 2014/2 előadóülés Az ELTE földtudományi tanszékeinek kiemelt kutatási témái (előadáscímek később, a honlapon)	Budapest, MFGI díszterem
2014. máj. 21–23.	6th Congress of Croatian and Hungarian Geomathematicians & 17th Congress of Hungarian Geomathematicians (www.geologija.hr/kongres_2014/)	Opatija, Horvátország
2014. június		
2014. jún. 4.	„Földtudományi újdonságok” – 2014/3 előadóülés Az MFGI kiemelt kutatási témái (folytatás; előadáscímek később, a honlapon)	Budapest, MFGI díszterem
2014. jún. 16–19.	76th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2014 – az EAGE éves kongresszusa és műszerkiállítása (www.eage.org)	Amszterdam, Hollandia

2014. augusztus		
2014. aug. 20–24.	HUNGEO 2014 – A magyar földtudományi szakemberek XII. találkozója (www.foldtan.hu)	Debreceni Egyetem
2014. szeptember		
2014. szept. 14–18.	Near Surface Geoscience, 2014 (www.eage.org)	Athén Görögország
2014. szept. 17–19.	30. Nemzetközi Olaj és Gázipari Konferencia (www.oilgasconf.montanpress.hu)	Siófok, Hotel Azúr
2014. szept. 24.	„Földtudományi újdonságok” – 2014/4 előadóülés Az MFGI kiemelt kutatási témái (előadáscímek később, a honlapon)	Budapest, MFGI díszterem
2014. október		
2014. okt. 6.	Inverziós Ankét	Miskolc Egyetemváros
2014. okt. 15.	„Földtudományi újdonságok” – 2014/5 előadóülés Az MFGI kiemelt kutatási témái (előadáscímek később, a honlapon)	Budapest, MFGI díszterem
2014. okt. 26–31.	SEG 84. évi közgyűlés és kiállítás (www.seg.org/events/)	Denver USA
2014. november		
2014. nov. 19.	„Földtudományi újdonságok” – 2014/6 előadóülés A Miskolci Egyetem kutatóinak előadóülése (előadáscímek a honlapon)	Budapest, MFGI díszterem

További részletek, referenciák a honlapról (www.mageof.hu) érhetők el.

Kakas Kristóf

Geofizikai adatfeldolgozás és -értelmezés



(Kilczér Gyula)

... anno ...



... az ötvenes években

(Németh Lajos)



MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

1145 Budapest, Columbus u. 17-23.; Tel./Fax: (1) 201-9815

E-mail: postmaster@mageof.t-online.hu; Honlap: www.mageof.hu