

# MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR  
GEOFIZIKUSOK  
EGYESÜLETÉNEK  
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE  
ASSOCIATION  
OF HUNGARIAN  
GEOPHYSICISTS

Tisztelet az éveknek

A Magyar Geofizikusok Egyesületének Alapszabályában szükségessé vált módosítások

Édesvíztárolók szivárgási paramétereinek meghatározása a Csókás-eljárás alkalmazásával

Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására

Magnetotellurikus adatok sorfejtéses inverziója

Új fejezet az Eötvös-ingával végzett magyarországi mérések és felhasználásuk történetében

Agocs-díj 2015

Hova tegyük a hulladékot?

Programajánló

In Memoriam:

Wallner Ákos      Berényi István

Gerzson István    Mészáros József

Tirkala Ferenc





# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

56. évfolyam (2015) 2. szám



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

### TARTALOM • CONTENTS

#### MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

- 63 Tisztelet az éveknek (Members of honoured ages) – *Hegybíró Zs.*
- 66 A Magyar Geofizikusok Egyesületének Alapszabályában szükségessé vált módosítások (Changes in the Memorandum of AHG) – *Szerkesztőség*

#### TANULMÁNYOK • PAPERS

- 70 Édesvíztárolók szivárgási paramétereinek meghatározása a Csókás-eljárás alkalmazásával (Filtration parameters of freshwater aquifers estimated from well logs using the Csókás method) – *Szabó N. P., Dobróka M., Hursán L.*
- 83 Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására (New factor-analysis-based statistical method used for hydraulic conductivity estimation) – *Szabó N. P.*
- 97 Magnetotellurikus adatok sorfejtéses inverziója (Series expansion inversion of magnetotelluric data) – *Prácser E., Dobróka M.*
- 108 Új fejezet az Eötvös-ingával végzett magyarországi mérések és felhasználásuk történetében (New chapter in the history of the Hungarian torsion balance measurements and their applications) – *Völgyesi L., Tóth Gy., Ultmann Z.*

#### HÍREK • NEWS

- 119 Agocs-díj 2015 (Agocs award 2015) – *Kis K.*
- 120 Hova tegyük a hulladékot? (Where to deposit the radioactive waste?) – *Tóth L.*
- 123 Programajánló (Lecture schedules) – *Horváth Zs.*

#### IN MEMORIAM

- 124 Wallner Ákos – *Varga P.*
- 125 Berényi István – *Pugner S.*
- 126 Gerzson István – *Várhegyi A.*
- 127 Mészáros József – *Müller P., Mészáros F.*
- 128 Tirkala Ferenc – *Müller P., Nagy Z.*

# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

56. évfolyam (2015) 2. 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: Horváth Zsolt

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

## Tisztelet az éveknek

Egyesületünkben egyre több tagunk éri el a szenior kort, és évről évre örömmel tapasztaljuk, hogy ez a korosztály továbbra is aktív, érdeklődik a szakmai hírek, események iránt, együttérzéssel és aggodással figyeli az intézményrendszer változásait, átalakulásait, és bizakodik abban, hogy a változások kedvező irányba vezetnek.

Éppen ezért ebben az évben sem mulaszthatjuk el, hogy köszöntsük minden idősebb tagtársunkat, különösen Önöket, akik kerek születésnapjukat ünnepelik. Jó egészséget, további sok örömet kívánunk családjuk, szeretteik körében, és várjuk Önöket minden összejövetelünkön, mert tudjuk, hogy szakmaszeretetük és a szívük elhozza Önöket.

*Hegybíró Zsuzsanna*  
az MGE nevében

### Köszöntjük

*90. születésnapja alkalmából:*

Nyitrai Tibor, Posgay Károly

*85. születésnapja alkalmából:*

Czeglédi István, Morvai László, Polhammer Manóné

*80. születésnapja alkalmából:*

Hursán László, Karas Gyuláné, Mileji Salamon Batur, Nagy Zoltánné,  
Paulik Dezső, Rybach László, Sággy György, Vida Zsolt

*75. születésnapja alkalmából:*

Albu István, Bella János, Ferenczy László, Mártonné Szalay Emőke,  
Nyerges Lajos, Ráner Géza, Verő László

*70. születésnapja alkalmából:*

Bihari Lászlóné, Dörnyei Piroska, Fejes Imréné, Göncz Gábor,  
Kulcsár László, Porosz Mihály, Regős Ferenc, Szili Györgyné,  
Tarrósyné Heinz Éva, Taska Csaba



Nyitrai Tibor



Posgay Károly



Czeglédi István



Polhammer Manóné



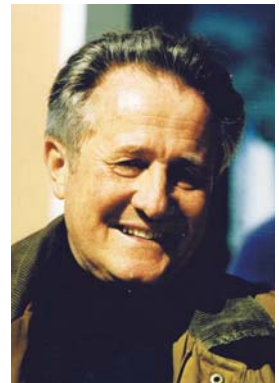
Hursán László



Nagy Zoltánné



Paulik Dezső



Rybach László



Sággy György



Vida Zsolt





Albu István



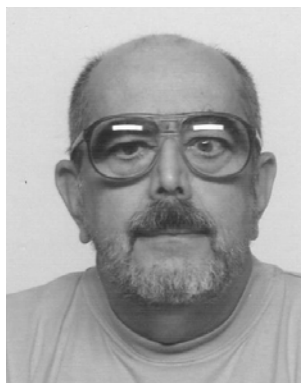
Mártonné Szalay Emőke



Nyerges Lajos



Ráner Géza



Verő László



Dörnyei Piroska



Porosz Mihály



Regős Ferenc



Szili Györgyné



Tarrósné Heinz Éva



Taska Csaba

# A Magyar Geofizikusok Egyesületének Alapszabályában szükségessé vált módosítások

A Magyar Geofizikusok Egyesületének Alapszabályát a törvényi előírásoknak megfelelően módosítani kellett. A következőkben csak a módosított paragrafusok módosított pontjait mutatjuk be a módosított szövegrészeket részletekkel pirossal kiemelve.

A módosítások:

## MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉ-*nek*

### a Polgári Törvénykönyvről szóló 2013. évi V. törvény előírásainak megfelelően módosított

#### 8.§. Az egyesületi tagság megszűnése

/2/ A tagnak a kilépési szándékát írásban kell benyújtania az Egyesület Titkárságán *az Egyesület Elnökéhez címzetten*. A nyilvántartásból való *kivezetés* az Elnökség hatásköre. A tagsági jogviszony megszűnésének időpontja a kilépési nyilatkozat Elnökséghez történő megérkezésének napja.

/6/ *Fegyelmi eljárás:*

A fegyelmi eljárást az Elnökség által ideiglenesen létrehozott háromtagú egyesületi Fegyelmi Bizottság folytatja le.

A Fegyelmi Bizottság a fegyelmi eljárás alá vont tagot az eljárás megindításáról írásban értesíti. A Fegyelmi Bizottságnak a fegyelmi eljárás alá vont tagot meg kell hallgatnia. A fegyelmi eljárás alá vont tag meghallgatása során véleményt nyilváníthat. A Fegyelmi Bizottság javaslata alapján *a Közgyűlés, illetve az Elnökség* – titkos szavazással, a jelenlévők kétharmados többségével - fegyelmi határozatot hoz, melynek indokolása tartalmazza a kizárás alapjául szolgáló tényeket és bizonyítékokat, továbbá a jogorvoslati lehetőségről való tájékoztatást. A fegyelmi eljárást lezáró határozatról az érintettet ajánlott-tértivevényes levélben kell értesíteni.

Kizárási határozat ellen a kizárt tag – *az erről szóló határozat kézhezvételét követő 15 napon belül* – a Közgyűléshez fellebbezéssel élhet, melynek a határozat végrehajtására halasztó hatálya van.

Kizárt tag újra felvételét a Közgyűlés engedélyezheti.

#### 10.§. A Közgyűlés

/2/ A Közgyűlés évenként egyszer, az év elején április hónapban ülésezik. Összehívásáról az Elnökség gondoskodik – a napirendet is tartalmazó – írásos meghívó igazolt módon történő kiküldésével.



*Az Egyesület nevét és székhelyét is tartalmazó írásos meghívót a hely, időpont napirend feltüntetésével legkésőbb a közgyűlést megelőző 14 nappal kell kiküldeni a tagok részére. Mellékelni kell a meghívóhoz a napirend fontosabb pontjaira vonatkozó írásos anyagot is*

*A Közgyűlésre szóló írásos meghívóban fel kell tüntetni a határozatképtelenség miatt az eredeti napirendi pontok megtárgyalására ismételten összehívott közgyűlés idejét és helyét, valamint a távolmaradás jogkövetkezményére (különösen a megismételt közgyűlés határozatképtelenségéről) vonatkozó tájékoztatást.*

*A Közgyűlés akkor határozatképes, ha azon az Egyesület tagjainak 50%-a + 1 fő megjelent.*

*A határozatképtelenség miatt elnapolt közgyűlés az eredeti napirendi pontok tekintetében a megjelent tagok számától függetlenül határozatképes.*

**A közgyűlés megnyitását követően elsődlegesen meg kell állapítani a határozatképességet, vagyis az aktuális taglétszámhoz képest a megjelent és szavazásra jogosult tagok számát. A közgyűlés a napirendi pontok tárgyalását megelőzően egyszerű szótöbbséggel, nyílt szavazással megválasztja a levezető elnök személyét, továbbá a jegyzőkönyvvezető és két jegyzőkönyv hitelesítő személyét, valamint szükség esetén a három fős szavazatszámláló bizottságot.**

A Közgyűlés lebonyolításának módját – **ideértve a napirend kiegészítését is** - az Egyesület ügyrendje tartalmazza.

/7/ A határozathozatalban nem **szavazhat** az a személy, aki vagy akinek közeli hozzátartozója, élettársa a határozat alapján:

a) kötelezettség vagy felelősség alól mentesül, **vagy a jogi személy terhére másfajta előnyben részesül;**

b) bármilyen más előnyben részesül, illetve a megkötendő jogügyletben egyébként érdekelt. Nem minősül jogelőnynek a tagsági viszony alapján nyújtott cél szerinti juttatás.

**c.) akivel a határozat szerint szerződést kell kötni;**

**d.) aki ellen a határozat alapján pert kell indítani;**

**e.) aki a döntésben érdekelt más szervezettel többségi befolyáson alapuló kapcsolatban áll;**

**f.) aki egyébként személyesen érdekelt a döntésben.**

## **11.§. Az Elnökség**

/1/ Az Egyesület ügyeit két Közgyűlés között **az Egyesület 11 tagból álló ügyvezető szerve,** az Elnökség intézi, amelynek tagjai:

- az elnök és a két alelnök,
- az általános titkár,
- a tudományos titkár,

- az Egyesület lapjának főszerkesztője,
- a területi csoportok elnökei

**/4/ Az Elnökség üléseit szükség szerint, de évente legalább egy alkalommal tartja. Az elnökségi ülést az elnök legalább 15 nappal az ülés időpontja előtt kiküldött meghívóval, elsődlegesen az Egyesület székhelyére hívja össze írásban, igazolható módon.**

**Az elnökségi ülésre szóló meghívó tartalmazza az egyesület nevét, székhelyét, az elnökségi ülés helyét, idejét és a javasolt napirendi pontokat. A napirendi pontokat a meghívóban legalább olyan részletezettséggel kell rögzíteni, hogy az elnökségi tagok álláspontjukat kialakíthassák.**

/5/ Az Elnökség minden esetben szavazattöbbséggel határoz. Szavazat egyenlőség esetén döntés nincs, a javaslat elvetettnek tekintendő. Határozathozatalkor nyílt – személyi kérdésekben titkos – szavazással dönt. A határozatképességhez az elnökségi tagok legalább 2/3-os, **azaz 7 (hét) fő** jelenléte szükséges.

A határozathozatalban nem vehet részt az a személy, aki vagy akinek közeli hozzátartozója, élettársa a határozat alapján:

- a) kötelezettség vagy felelősség alól mentesül, **vagy a jogi személy terhére másfajta előnyben részesül;**
- b) bármilyen más előnyben részesül, illetve a megkötendő jogügyletben egyébként érdekelt. Nem minősül jogelőnynek a tagsági viszony alapján nyújtott cél szerinti juttatás.
- c.) akivel a határozat szerint szerződést kell kötni;**
- d.) aki ellen a határozat alapján pert kell indítani;**
- e.) aki a döntésben érdekelt más szervezettel többségi befolyáson alapuló kapcsolatban áll;**
- f.) aki egyébként személyesen érdekelt a döntésben.**

## **12.§. Az Egyesület elnöke és alelnökei**

**/2/ Az elnök ellenőrzi a Közgyűlés és az Elnökség határozatainak végrehajtását, az üléseken elnököl, utalványoz és aláír.**

## **15.§. Felügyelő Bizottság (F.B.)**

/10/ Az Felügyelő Bizottság üléseit annak elnöke hívja össze. Az írásos meghívót a hely, időpont, napirend feltüntetésével legkésőbb az ülést megelőző 10 nappal ki kell küldeni. Mellékelni kell a meghívóhoz a napirend fontosabb pontjaira vonatkozó írásos anyagot is.

A Felügyelő Bizottság üléseinek határozatképességéhez a tagok 2/3 jelenléte szükséges. Az Felügyelő Bizottság határozatait nyílt – személyi kérdésekben titkos –, egyszerű szótöbbséggel, két felügyelő bizottsági tag jelenléte esetén egyhangúan hozott szavazással hozza. Szavazat egyenlőség esetén döntés nincs, a javaslat elvetettnek tekintendő.

## 21.§. Záró rendelkezések

/1/ Az Egyesület tevékenysége felett – az Egyesületi törvény előírásai szerint – a törvényességi ellenőrzést az ügyészség gyakorolja.

Jelen – a Fővárosi Törvényszék 13.Pk.60.441/1989/77. sz. végzésében előirt módosításokkal – egységes szerkezetbe foglalt Alapszabályt a 2015. augusztus 04-én tartott közgyűlés egyhangúlag – ellenszavazat és tartózkodás nélkül – hozott határozatával elfogadta.

Az aktuális módosítások elfogadásukkal egy időben hatályba léptek.

Budapest, 2015. augusztus 04.

Dr. Fancsik Tamás  
elnök

*Alulírott, Dr. Fancsik Tamás, mint a Magyar Geofizikusok Egyesületének elnöke ezúton igazolom, hogy a Magyar Geofizikusok Egyesületének a jelen új egységes szerkezetű Alapszabály elkészítésére az Egyesület 2014. április 24-én kelt egységes szerkezetű Alapszabályának a Fővárosi Törvényszék 13.Pk,60.441/1989/77 számú végzésében előirt felhívás adott okot az Alapszabály 8. § (2), (6) bekezdéseket, a 10. § (2), (7) bekezdéseket, a 11. § (1), (4)-(5) bekezdéseket, 12. § (2) bekezdést, a 15. § (10) bekezdést, és a 21. § (1) bekezdést érintően.*

*Alulírott Dr. Fancsik Tamás, mint a Magyar Geofizikusok Egyesületének elnöke 2011 évi CLXXXI tv. 38. § (2) bekezdésében foglalt törvényi rendelkezésnek megfelelően igazolom, hogy a Magyar Geofizikusok Egyesülete 2015. augusztus 04-én kelt egységes szerkezetbe foglalt „ALAPSZABÁLY” szövege – amely a 2015. augusztus 04-én tartott Közgyűlés által elfogadott módosításokat vastagon szedett dőlt betűs, aláhúzott szövegrésszel tünteti fel - megfelel az alapszabály-módosítások alapján hatályos tartalmának.*

Budapest, 2015. augusztus 04.

Dr. Fancsik Tamás  
elnök

Ellenjegyezte, Budapest, 2015. augusztus 04.

Dr. Ferencz Lujza  
ügyvéd  
mint a Magyar Geofizikusok Egyesülete  
meghatalmazott jogi képviselője

# Édesvíztárolók szivárgási paramétereinek meghatározása a Csókás-eljárás alkalmazásával

SZABÓ N. P.<sup>1,2,@</sup>, DOBRÓKA M.<sup>1,2</sup>, HURSÁN L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

<sup>2</sup>MTA–ME, Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

@E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

Csókás János (1918–2000) a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének egykori professzora 1995-ben publikált a szivárgási tényező, a vízhozam- és egyéb vízminőségi paraméterek meghatározására alkalmas karotázskiértékelési eljárást. A módszer laza törmelékes, üledékes kőzetekben alkalmazható, mely a nukleáris és fajlagosellenállás-adatok alapján a szemcseátmérők ismerete nélkül adja meg a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A tanulmányban összehasonlítást végzünk a standard Kozeny–Carman- és a Csókás-modell között. Ennek keretében szintetikus adatok feldolgozásával megvizsgáljuk a módszer pontosságát és zajérzékenységét. Majd terepi szelvényadatok felhasználásával bemutatjuk, hogy a Csókás-eljárással és a magadatokon alapuló Kozeny–Carman-módszerrel becsült szivárgásitényező-értékek jól korrelálnak. A Csókás-eljárással kapott eredményeket megerősítik a Hazen-formula alapján számított tapasztalati és a feltárási faktoranalízisen alapuló többváltozós statisztikai kiértékelési eredmények is. A Csókás-eljárás és a faktoranalízis együttes alkalmazásával meghatározzuk néhány kőzetfizikai paraméter és a szivárgási tényező *in situ* regressziós kapcsolatát. Csókás professzor alapvető törekvése az volt, hogy a víztárolók vizsgálatához szükséges kőzetfizikai és szivárgási paramétereket a fúróluk-szelvényekből származtassa. Ezt az alapgondolatot követve a módszer továbbfejlesztése ma is aktuális lehet. Az eljárás bemenő paramétereit ugyanis a korszerű mérések alapján pontosabban határozhatjuk meg, amivel tovább javíthatjuk a kiértékelés hatékonyságát a tárolókőzetek kutatása és az édesvízkészletek kitermelése során.

## Szabó, N. P., Dobróka, M., Hursán, L.: Filtration parameters of freshwater aquifers estimated from well logs using the Csókás method

János Csókás (1918–2000), professor of the Department of Geophysics, University of Miskolc, published a well-logging interpretation method suitable for the determination of hydraulic conductivity, rate of water flow and other water quality parameters in 1995. The method can be applied in loose clastic sedimentary rocks, which provides the continuous log of hydraulic conductivity based on nuclear logging and resistivity data without knowing the grain sizes. In this study, a comparison between the standard Kozeny–Carman and the Csókás model is made. In its framework, the accuracy and noise sensitivity of the method is tested by processing of synthetic data. A good correlation between hydraulic conductivity estimated by the Csókás procedure and core data underlying the Kozeny–Carman method is shown on real well-logging data. Those of the empirical Hazen formula as well as a multivariate statistical method using factor analysis verify the results obtained with the Csókás method. During the field experiments, regression relations between some petrophysical parameters and hydraulic conductivity are revealed by the cooperative application of the Csókás method and factor analysis. The pursuit of Csókás professor was that the petrophysical and hydraulic parameters necessary for the investigation of groundwater reservoirs should be obtained only from well logs. Following this basic idea, the recent development of the method could be still actual. Since advanced instruments can measure the input parameters of the procedure more accurately the efficiency of interpretation can be further improved during the exploration of aquifers and the efficient exploitation of freshwater resources.

*Béérkezett:* 2015. július 29.; *elfogadva:* 2015. szeptember 16.

## Bevezetés

A szivárgási tényező a hidrogeológiai kutatás egyik kulcsparamétere, mely egységnyi hidraulikus gradiens esetén megszabja, hogy az adott kőzetben a víz milyen sebességgel szivárog. A szivárgási tényező egyaránt jellemzi a pórusfolyadékot és a kőzetet, mivel elsődleges porozitású kőzetekben függ a pórusvíz sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcsemérettől, a porozitástól (agyagtartalomtól) és a víztelítettségtől. A hagyományos labormérések és próbaszivattyúzások általában helyi információt szolgáltatnak, melynek kiterjesztését a fúrás teljes hosszára vagy egy nagyobb területre a geofizikai mérésekkel valósíthatjuk meg. A felszíni geofizikai módszerek alkalmazásával néhány olyan kapcsolódó paraméter (elektromos vezetőképesség, szeizmikus sebesség,  $T_2$  lecsengési idő) meghatározható, melyből a szivárgási tényező területi változására lehet következtetni. E módszereket Rubin és Hubbard (2005) és Kirsch (2009) könyveikben részletesen tárgyalják. A szivárgási jellemzők vertikális eloszlását a fúróluk-geofizikai mérésekkel tudjuk nyomon követni. Ezek előnye a számos fizikai jellemző *in situ* megfigyelése és a nagy adatsűrűség, ahol az értelmezést kevésbé terheli a többértelműség problémája, mint a felszíni geofizikai módszerek esetében. Több fúrás adatrendszerének együttes feldolgozásával és a felszíni geofizikai mérések bevonásával a fúrások közötti korreláció is megvalósítható. A különböző forrásból kapott szivárgási tényezők hasonlóságának és kiterjeszhetőségének kérdését Zilahi-Sebess és szerzőtársai (2007) vizsgálták.

A fúróluk-szelvényezési módszereket széles körben használják az ásvány- és fluidumkutatásban (Serra 1984). Hidrogeofizikai problémák megoldásakor a szelvényértelmezők legfőbb feladata a víztároló rétegek vastagságának, porozitásának, víztelítettségének (néhol a gáztelítettségnek), agyagosságának, kőzetmatrix-térfogatának és a szivárgási tényezőjének meghatározása. Szinte valamennyi, szénhidrogén-kutatásban használatos szelvényezési módszer felhasználható a vízkutatásban (Alger, Harrison 1987). A természetes gamma- intenzitás-, természetespotenciál- és fajlagosellenállás-szelvényeket közzétani azonosításra, a rétegvastagság és az agyagtartalom meghatározására használjuk. A porozitás meghatározására nukleáris (sűrűség- és neutron-porozitás-) szelvényezést alkalmazunk. Többféle, különböző behatolási mélységgel és vertikális felbontóképességgel rendelkező fajlagosellenállás-szonda használható a fúróluk körüli elárasztási profil és a víztelítettség meghatározására. A szelvényezési programok általában technikai méréseket is tartalmaznak, melyek hasznos információval szolgálnak a fúróluk átmérőjéről, a pórusfolyadék nyomásáról, a hőmérséklet-eloszlásról, a termelvény áramlási sebességéről és összetételéről. Az akusztikus lyuktelevízió a lyukfal állapotáról tájékoztat, és repedezett kőzetekben a szerkezeti elemek azonosítására használjuk. A hagyományos szelvényezési technikák mellett korszerű eszközök is bevonhatók a víztároló rétegek kiértékelésébe. Például a pórustérben szabadon áramló víztérfogat, pórusméret-eloszlás és a szivárgási tényező meghatározására fejlesztették ki a

nukleáris mágnesesrezonancia (NMR) módszer speciális szondáját (Walsh et al. 2013). Az olajipari szondákkal mért NMR adatokból a pórusfolyadék viszkozitása is származtatható (Allen et al. 1997). A fenti módszerek segítségével néhány kőzetfizikai mennyiség viszonylag nagy pontossággal kiszámítható, például a porozitás és az agyagtartalom általában néhány százalékos hibával becsülhető. Ezzel szemben a szivárgási tényező becslési hibája elérheti az egy/(másfél) nagyságrendet, így a fúróluk-szelvényekkel elsősorban a hidraulikus vezetőképesség megváltozását határozhatjuk meg.

Konzolidálatlan törmelékeny üledékek szivárgási tényezőjének számításához a porozitás és a szemcseátmérek előzetes ismerete szükséges. Geofizikai mérések hiányában általában a kütteszt- vagy kőzetmagokon mért laboradatokat használják fel és terjesztik ki a kutatási területre. Számos regressziós összefüggés ismeretes, például a porozitás, kötött víztelítettség és a permeabilitás vagy a Stoneley-féle hullámterjedési sebesség és a permeabilitás között, azonban ezek megfelelő alkalmazásához pontosan ismernünk kell a helyi regressziós együtthatókat. A sűrű magmintavétel elkerülése érdekében Csókás (1995) kidolgozott egy karotázskiértékelési eljárást, mely kizárólag a fúróluk-szelvényekből becsüli a permeabilitást és a szivárgási tényezőt. A szerző e módszert a konszolidálatlan édesvíztárolók esetére ajánlotta. Felhasználva Alger (1971) kísérleteit, a Hazen-féle effektív szemcseátmérőt kapcsolatba hozhatjuk a formációtényezővel, mely utóbbi a karotázsmérésekkel közvetlenül meghatározható. A Csókás-formula a víztárolók valódi fajlagos ellenállását és porozitását tartalmazza, melyből a szivárgási tényező a fúróluk teljes hosszára becsülhető. Emellett lehetőséget ad a fajlagos felület, a kritikus áramlási sebesség és a szűrő műszaki adatainak ismeretében a maximális homokmentes vízhozam számítására. E paraméterek ismeretében a felszín alatti vizek kitermelésére a legalkalmasabb eljárás kiválasztható.

Csókás professzor munkájának folytatásaként e tanulmányban összehasonlító vizsgálatot végzünk az általa kidolgozott eljárás és a szemeloszlás-adatok ismeretén alapuló Kozeny–Carman-módszer között. Elsőként szintetikus adatok felhasználásával a paraméterbecslés pontosságát és zajérzékenységét vizsgáljuk. A Jászberényi Vízmű egy fúrásában mért adatrendszer újrafeldolgozva elvégezzük a fenti modellek közötti összehasonlítást. Továbbá a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban bemutatjuk, hogy a Csókás-eljárással becsült szivárgási-tényező-szelvény jól korrelál a Kozeny–Carman-modell alapján meghatározott eredményekkel. A szelvényadatok együttes statisztikai feldolgozásával is foglalkozunk. A Csókás-módszerrel és a faktoranalízissel nyert értelmezési eredményeket a magmintákon végzett mérések hitelesítik. A faktoranalízis lehetőséget teremt az agyagtartalom és a szivárgási tényező független eljárással történő becslésére. Ennek alapján megadjuk a baktalórántházi területen a kőzetfizikai paraméterek és a szivárgási tényező regressziós kapcsolatát és a korrelációs együtthatókat. Az eredmények erős korrelációt mutatnak a szivárgási tényező és a kőzetfizikai mennyiségek között.

## Szelvényértelmezés a Kozeny–Carman-modell alapján

A Darcy-egyenlet a hidrogeológia egyik alapegyenlete, amely a folyadék áramlását írja le porózus közegben:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{k}{\Phi \mu} \nabla p, \quad (1)$$

ahol  $k$  ( $\text{m}^2$ ) jelöli a kőzet permeabilitását,  $\Phi$  a porozitást,  $\mu$  ( $\text{Ns/m}^2$ ) a dinamikai viszkozitást,  $\mathbf{u}$  ( $\text{m}$ ) a folyadék relativ-elmozdulás-vektorát,  $t$  ( $\text{s}$ ) az időt és  $p$  ( $\text{N/m}^2$ ) a pórusnyomást. A szivárgási tényező  $K = k\rho g/\mu$  ( $\text{m/s}$ ) mint származtatott mennyiség kifejezi, hogy milyen sebességgel képes a folyadék átáramolni a pórusrésben. A szivárgási tényező egyaránt függ a kőzetmátrix és a pórusvíz tulajdonságaitól, a rétegvíz  $\rho_w$  ( $\text{g/cm}^3$ ) sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcseméret-eloszlástól, a porozitástól, a víztelítettségtől ( $S_w$ ) és a  $g$  ( $\text{cm/s}^2$ ) a nehézségi gyorsulástól.

A szivárgási tényező és a szemcseméret kapcsolatát elsőként Hazen (1892) írta le:

$$K = C_H d_{10}^2, \quad (2)$$

ahol  $C_H$  a Hazen-féle együttható (0,4–10 közötti érték) és  $d_{10}$  ( $\text{mm}$ ) a mértékadó (effektív) szemcseátmérő, melynél a teljes minta súlyának egy tizede finomabb szemcséket tartalmaz. A Kozeny-egyenlet (1927) (2)-nél megbízhatóbb becslést ad, ezt később Carman (1937) módosította. A Kozeny–Carman-egyenlet szerint a szemcséközi porozitású kőzet egy kapilláriscsatornákból álló rendszernek tekinthető, amelyben a Navier–Stokes-egyenlet érvényesül. A Kozeny–Carman-egyenletet mint standard modellt széles körben használják a vízáradó rétegek szivárgási tényezőjének becslésére (Bear 1972)

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{d^2}{180} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2}, \quad (3)$$

ahol  $d$  ( $\text{cm}$ ) a hatékony szemcseátmérő ( $K$  mértékegysége  $\text{cm/s}$ ). A (3) egyenlet  $\Phi^3/(1-\Phi)^2$  tagja a kőzet tömörségével van összefüggésben. A hatékony szemcseátmérő annak a homodiszperz gömbhalmaznak az átmérője, melyből felépített azonos tömörségű szemcsék felülete az adott szemcseméret-eloszlású (eredeti) mintáéval egyezik meg. A fúrásokból vett kőzetmintákat felhasználva a hatékony (domináns) szemcseátmérő a szemeloszlási görbék nevezetes értékeiből megbecsülhető (Juhász 2002):

$$d = \frac{d_{10} + d_{60}}{2} \sqrt{\frac{d_{10}}{d_{60}}}, \quad (4)$$

ahol  $d_{10}$  ( $\text{cm}$ ) és  $d_{60}$  ( $\text{cm}$ ) a 10% és 60%-os kumulatív gyakorisághoz tartozó szemcseátmérő. A (3) egyenletben szereplő porozitást karotázsszelvényekből származtatjuk. Az édesvízzel teljesen telített ( $S_w = 1$ ) agyagos homokrétegek effektív porozitása – a levegőteltettséget tartalmazó kifejezést elhanyagolva – a gamma–gamma mérésből számítható:

$$\Phi = \frac{\rho_{sd} + V_{sh}(\rho_{sh} - \rho_{sd}) - \rho_b}{\rho_{sd} - 1}, \quad (5)$$

ahol  $\rho_b$  ( $\text{g/cm}^3$ ) a szondával mért kőzetsűrűség,  $\rho_{sd}$  ( $\text{g/cm}^3$ ) és  $\rho_{sh}$  ( $\text{g/cm}^3$ ) a homok és az agyag sűrűségét jelölik. Az (5) egyenletben szereplő agyagtartalom fiatal üledékes közetekben az alábbi tapasztalati egyenletből számítható (Larionov 1969):

$$V_{sh} = 0,083 \left[ 2^{3,7 \left( \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \right)} - 1 \right], \quad (6)$$

ahol  $GR$  (cps) a természetes gamma-sugárzás intenzitása,  $GR_{\min}$  (cps) és  $GR_{\max}$  (cps) a természetes gamma-szelvény szélső értékei a víztároló szakaszon. A (6) egyenlet nem függ a pórusvíz tulajdonságaitól, azonban a kiértékelésnél óvatosságot igényelnek olyan kőzetek, melyek radioaktív, nem agyag típusú ásványokat, illetve uránban vagy tóriumban gazdag vízzel kitöltött repedéseket tartalmaznak.

A hatékony szemcseátmérő és a porozitás kapcsolatának meghatározása után a (3)–(6) egyenletet alkalmazva egy, a folytonos szivárgási tényezőt leíró görbét kapunk a teljes szelvényezett szakaszon. A fenti módszer a kőzetfizikai mennyiségeket a szelvények egyedi feldolgozásával (több, egymástól független lépésben) származtatja. Azonban léteznek ennél fejlettebb módszerek is, melyek a bemenő petrofizikai jellemzőket egy közös eljárásban határozzák meg. Ha az ismeretlenek száma egyenlő a megfigyelt szelvények számával, a szonda válaszfüggvényei lineáris egyenletrendszerként kezelhetők, amelyeket grafikusán vagy numerikusán is meg lehet oldani. Ha az ismeretlenek számánál több adattípust mérünk, általában valamilyen statisztikus vagy inverziós eljárás használható a kőzetfizikai paraméterek kinyerésére. Inverz modellezés alkalmazása esetén a modellparamétereket (porozitás, víztelítettség, agyagtartalom, mátrix részarány) közös optimalizációs eljárásban becsüljük meg (Drahos 2005). Az inverz modellezésnek további előnye, hogy a kőzetfizikai paraméterek becslési hibáit is megadja, amelyekkel az inverziós eredmények pontosságát és megbízhatóságát számszerűen jellemezhetjük (Menke 1984).

## A Csókás-eljárás bemutatása

A Csókás-formula a (3) egyenlet empirikusan módosított formája, mely az édesvízzel telített laza törmelékeny kőzetek mértékadó szemcseátmérője és formációtényezője közötti összefüggésen alapul. Ezt a kapcsolatot Alger (1971) írta le, aki összekapcsolta az effektív szemcseátmérőt az Archie-féle formációfaktoral, ezzel hidat képezve a vízáradó rétegek szivárgási tényezője és a karotázsmérések között.

A vízzel telített kőzetek formációtényezője ( $F$ ) a kőzet  $R_0$  (ohmm) és a pórusvíz  $R_w$  (ohmm) fajlagos ellenállásának arányával adható meg:

$$F = R_0/R_w. \quad (7)$$

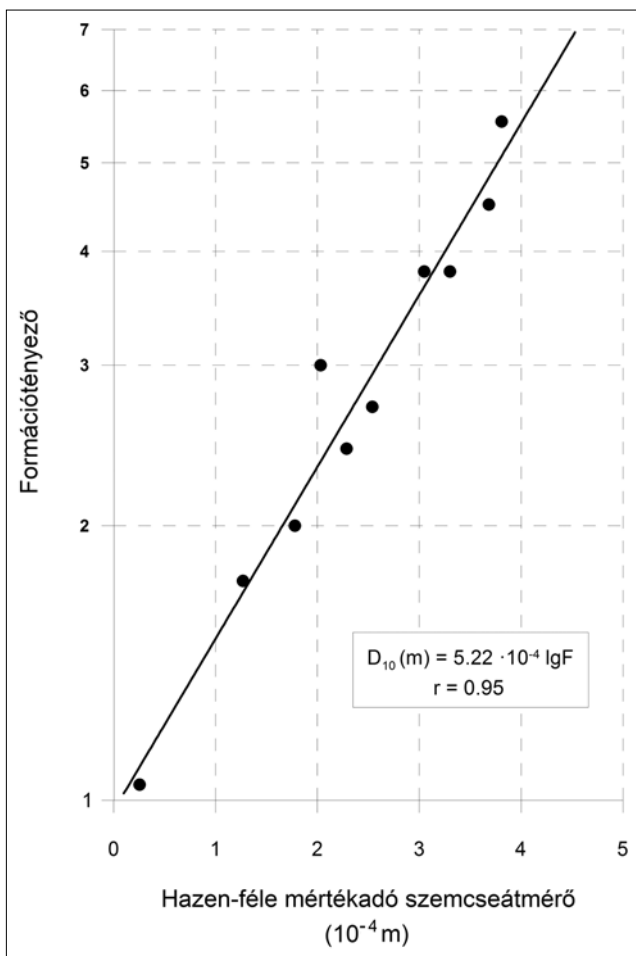
Alger (1971) egyenes arányosságot talált a formációtényező és az édesvízzel telített üledékek laboratóriumban meghatározott szemcseátmérője között, ami ellentétben azzal



a megfigyeléssel, amelyet a szénhidrogén-mezők esetén tapasztalunk (sós vízzel telített tárolók). E megfigyelések alapján a szitaelemzéssel meghatározott Hazen-féle effektív szemcseátmérő az alábbi összefüggésben áll konszolidálatlan üledékek formációtényezőjével:

$$d_{10} = C_d \lg F, \quad (8)$$

ahol  $C_d$  állandó javasolt értéke  $5,22 \cdot 10^{-4}$  (m). A (8) egyenlet  $F \leq 10$  formációtényezőjű, nem túl rosszul osztályozott üledékek esetén érvényes. E követelmény a felszínközeli törmelékeny víztároló rétegeknél általában teljesül. Vizsgálatai alapján Alger (1971) különböző típusú fúróluk-szelvényezési módszerek olajiparból való átvételét javasolta, aminek megfelelően azok adaptálhatók az édesvíztároló agyagos homokok kiértékelésében. A (8) regressziós kapcsolatot az 1. ábra szemlélteti, ahol a Pearson-féle korrelációs együttható  $r = \text{cov}(d_{10}, F) / (\sigma_{d_{10}} \sigma_F)$  szoros kapcsolatot mutat a fenti változók között. A domináns szemcseátmérőt más forrásból is megadhatjuk. Az  $U = d_{60}/d_{10}$  egyenlőtlenségi együttható mint alakparaméter a szemeloszlás-görbét jellemzi, és számszerűsíti a szemcsék osztályozottságának mértékét. Kovács (1972) homokok egyenlőtlenségi együtthatóját kapcsolatba hozta a hatékony szemcseátmérő-



1. ábra A mértékadó szemcseátmérő és a formációtényező kapcsolata édesvíztároló üledékekben

Figure 1 Alger's empirical relation between formation factor and Hazen's effective grain-size in freshwater-bearing sediments

vel:  $d/d_{10} = 1,919 \lg U + 1$ . Rosszul osztályozott üledékeknel ( $U > 5$ ) az  $U$  mennyiség fordítottan arányos a szivárgási tényező logaritmusával. Jól osztályozott homokokra ( $2.0 \leq U \leq 2.5$ ) az előző egyenlet

$$d = 1,671 d_{10} \quad (9)$$

formában írható, ekkor az előzőek figyelembevételével a (7) és (8) egyenlet összevonásával előáll

$$d = 1,671 C_d \lg(R_0/R_w), \quad (10)$$

melyben  $R_0$  a hosszú szondával mért fajlagosellenállás-értékekből, míg  $R_w$  a természetespotenciál-szelvényből vagy vízkémiai elemzésből származtatható (Csókás 1995).

A szivárgási tényező meghatározásához a felszín alatti képződmények agyagtartalmának és effektív porozitásának előzetes ismerete szükséges. E két mennyiséget az (5) és (6) formula alapján számíthatjuk. Archie (1942) számos kőzetminta laboratóriumi méréséből az alábbi összefüggést találta:

$$F = a/\Phi^m, \quad (11)$$

ahol  $m$  a cementációs kitevő (kevésbé kompaktált üledékeknel  $m \approx 1,5-1,7$ ), míg  $a$  jelöli a tekervényességi együtthatót ( $a \approx 1$ ). E két mennyiség a kőzet texturális tulajdonságait írja le. Mivel értékük egy-egy nagyobb intervallumon konstansnak tekinthető, így a zónaparaméterek körébe soroljuk ezeket. Alger (1971) kimutatta, hogy elsődleges porozitású édesvízzel telített üledékekben a formációtényező nemcsak a porozitástól függ, hanem a pórusvíz fajlagos ellenállásától és a szemcsemérettől is. Ogbe és Bassiouni (1978) a tekervényességi együtthatót a porozitással és a formáció faktoral kapcsolta össze:

$$a^2 = [(R_0/R_w)\Phi]^{1,2}. \quad (12)$$

Kovács (1972) a szivárgási tényező meghatározása érdekében a (3) egyenletet megfelelően módosította:

$$K = \frac{1}{5} \frac{g}{\nu} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \left(\frac{d}{\alpha}\right)^2, \quad (13)$$

ahol  $\alpha$  a szemcsék átlagos alakú tényezője, amely homokokra 7–11 közötti érték (átlagosan 10-nek vehető). A víz kinematikai viszkozitása  $\nu = \mu/\rho$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) kifejezhető a formáció hőmérsékletének függvényében. A gravitációs gyorsulás és a víz kinematikai viszkozitásának aránya  $g/\nu = 5,517 \cdot 10^4 C_t$  ( $\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), ahol a  $C_t$  dimenziótlan hőmérsékletfüggő együttható kiszámítható a  $C_t = 1 + 3,37 \cdot 10^{-2} T + 2,21 \cdot 10^{-4} T^2$  formula alapján ( $T$  °C-ban helyettesítendő).

Pirson (1963) tette közzé a Kozeny-egyenletnek egy másik alakját:

$$K = \frac{1}{5} \frac{g}{\nu} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \left(\frac{1}{aS}\right)^2, \quad (14)$$

ahol  $S$  (1/m) jelöli a közetszemcsék fajlagos felületét. A (13), (14) egyenlet összehasonlításából az alábbi összefüggés származtatható:

$$(d/\alpha)^2 = a^2 S^{-2}. \quad (15)$$

Gálfi és Liebe (1981) több empirikus formulát megvizsgált a homokok és kavicsok fajlagos ellenállása és szivárgási tényezője között. Édesvíztartalmú üledékekben az elektromos áram nehezen folyik át a szemcsék között, sokkal inkább azok felületén. Így a fajlagos ellenállás fordítottan arányos a közetszemcsék fajlagos felületével. Azt feltételezve, hogy a szemcsék gömb alakúak a fajlagos felület kiszámítható:

$$S = 6(1 - \Phi)/d. \quad (16)$$

A (10) és (16) egyenletből adódódik:

$$S^2 = \frac{36(1 - \Phi)^2}{[1,671C_d \lg(R_0/R_w)]^2}. \quad (17)$$

A Csókás-féle szivárgási tényező m/s egységben a (13), (14) és (17) egyenlet alapján számítható:

$$K = C_k \frac{\Phi^3}{(1 - \Phi)^4} \frac{[\lg(R_0/R_w)]^2}{[(R_0/R_w) \Phi]^{1,2}}, \quad (18)$$

ahol  $C_k = 855,7 \cdot C_t \cdot C_d^2$  az arányossági állandó. Csókás (1995) szerint a jó vízadók szivárgási tényezője  $K > 10^{-6}$  m/s, míg a vízzáróké  $K < 3 \cdot 10^{-8}$  m/s. A Csókás-formula egyedisége abban rejlik, hogy a (18) egyenletben szereplő paraméterek mindegyike karotázsszelvényekből meghatározható, így a fűrőlyuk mentén folytonos (*in situ*) becslés adható a szivárgási tényezőre.

A Csókás-módszer lehetőséget ad a víztárolókhöz köthető további paraméterek meghatározására. A víz áramlásának következtében tangenciális feszültségek ébrednek a közet-szemcsék felületén. A kritikus áramlási sebesség ( $v_c$ ), amelynél a  $d_{10}$  méretű szemcsék a lyukfal irányában elmozdulnak, a szivárgási tényezőből becslhető (Schmieder 1975):

$$v_c \cong 2(d_{10})^{1/2} \cong (1/15)(K)^{1/2}, \quad (19)$$

ahol  $v_c$  és  $K$  m/s egységben, míg  $d_{10}$  mm-ben helyettesítendő. A homokmentes kitermelés érdekében (19) felhasználásával megállapíthatjuk az optimális szivattyúzási ütemet. A kritikus sebességet meghaladva fenn áll annak a kockázata, hogy a víz minősége romlik, és a kút elhomokolódik. A kút

felvevőképessége  $m^3/s$  egységben  $Q_{\max} = 2\pi r_0 h_0 v_c$ , ahol  $r_0$  (m) a szűrő sugara és  $h_0$  (m) annak a hossza. Gyakorlati tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy a nagyobb vízhozam érdekében jóval nagyobb sebességértékeket is alkalmazhatunk a (19) egyenletben javasoltnál. Ennek az az oka, hogy a kútkiképzés utáni tisztító szivattyúzás a kút közvetlen környezetében növeli a mértékadó szemcseátmérő értékét és ezzel a hozzá tartozó kritikus sebességet is. A szemeloszlásadatok felhasználásával a kritikus sebességre realisabb becslés adható, melyből az optimális vízhozam l/perc egységben kifejezhető:

$$Q_{\max} = 120 \pi r_0 h_0 10^{0,446 \lg d + 0,1654}, \quad (20)$$

ahol  $v_c$ -t m/s és  $d$ -t mm egységben adjuk meg (Kassai, Jambrik 1986). A (20) egyenlet a 0,09–5 mm közötti szemcseméret-tartományban alkalmazható.

## A Csókás-eljárás vizsgálata szintetikus adatokon

A Csókás-eljárást először ismert modellen teszteljük. A modellparaméterek két csoportját különböztetjük meg: úgy mint réteg- és zónaparamétereket. Az előbbieket rétegenként változnak, míg az utóbbiak a vizsgált intervallumon (víztároló zóna) gyakorlatilag változatlanok. Ismertnek tételezzük fel az alábbi rétegjellemzőket: porozitás ( $POR$ ), agyagtartalom ( $VSH$ ), homoktérfogat ( $VSD$ ), mértékadó szemcseátmérő ( $DIO$ ) és hatékony szemcseátmérő ( $D$ ). A konszolidálatlan formáció 2. és 4. rétege durva homok, míg a többi alacsony permeabilitású iszap. A rétegsor teljesen édesvízzel telített ( $SW = 1$ ), melyben az alábbi szintetikus szelvényeket használjuk fel: természetesgamma-intenzitás ( $GR$ ), természetespotenciál- ( $SP$ ), neutron-neutron intenzitás ( $NN$ ), sűrűség ( $DEN$ ), sekély- és mélybehatalású szondával mért fajlagos ellenállás ( $RS$  és  $RD$ ). A bemenő adatokat és a közetösszetettelt a 2. ábra mutatja.

Az elméleti szelvényeket előremodellezéssel számítjuk. A teljesen vízzel telített agyagos homokrétegek modellparaméterei és a fűrőlyukszelvények kapcsolatát az alábbi szonda-válaszegyenletek írják le (Alberty, Hashmy 1984):

$$GR = \frac{VSH \cdot GRSH \cdot DESH + VSD \cdot GRSD \cdot DESD}{DEN} + GRSD, \quad (21)$$

$$SP = SPSH \cdot VSH - C \lg \frac{RMF}{RW} (1 - VSH), \quad (22)$$

$$NN = POR \cdot NNMF + VSH \cdot NNSH + VSD \cdot NNSD, \quad (23)$$

$$DEN = POR \cdot DEMF + VSH \cdot DESH + VSD \cdot DESD, \quad (24)$$

$$RS = \left[ \left( \frac{VSH^{(1-0,5VSH)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{m/2}}{(a \cdot RMF)^{1/2}} \right) \right]^{-2}, \quad (25)$$

$$RD = \left[ \left( \frac{VSH^{(1-0,5 VSH)}}{RSH^{1/2}} + \frac{POR^{m/2}}{(a \cdot RW)^{1/2}} \right) \right]^{-2}, \quad (26)$$

$$POR + VSH + VSD = 1. \quad (27)$$

A (21)–(26) egyenletek zónaparamétereinek értékeit az 1. táblázat tartalmazza. A (27) anyagmérlegegyenlet az egységnyi közettérfogatra írt elő korlátozást. A szelvényadatok elméleti értékét a modellparaméterek (21)–(26) egyenletbe történő helyettesítésével kapjuk. Az így generált szintetikus (zajmentes) szelvényekhez véletlen zajt adva kvázimért karotázsszelvényeket állítunk elő. Tekintsük először az 5%-os Gauss-zajjal terhelt szelvények feldolgozását. A szivárgási tényezőt először a (3) Kozeny–Carman-egyenlet felhasználásával, majd a Csókás-modell alapján számítjuk (2. ábra). A (18) egyenlet  $C_k$  állandóját Alger (1971) javaslata alapján  $3,2587 \cdot 10^{-4}$ -nek választjuk. Megállapítható, hogy a becsült szivárgási tényező szelvényei a zaj mértékének megfelelően szoros egyezést mutatnak.

A fűrőlyukszelvények pontossága eltérő, mely függ a szonda típusától, a szelvényezés műszaki adataitól és a földtani viszonyoktól. Ahhoz, hogy a valódi mérési körülményeket szimuláljuk, a szintetikus (zajmentes) adatokat különböző mértékű zajjal terheljük. A zajos adatok feldolgozásával kapott kiértékelési eredmények pontosságát az alábbi három mennyiséggel mérjük. A relatív adattávolság a különböző nagyságrendű és dimenziójú zajmentes és zajos adatok eltérését számszerűsíti:

$$D_a = \left[ P^{-1} N^{-1} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^N \left( \frac{d_{pk}^{(0)} - d_{pk}^{(m)}}{d_{pk}^{(m)}} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 (\%), \quad (28)$$

ahol  $d_{pk}^{(0)}$  és  $d_{pk}^{(m)}$  a  $p$ -edik mélységben előállított  $k$ -adik (egzakt) szintetikus és zajos adat. A modelltávolság két különböző módszerrel becsült szivárgási tényező szelvénytávolságát adja meg:

$$D_m = \left[ P^{-1} \sum_{p=1}^P \left( \frac{\lg K_p^{(I)} - \lg K_p^{(II)}}{\lg K_p^{(II)}} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 (\%), \quad (29)$$

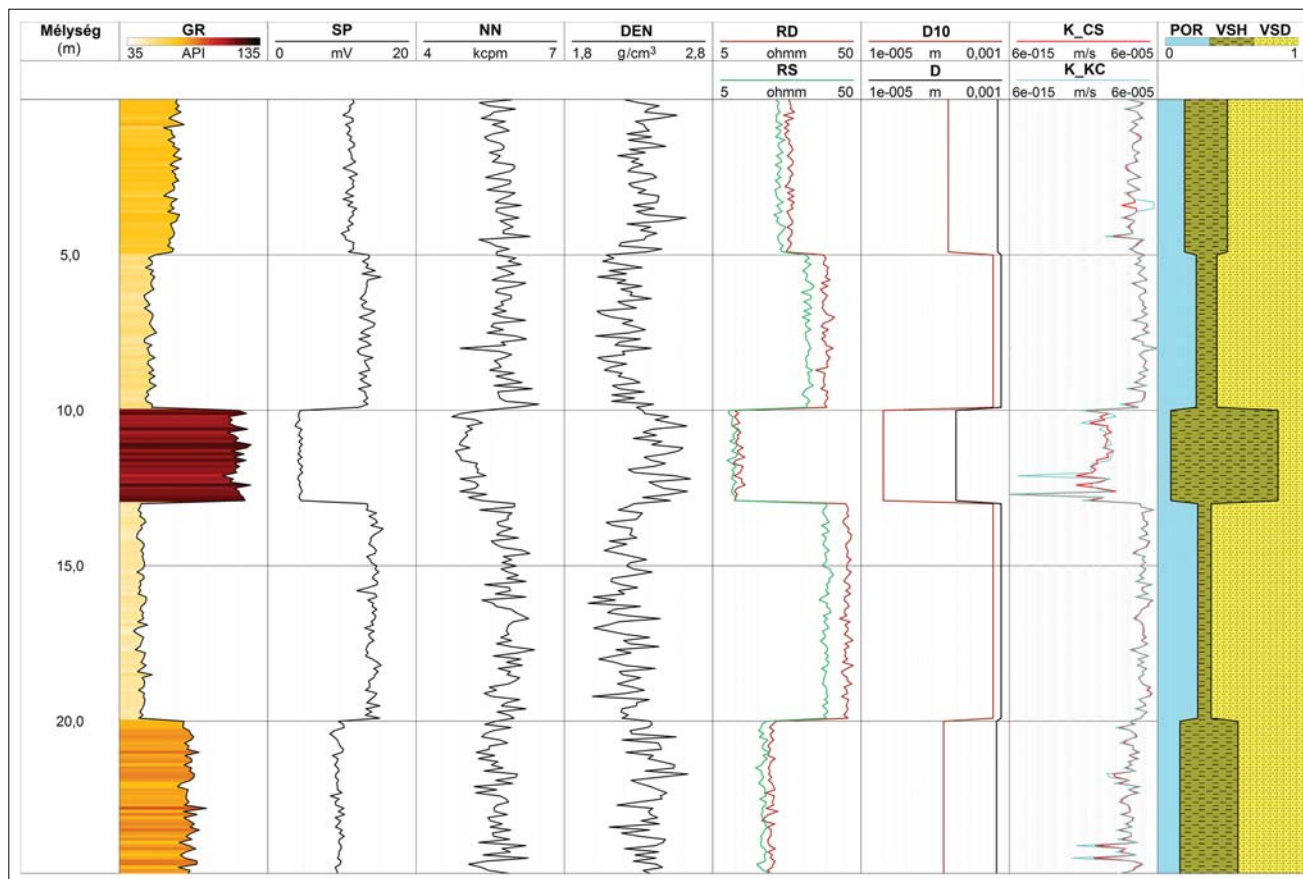
ahol  $K_p^I$  és  $K_p^{II}$  az első és második módszer alapján számított  $p$ -edik szivárgási tényezőt jelöli. A különböző forrásból becsült szivárgási tényezők kapcsolatának erősségét a Pearson-féle korrelációs együttható jellemzi

$$r = \frac{\text{cov}(K^{(I)}, K^{(II)})}{\left[ \text{cov}(K^{(I)}, K^{(I)}) \text{cov}(K^{(II)}, K^{(II)}) \right]^{1/2}}, \quad (30)$$

ahol  $\text{cov}$  jelöli a minta kovariancia operátorát. A (30) formula a változók lineáris kapcsolata esetén nyújt optimális becslést. Nemlineáris függvénykapcsolat esetén a rangkorreláci-

**1. táblázat** | Direkt feladat megoldása során alkalmazott zónaparaméterek  
**Table 1** | Zone parameters used for forward modeling

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ -intenzitás	Agyag	<i>GRSH</i>	160	API
	Homok	<i>GRSD</i>	25	API
Természetes potenciál	Agyag	<i>SPSH</i>	0	mV
	Homok	<i>SPSD</i>	15,53	mV
	Hőmérsékleti koefficiens	<i>C</i>	70	–
Termikus- $n^0$ -intenzitás	Agyag	<i>NNSH</i>	4,8	kcpm
	Homok	<i>NNSD</i>	7,2	kcpm
	Iszapfiltrátum	<i>NNMF</i>	3,1	kcpm
Sűrűség	Iszapfiltrátum	<i>DEMF</i>	1,0	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	<i>DESH</i>	2,55	g/cm <sup>3</sup>
	Homok	<i>DESD</i>	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Fajlagos ellenállás	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	9	ohmm
	Rétegvíz	<i>RW</i>	15	ohmm
	Agyag	<i>RSH</i>	2	ohmm
	Cementációs kitevő	<i>m</i>	1,5	–
	Szaturációs kitevő	<i>n</i>	1,9	–
	Tortuozitási koefficiens	<i>a</i>	1,0	–
	Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	$\mu$	0,019
Nehézségi gyorsulás		<i>g</i>	981	cm/s <sup>2</sup>



**2. ábra** 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvények, a közetfizikai modell és a szivárgási tényező becslésének eredménye  
**Figure 2** Synthetic well logs contaminated with 5% Gaussian distributed noise, petrophysical model and results of hydraulic conductivity estimation

ós együtttható ( $\rho$ ) ad reális értéket a változók korrelációjának mértékére (Spearman 1904). A szivárgási tényező becslési pontossága függ a karotázsszelvények megbízhatóságától. Ennek vizsgálatára generáljunk különböző mértékű zajjal terhelt adatrendszereket. A (21)–(26) egyenletek alapján létrehozott szintetikus adatokat 1–10%-os Gauss-zajjal terheliük. Nem Gauss-eloszlású adatok szimulálására két további adatrendszert hozunk létre, melyek kiugró (az adatok véletlenszerűen kiválasztott 1/6 részéhez a meglévőnél háromszor nagyobb mértékű Gauss-zajt adunk) értékeket is

tartalmaznak. Az adatrendszereket külön-külön feldolgozva a 2. táblázatban foglalt eredményeket kapjuk. A (28) egyenlet alapján számított adattávolságok a második oszlopban találhatóak. A Csókás- és a Kozeny–Carman-módszerrel becsült szivárgástényező-szelvények (29) egyenlettel meghatározott modellávolsága arányosan nő az adattávolsággal, míg azok (30) korrelációs együttthatója csekély mértékben csökken a zajszint növelésével. A Kozeny–Carman- és a Csókás-modell alapján becsült szivárgási tényezők korrelációja nem normális eloszlású adatok, és szélsőséges hiba-

**2. táblázat** Zajérzékenységi tesztek eredményei  
**Table 2** Results of noise sensitivity tests

Zaj (eloszlás)	Adattávolság (%)	Modellávolság (%)	Korrelációs együtttható
0% Gauss	0	0,04	1,00
1% Gauss	1,01	0,85	1,00
2% Gauss	1,99	1,47	0,99
3% Gauss	3,05	2,06	0,99
4% Gauss	4,01	2,78	0,99
5% Gauss	5,02	3,58	0,99
5% Gauss + kiugró adatok	8,97	4,31	0,98
10% Gauss	10,06	6,31	0,98
10% Gauss + kiugró adatok	20,83	7,31	0,96

**3. táblázat** | Zónaparaméterek választott értékei a K-564 sz. fúrásban  
**Table 3** | Values of zone parameters chosen in borehole K-564

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ -kitérés	Agyag	<i>GRSH</i>	47	mm
	Homok	<i>GRSD</i>	0	mm
Természetes potenciál	Hőmérsékleti koefficiens	<i>C</i>	1,5	–
Hőmérséklet	Formáció	<i>TF</i>	15	°C
Sűrűség	Iszap	<i>DEM</i>	1,1	g/cm <sup>3</sup>
Fajlagos ellenállás	Iszap	<i>RM</i>	9,31	ohmm
	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	10,31	ohmm
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	$\mu$	0,019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s <sup>2</sup>

értékek mellett is erős. Megállapítható, hogy a Csókás-eljárással kapott eredmények ellentmondásmentesek, és a szivárgási tényező becslült értékeinek pontossága a várható mértékben függ a bemenő adatok hibájától.

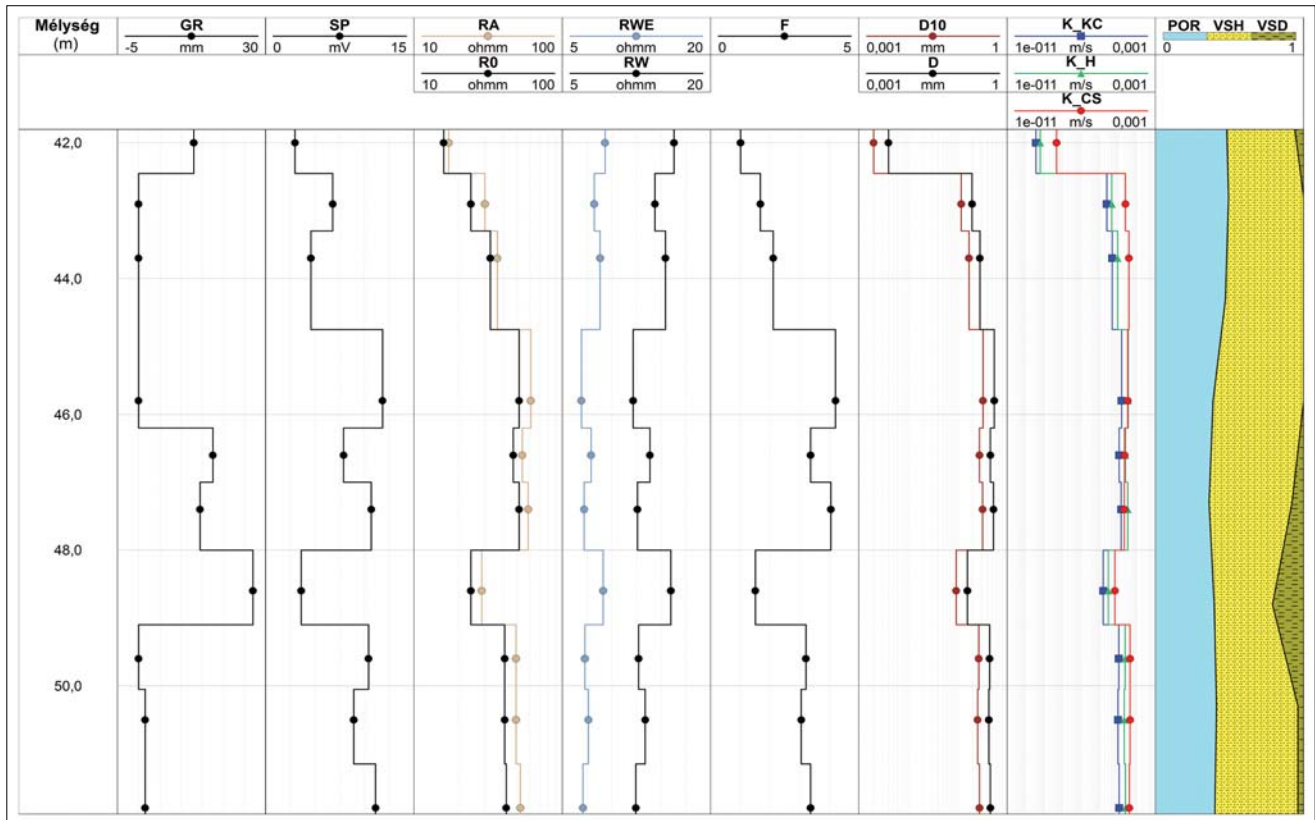
## A Csókás eljárás vizsgálata terepi adatokon

### 1. Esettanulmány

Csókás (1995) az általa javasolt kiértékelési eljárást a Jászberényi Vízmű K-564 kútjában mért adatokon tesztelte. Je-

len tanulmányban újra feldolgozva a szelvényeket összehasonlítjuk a Csókás-módszert a Hazen-féle formulával és a Kozeny–Carman-módszerrel. A kis átmérőjű (320 mm) fúrásban a természetes-gamma-intenzitás- (*GR*), természetespotenciál- (*SP*), rövid normál és laterál szondával mért látszólagos fajlagosellenállás-szelvényt (*RA*) analóg berendezéssel (1:200 léptékben) rögzítették. A mért jeleket eredetileg a szerző elektrofácies elemzés alkalmazásával négyesgögesítette. Az alkalmazott szonda-válaszgyenletek zónaparamétereit a 3. táblázat tartalmazza.

Az *SP* szelvényből a rétegvíz fajlagos ellenállása ( $RW = 1,75 \cdot RWE$ ) becslhető, ahol a rétegvíz ekvivalens fajlagos



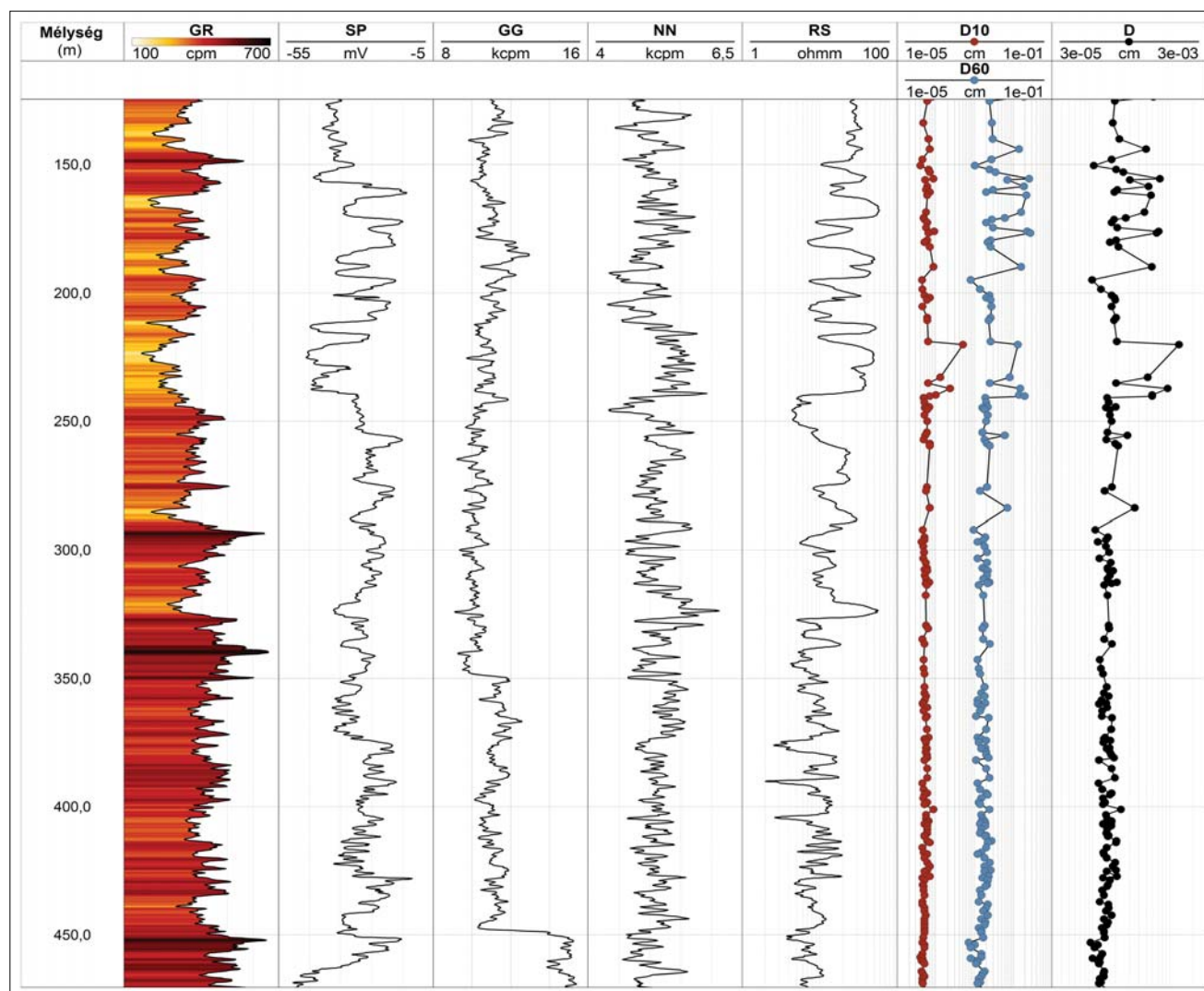
**3. ábra** | Mért szelvények és a szivárgási tényező becslés eredményei K-564 sz. fúrásban  
**Figure 3** | Observed borehole logs and result of hydraulic conductivity estimation in borehole K-564

ellenállása ( $RWE$ ) a szelvényezett intervallumon 6,9–9,3 ohmm. Az  $RA$  szelvényt az iszapfiltrátum fajlagos ellenállása és a lyukátmérő hatásával korrigáljuk, melyet felhasználunk a valódi fajlagos ellenállás ( $RO$ ), a formációtényező ( $F$ ) és a porozitás ( $POR$ ) számítására. A 3. ábra a bemenő szelvényeket (1–3. oszlop), a mérésekből származtatott paramétereket (4–5. oszlop), a mértékadó és hatékony szemcseátmérőt (6. oszlop) és a közetösszetételt tartalmazza (8. oszlop). A Csókás-eljárással számított szivárgástényező-szelvényt ( $K\_CS$ ) a 7. oszlop mutatja. A kiértékelési eredményeket megerősítik a (2) és (3) egyenlettel számított szivárgástényező-értékek. A Hazen-féle összefüggést a  $K = 116 \cdot D^2$  formában alkalmazzuk, ahol a hatékony szemcseátmérőt ( $D$ ) cm egységben adjuk meg (a 6. oszlopban a domináns szemcseátmérő mm egységben szerepel). A (29) egyenlet alapján számított modelltávolság a Csókás- és a Kozeny–Carman-féle szivárgási tényező ( $K\_KC$ ) szelvények között  $D_m = 13\%$ , míg ugyanaz 9,8% a Csókás- és a Hazen-féle módszerrel ( $K\_H$ ) számított szelvények között. A szűrőzött intervallumokon (41–47,5 m és 48–52 m) a

Csókás-módszerrel 632 l/perc hozamot határozhatunk meg, mely közel áll a próbaszivattyúzással kapott 550 l/perc értékhez (Csókás 1995).

## 2. Esettanulmány

További vizsgálatokat a Baktalórántháza-1 sz. fúrás adatainak alapján mutatunk be. A geofizikai mérések elsődleges célja a szénhidrogén-kutatáshoz kapcsolódó földtani szerkezet vizsgálata volt. A rétegek szénhidrogént nem tartalmaznak, viszont jelentős termálvízkészlettel rendelkeznek. Jelen tanulmányban a 124–470 m szakaszt vizsgáljuk, ahol pleisztocén, majd alsó pannon üledékek váltakoznak, úgymint kavics, agyagos homok, agyagos kőzetliszt, agyagmárga és bitumenes agyag. A pörusokat édesvíz telíti. A pleisztocén és a pannon határa 240 m mélységben található. A természetes gamma-intenzitás ( $GR$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), lyukátmérő ( $CAL$ ), sekély behatolású szondával mért fajlagosellenállás- ( $RS$ ), gamma-gamma- ( $GG$ ) és neutron-neutron- ( $NN$ ) szelvényeket a 4. ábra mutatja. Emel-



4. ábra Mért szelvények és szemcseméret adatok a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban  
 Figure 4 Observed well logs and grain-size data in borehole Baktalórántháza-1



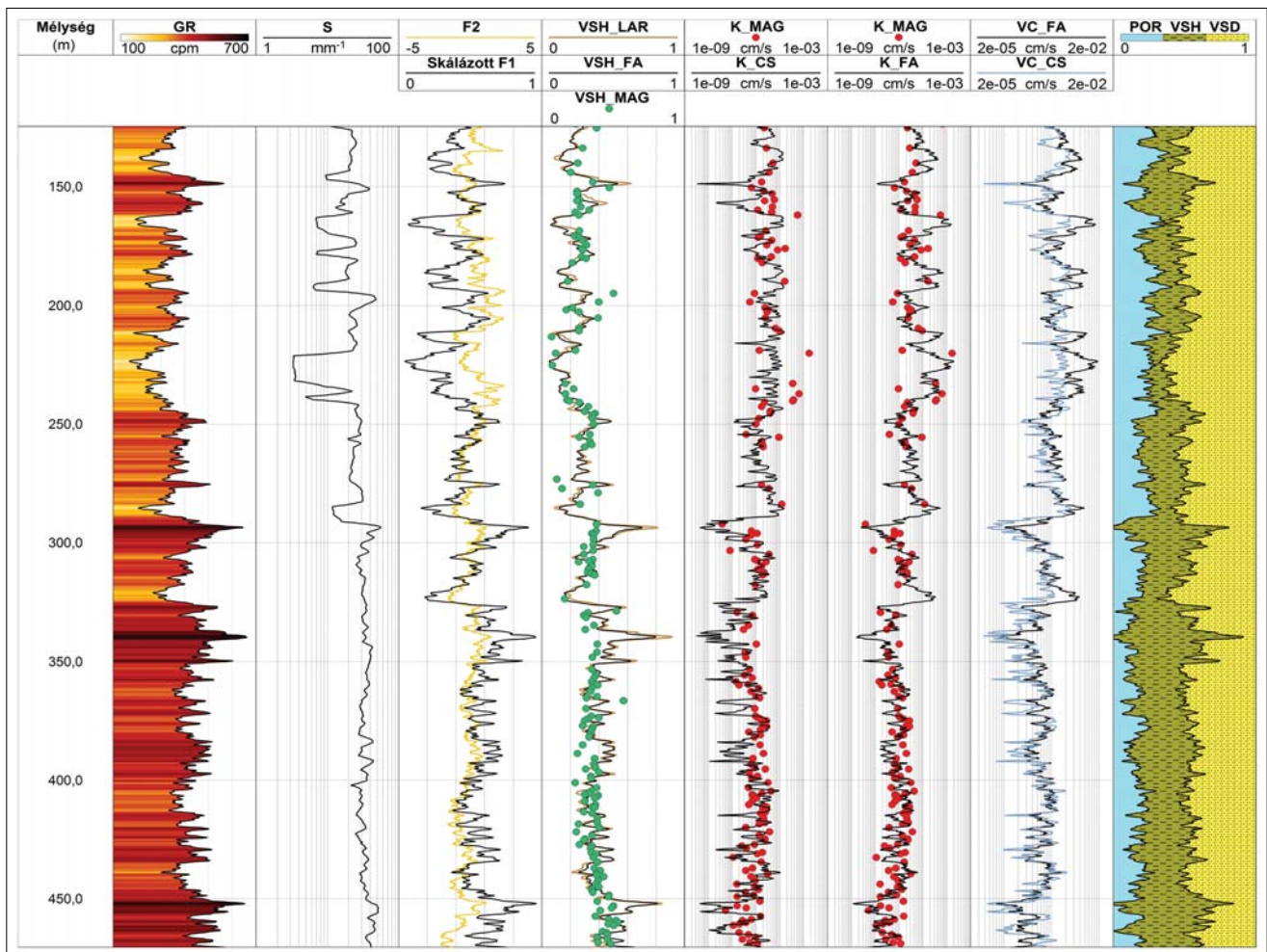
**4. táblázat** Zónaparaméterek választott értékei a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban  
**Table 4** Values of zone parameters chosen in borehole Baktalórántháza-1

Szelvény	Zónaparaméter	Szimbólum	Állandó	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ -intenzitás	Agyag	<i>GRSH</i>	685	cps
	Homok	<i>GRSD</i>	188	cps
Termikus-n <sup>0</sup> -intenzitás	Agyag	<i>NNSH</i>	4	kcpm
	Homok	<i>NNSD</i>	7,5	kcpm
	Iszapfiltrátum	<i>NNMF</i>	1	kcpm
Fajlagos ellenállás	Cementációs tényező	<i>m</i>	2,15	–
	Tekervényességi együttható	<i>a</i>	0,62	–
Szivárgási tényező	Dinamikai viszkozitás	$\mu$	0,019	Pa·s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s <sup>2</sup>

lett laboratóriumi mérésekből származó szemcseméret adatok is rendelkezésre állnak. A *D10* és *D60* értékek a szemeloszlás görbékből olvashatók le, míg a *D* hatékony szemcseméret a (4) egyenlet alapján számíthatjuk.

A Csókás-eljárás alkalmazásához ismernünk kell az effektív porozitást (*POR*) és a formációtényezőt (*F*). A neutron-neutron mérésből a (23) egyenlettel a teljes porozitás

számítható, ahol a neutronsonda-válaszegyenlet konstansait a *NN-GG* keresztmetszeteiből becsüljük (4. táblázat). A *GR* szelvényt felhasználó (6) egyenlet alapján az agyagtartalmat meghatározhatjuk (*VSH\_LAR*), ahol a szelvénykonstansokat szintén a táblázat tartalmazza. A homok térfogata (*VSD*) az effektív porozitás és az agyagtartalom ismeretében (27) egyenletből kifejezhető. A formációtényező



**5. ábra** | Becsült kőzetfizikai és szivárgási paraméterek szelvényei a Baktalórántháza-1 sz. fúrásban

**Figure 5** | Well logs of estimated petrophysical and hydraulic parameters in borehole Baktalórántháza-1

általában az  $SP$  és  $R0$  szelvényekből adódik. Mivel hiányzik a mély behatolású szondával mért fajlagosellenállás-szelvény, ezért itt a Humble-formulát alkalmazzuk a formáció-tényező becslésére ( $F = 0,62/POR^{2,15}$ ). A (18) egyenleten alapuló Csókás-modell felhasználásával becsülhetjük a szivárgási tényezőt ( $K_{CS}$ ) a szelvényezés teljes szakaszán. Emellett a (3) egyenlettel becsült szivárgási tényezők ( $K_{MAG}$ ) a mintavételi helyeken adhatók meg (5. ábra 5. oszlop). A független módszerrel becsült eredmények jó egyezést mutatnak. A mintavételi helyekre a (29) egyenlettel számítható modelltávolság  $D_m = 3,4\%$ , ami szintén jónak mondható. A (30) korrelációs együttható  $r = 0,96$  a Csókás- és a Kozeny–Carman-módszerrel meghatározott szivárgási tényezők között. A Csókás-eljárással a (19) egyenletből kiszámítható a  $VC_{CS}$  kritikus áramlási sebesség (7. oszlop), valamint a (16) egyenlettel megbecsülhető a szemcsék  $S$  fajlagos felülete (2. oszlop). Az utóbbi szelvényen jól elkülönülnek a vízáradó és vízáradó szakaszok, az előbbieket relatíve kis  $S$  értékekkel, míg az utóbbiak nagy  $S$  kitéréssel jelentkeznek.

A Csókás-eljárással kapott eredményeket a fúrólukszelvények többváltozós statisztikai vizsgálati eredményei is megerősítik. A faktoranalízisen alapuló eljárás a mért szelvényeket kevesebb számú statisztikai változóval (faktorokkal) helyettesíti, melyek különböző arányban osztják meg a mért információt. A első faktor felelős a bemenő adatok variációjának legnagyobb hányadáért, míg a további faktorok egyre kisebb arányban tartalmazzák a mérési információt. A faktoranalízis a dimenziócsökkentésen túl alkalmas a szondákkal közvetlenül nem mérhető, rejtett közetfizikai mennyiségekre vonatkozó információ kinyerésére (Lawley, Maxwell 1962). Ebben a tanulmányban a statisztikai eljárással képzett faktorszelvényeket felhasználjuk a víztároló formációk közetfizikai/szivárgási paramétereinek becslésére és a kapott eredményeket összehasonlítjuk a Csókás-módszerrel kapott eredményekkel. Első lépésben a fúrólukszelvények faktoranalízisével meghatározzuk a rétegek agyagtart-

talmát. Szabó és szerzőtársai (2014) tapasztalati kapcsolatot találtak az északkelet-magyarországi régió fiatal üledékei százalékos agyagtartalma és az első faktor között

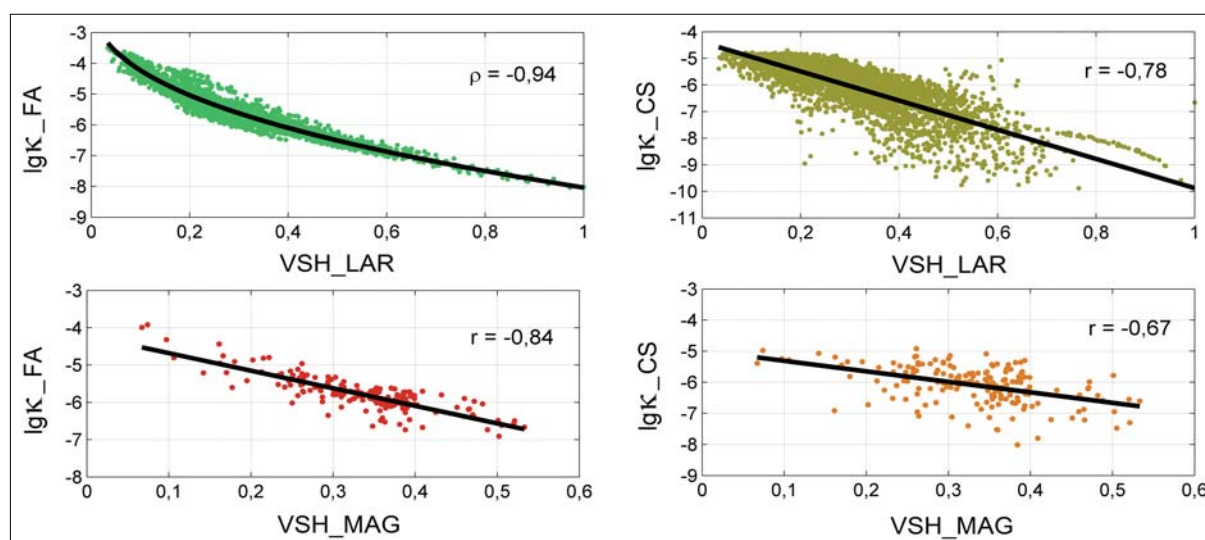
$$V_{sh} = 27,4 \exp\{0,015 F_1\} - 26,5, \quad (31)$$

ahol  $F_1$  jelöli a 0–100 tartományban skálázott első faktorszelvényt. A faktorszelvények számítását a Baktalórántháza-1 fúrásban a *Magyar Geofizika* ugyanezen számában Szabó (2015) részletesen tárgyalja. Az első faktorból képzett agyagtartalom-szelvényt ( $VSH_{FA}$ ) az 5. ábra 4. oszlopában találjuk, mely szoros egyezést mutat a  $VSH_{LAR}$  és a magadatokon alapuló  $VSH_{MAG}$  értékekkel. Az első faktorból közvetlenül szivárgástényező-szelvényt ( $K_{FA}$ ) számíthatunk, melyet az ábra 6. oszlopa mutat. A faktoranalízissel és a Csókás-eljárással becsült szivárgástényező-szelvények modelltávolsága  $D_m = 8,8\%$ . A magmérésekkel összevetve mindkét módszer megfelelő becslést ad, a 150–250 m szakaszon a nagyobb szivárgási tényezők tartományában ( $\sim 10^{-4}$  cm/s) a faktoranalízis eredménye a magmérésekhez közelebb áll.

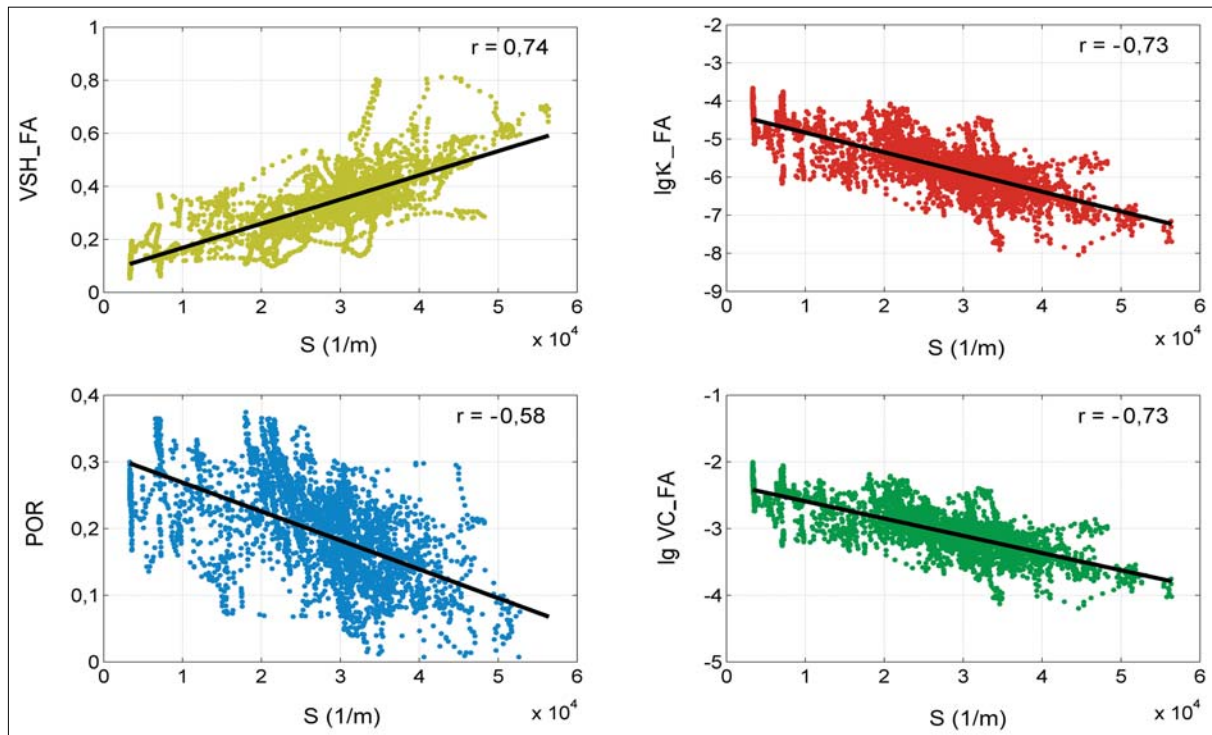
A Csókás-módszer és a faktoranalízis együttes alkalmazásával felfedhetjük a vizsgált közetfizikai paraméterek és a szivárgási tényező kapcsolatát. A faktoranalízissel becsült agyagtartalom és a  $\kappa = K/K_0$  (ahol  $K_0 = 1$  cm/s) dimenziótlan szivárgási tényező tízes alapú logaritmusá között gyenge, nemlineáris kapcsolat van, melynek regressziós függvénye:

$$\lg \kappa^{(FA)} = -6,17 (V^{(FA)})^{-2,15} + 0,49, \quad (32)$$

ahol a regressziós együtthatók 95%-os konfidenciaszint mellett:  $c_{1,\min} = -6,26$ ,  $c_{1,\max} = -6,07$ ,  $c_{2,\min} = -2,27$ ,  $c_{2,\max} = -2,03$ ,  $c_{3,\min} = 0,47$ ,  $c_{3,\max} = 0,50$ . A rangkorrelációs együttható értéke ( $\rho = -0,97$ ) a két változó erős kapcsolatát mutatja. A (6) formulával becsült agyagtartalom és a faktoranalízisen alapuló szivárgási tényező közötti korreláció szintén erős (6. ábra). A (32) egyenlet együtthatói kismértékben módosulnak:  $c_1 = -6,339$  ( $-6,556$ ,  $-6,122$ ),  $c_2 = -1,696$  ( $-1,947$ ,  $-1,446$ ),  $c_3 = 0,398$  ( $0,3719$ ,  $0,424$ ). Az ábrán lát-



**6. ábra** | Az agyagtartalom és szivárgási tényező regressziós kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban  
**Figure 6** | Regression relation between shale volume and hydraulic conductivity in borehole Baktalórántháza-1



7. ábra | A fajlagos felület és a közetfizikai paraméterek kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban  
 Figure 7 | Regression relation between specific volume and petrophysical parameters in borehole Baktalórántháza-1

ható, hogy a Csókás-eljárással meghatározott szivárgási tényező logaritmus és a Larionov-módszerrel számított agyagtartalom kapcsolata lineáris:

$$\lg \kappa^{(CS)} = -5,48 V^{(LAR)} - 4,39, \quad (33)$$

ahol az együtthatók becslési hibája:  $a_{\min} = -5,627$ ,  $a_{\max} = -5,34$ ,  $b_{\min} = -4,44$ ,  $b_{\max} = -4,34$ . A korrelációs együttható értéke erős kapcsolatot mutat. A 6. ábra a szivárgási tényező és a magmérésből meghatározott agyagtartalom kapcsolatát is bemutatja. A 7. ábrán a (16) összefüggés alapján számított fajlagos felület hasonlítható össze a porozitással, az agyagtartalommal, a szivárgási tényezővel és a kritikus áramlási sebességgel. A szivárgás sebességének logaritmus dimenziótlannak minősül, ahol  $VC = v_c/v_0$  (ahol  $v_0 = 1$  cm/s). A vizsgált tárolóparaméterek és a fajlagos felület között lineáris kapcsolat és (az agyagtartalom kivételével) fordított arányosság áll fenn. A korreláció mértéke a porozitás esetén közepes, a többi paraméter vonatkozásában erős.

## Összefoglalás

A tanulmány bemutatja, hogy a Csókás-eljárás kielégítő becslést ad víztároló törmelékeny kőzetek szivárgási tényezőjére és a kapcsolódó közetfizikai jellemzőire. Az eredményeket megerősítik a klasszikus Kozeny–Carman-eljárással és a feltáró faktoranalízissel kapott becslések is. A szintetikus modellkísérletek eredményei ellentmondásmentesek még nagymértékű adattérbeli zaj alkalmazása esetén is. A terepi vizsgálatok során magadatokat is bevonunk az összehasonlíthatóság igazolására. A terepi tapasztalatok

szerint, a Csókás-eljárás optimális megoldást a 10-nél kisebb formációtényezőjű közepes vagy durvaszemcsés (jól osztályozott) üledékekre ad. Erősen cementált víztároló rétegek esetén a számítási eredmények jelentősen eltérhetnek a Kozeny–Carman-eljárástól kapottaktól. Finomszemcsés üledékeknél, például lösz esetén, egynél nagyobb nagyságrendű eltérést mutatnak a szivárgási tényezők, ami az Alger-formula felülvizsgálatát teszi szükségessé. A szemcseméret és a formáció tényező kapcsolatát ajánlatos a mérési területen meghatározni. Ehhez szemeloszlásadatok és megfelelően korrigált karotázsszelvények használata szükséges.

A Csókás-eljárás folytonos információval szolgál a szivárgási tényező fúróluk menti eloszlásáról, mely a mag- és a küttesztadatok kiterjesztésében jól alkalmazható. A vízadók szivárgási jellemzői a fúrások közötti térrészre is interpolálhatók, ami javíthatja a felszíni geofizikai mérések hatékonyságát is. A faktoranalízis bevonásával a szomszédos fúrások adatainak egyetlen eljárásban történő kiértékelése is megvalósítható. A Csókás-módszer lehetőséget ad új, korszerű mérési eljárások felhasználására is. Például, az effektív porozitás nagyságának pontosabb meghatározására alkalmazzák laboratóriumban a nagy felbontású mikrotomográfiai és mágneses rezonanciás méréseket (Krakowska, Puskarczyk 2015). Ez utóbbi mérési technikát az USA-ban már vízutató fúrásokban is alkalmazzák (Walsh et al. 2013). Az elektrokinetikus jelenség elmélete szerint porózus közegben a hatékony szemcseátmérő helyettesíthető az effektív pórussugárral, amely empirikus kapcsolatban áll a porozitással és a permeabilitással. Ezt a kapcsolatot laboratóriumban optikai képelemzéssel a pórúság széles tartományán, valamint északi-tengeri magmintákon is igazolták

(Glover, Walker 2009). A Csókás-egyenlet levezetésében szereplő rétegvíz fajlagos ellenállását és a tekervényességi együtthatót azok becslési hibáikkal együtt a karotázsadatok intervalluminverziójával automatikusan meghatározhatjuk (Dobróka, Szabó 2011). Az effektív porozitás pontosabb meghatározásához szükséges agyagtartalom a szelvényadatok faktoranalízisével számítható (Szabó et al. 2014). A faktoranalízis a szivárgástényező-szelvény független előállítására is felhasználható, ami tovább növelheti a kiértékelés megbízhatóságát (Szabó 2015). A fenti kutatási eredmények a Csókás-eljárás továbbfejlesztésére ösztönözhetik a hidrogeofizikus szakembereket, ami hasznos eszköze lehet a felszín alatti vízkészletek hatékonyabb felkutatásának és kitermelésének.

## Köszönetnyilvánítás

Az első szerző (Sz.N.P.) a PD109408 sz. Ifjúsági OTKA projekt témavezetőjeként köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. A második szerző (D.M.) mint a K-109441 sz. OTKA témavezetője köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. Köszönetünket fejezzük ki Kormos Katalin és Kiss Anett doktoranduszoknak és Halmágyi Anett mesterszakos hallgatónak a tanulmány előkészítésében nyújtott segítségükért, Bucusi Szabó Lászlónak és Latrán Bélának a Baktalórántháza-1 fúrás mérési adataiért és együttműködésükért.

## A tanulmány szerzői

Szabó Norbert Péter, Dobróka Mihály, Hursán László

## Hivatkozások

- Alberty M., Hashmy K. 1984: Application of ULTRA to log analysis. SPWLA Symposium Transactions, Paper Z, 1–17
- Alger R. P. 1971: Interpretation of electric logs in fresh water wells in unconsolidated formation. SPE Reprint Series 1, 1–25
- Alger R., Harrison C. W. 1987: Improved fresh water assessment in sand aquifers utilizing geophysical well logs, Proceedings of 2nd International Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical, and Groundwater applications, Colorado, USA
- Allen D., Andreani M., Badry R., Flaum C., Gossenberg P., Horowitz J., Singer J., White J. 1997: How to use borehole Nuclear Magnetic Resonance. Oilfield Review 9, 34–57
- Archie G. E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. SPE, Transactions of the AIME 146, 54–62
- Bear J. 1972: Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications Inc., New York
- Carman P. C. 1937: Fluid flow through granular beds. Transactions, Institution of Chemical Engineers 15, 150–166
- Csókás J. 1995: Vízadó rétegek jellemző hozamának és a víz minőségének meghatározása geofizikai fúróluk szelvények alapján. Magyar Geofizika 35, 176–203
- Dobróka M., Szabó N. P. 2011: Interval inversion of well-logging data for objective determination of textural parameters. Acta Geophysica 59, 907–934
- Drahos D. 2005: Inversion of engineering geophysical penetration sounding logs measured along a profile. Acta Geodetica et Geophysica 40, 193–202
- Gálfi J., Liebe P. 1981: Az elektromos fajlagos ellenállás és a szivárgási tényező kapcsolata törmelékes vízadó kőzetekben. Vízügyi Közlemények 63, 437–448
- Glover P. W. J., Walker E. 2009: Grain-size to effective pore-size transformation derived from electrokinetic theory. Geophysics 74, E17–E29
- Hazen A. 1892: Some physical properties of sands and gravels. Massachusetts State Board of Health, Annual Report, 539–556
- Juhász J. 2002: Hidrogeológia. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Kassai F., Jambrik R. 1986: Vízbányászat II. Tankönyvkiadó, Budapest
- Kirsch R. (szerk.) 2009: Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg
- Krakowska P. I., Puskarczyk E. 2015: Tight reservoir properties derived by nuclear magnetic resonance, mercury porosimetry and computed microtomography laboratory techniques. Case study of paleozoic clastic rocks. Acta Geophysica 63, 789–814
- Kovács Gy., 1972: A szivárgás hidraulikája. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Kozeny J. 1927: Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber Akad. Wiss. 136, 271–306
- Larionov V. V. 1969: Fúrólukak radiometriája (oroszul). Nedra, Moszkva
- Lawley D. N., Maxwell A. E. 1962: Factor analysis as a statistical method. The Statistician 12, 209–229
- Menke W. 1984: Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press Inc., New York
- Ogbe D., Bassiouni Z. 1978: Estimation of aquifer permeabilities from electric well logs. The Log Analyst 19, 21–27
- Pirson S. J. 1963: Handbook of well log analysis. Prentice-Hall Inc., New York
- Rubin Y., Hubbard S. S. 2005: Hydrogeophysics. Water Science and Technology Library Series 50, Springer-Verlag, Dordrecht, Berlin, Heidelberg, New York
- Schmieder A. 1975: Vízveszély és vízgazdálkodás a bányászatban. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Serra O. 1984: Fundamentals of well-log interpretation. Elsevier, Amsterdam
- Spearman C. 1904: The proof and measurement of association between two things. The American Journal of Psychology 15, 72–101
- Szabó N. P., Dobróka M., Turai E., Szűcs P. 2014: Factor analysis of borehole logs for evaluating formation shaliness: a hydrogeophysical application for groundwater studies. Hydrogeology Journal 22, 511–526
- Szabó N. P. 2015: Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására. Magyar Geofizika 56/2, xxx–yyy
- Walsh D., Turner P., Grunewald E., Zhang H., Butler J. J., Reboulet E., Knobbe S., Christy T., Lane J. W., Johnson C. D., Munday T., Fitzpatrick A. 2013: A small-diameter NMR logging tool for groundwater investigations. Groundwater 51, 914–926
- Zilahi-Sebess L., Fancsik T., Török I., Kovács A. Cs. 2007: Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján. Magyar Geofizika 48, 99–111



# Faktoranalízisen alapuló új statisztikus eljárás a szivárgási tényező meghatározására

SZABÓ N. P.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

<sup>2</sup> MTA–ME, Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

E-mail: norbert.szabo.phd@gmail.com

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett faktoranalízisen alapuló statisztikus eljárással korábban az agyagtartalmat határoztuk meg a fűrőlyukszelvényekből. Folytatva az alkalmazási lehetőségeket, ebben a tanulmányban a víztárolók agyagtartalmával szorosan összefüggő mennyiséget, a szivárgási tényezőt származtatjuk a faktorszelvényekből. Szintetikus modellkísérleten és terepi alkalmazásokon mutatjuk be a kiértékelési eljárást, mely mind elsődleges, mind másodlagos porozitású kőzetekben jól alkalmazható. A faktoranalízis eredményei megfelelő egyezőséget mutatnak a Kozeny–Carman-modell alapján számított és a vízáadó formációk hidraulikai tesztjeiből származó szivárgási tényezők értékeivel. A fűrőlyukszelvények egyidejű statisztikai feldolgozásával folytonos *in situ* információ nyerhető a szivárgási tényezőről a fűrőlyuk teljes hossza mentén, mely többdimenziós faktoranalízis alkalmazása esetén kiterjeszhető a szomszédos fúrások közötti térrészre. A tanulmány célja egy új, független szelvényértelmezési eljárás bemutatása, mely hatékonyan használható fel a hidrogeofizikai kutatások során.

## Szabó, N. P.: New factor-analysis-based statistical method used for hydraulic conductivity estimation

Shale volume has been estimated earlier by a new statistical method developed at the Department of Geophysics, University of Miskolc, which is based on the factor analysis of well logs. As a continuation, this paper presents the derivation of hydraulic conductivity, strongly related to the shale content of aquifers, using the well logs of factor variables. Synthetic modeling experiments and field cases show the feasibility of the statistical procedure for groundwater formations with primary and secondary porosity. The results of factor analysis show a close fit to those of the Kozeny–Carman procedure and hydraulic aquifer tests. The simultaneous statistical processing of well logs gives continuous *in situ* information about hydraulic conductivity along the entire length of the borehole or between neighboring wells by using multidimensional factor analysis. The aim of the study is the presentation of a new (independent) well-logging interpretation method, which can be effectively used in hydrogeophysical exploration.

*Beérkezett:* 2015. július 9.; *elfogadva:* 2015. szeptember 16.

## Bevezetés

A szivárgási tényező a porózus és repedezett kőzetek vízvezető képességét jellemzi, melyet hidrogeológiai feladatok megoldása során a kőzetminták laboratóriumi vizsgálatával, kúttesztekkel vagy nagyobb léptékben tárolómodellezéssel határozzuk meg. Jelen tanulmányban a fűrőlyuk-geofizikai mérések tartományára szorítkozunk, ahol a szivárgási tényezőt a fűrőlyuk szűk környezete által befolyásolt karotázsszelvényadatokból többváltozós statisztikai eljárással szár-

maztatjuk. Porózus közegben a szivárgási tényezőt a szemcsemérettel vagy az effektív porúsátmérvével, a porozitással és a repedések jellemző tulajdonságaival hozzuk kapcsolatba. Elsődleges porozitású kőzetek kiértékelése során további texturális tulajdonságokat is figyelembe veszünk, például a cementációs kitevőt vagy a tekervényességi együtthatót (Archie 1942), melyek a szivárgási tényező meghatározására többnyire empirikus módszerek alkalmazását teszik lehetővé (Odong 2013, Idrysy, De Smedt 2007, Ross et al. 2007).

A fúróluk-geofizikai mérések az *in situ* vizsgálatok körébe tartoznak, melyeket a hidrogeofizikai alkalmazásoknál elsősorban a szivárgási tényező térbeli változásának (nagyságrendi) meghatározására használnak. A szénhidrogén-kutatásban a permeabilitást mint kapcsolódó mennyiséget direkt módon, a nukleárisrezonancia-szelvényezéssel (NMR) határozzák meg. E módszer felszíni geofizikai megfelelőjét a mágnesesrezonancia-szondázást egyre szélesebb körben használják a hidrogeofizikában is (Roy, Lubczynski 2003). Walsh és szerzőtársai (2013) az NMR eljárást nemrégiben környezeti és hidrogeológiai vizsgálatok számára mélyített kis átmérőjű fúrólukokra adaptálták. Bár az NMR szonda meglehetősen drága, előnye, hogy nemcsak az effektív porozitásról, hanem a pórusméret-eloszlásról és a pórusokat kitöltő fluidumok fizikai tulajdonságairól is informál, miáltal részletesebb képet kaphatunk a kőzetek szivárgási jellemzőiről. A permeabilitás becslésére szolgáló indirekt (*in situ*) módszerek a porozitás és a kötött víztelítettség előzetes meghatározásán alapulnak (Timur 1968). Alger (1966) édesvíztároló kőzetekre kapcsolatot talált a formációfaktor és az effektív szemcseátmérő között, ami lehetővé tette a szivárgási tényező fúrólukszelvényekből való számítását. Az édesvíztárolók kiértékelésének mélyfúrású geofizikai méréseken alapuló elméletét Alger és Harrison (1989) foglalta össze. Csókás (1995) átfogó kiértékelési eljárást javasolt a szivárgási tényező és egyéb vízminőség-jellemző paraméterek becslésére konszolidálatlan üledékek esetén. A Csókás-módszer a porozitás, a rétegvíz és a tárolókőzet fajlagos ellenállásának előzetes becslése alapján (kizárólag a karotázs-adatrendszerből) szolgáltatja a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A víztároló szerkezeteknél feltételezett kőzetfizikai modell paramétereinek kinyerésére gyakran alkalmaznak egyéb determinisztikus vagy inverz modellezésen alapuló eljárásokat is, így például a fajlagosellenállás- és porozitásszelvényeken alapuló megközelítést Khalil és szerzőtársai (2011) alkalmazták, valamint Drahos (2005), Szabó és Dobróka (2013a) publikáltak inverziós módszert e célból.

A fenti adatfeldolgozási módszerek sikeres alkalmazása függ a karotázsszonda-válaszgyenletek és a zónaparaméterek megfelelő megválasztásától. Előfordul, hogy a modell és az adatok is jelentős hibával (vagy többértelműséggel) terheltek. Az értelmezés eredményei gyakran jelentősen eltérnek a magmintákon meghatározottaktól (vagy elmentmondanak azoknak), így a szivárgási tényező becslési hibája elérheti az egy-másfél nagyságrendet. A bizonytalanság csökkentésére a felszíni geofizikai és a karotázsméréseket megfelelően kombinálják. Perdomo és szerzőtársai (2014) a hidraulikus paramétereket az egyenáramú geoelektromos és fúrólukbeli fajlagosellenállás-mérések együttes alkalmazásával becsülték. Slater (2007) a felszíni indukált polarizációs méréseket fúrólukbeli áramlásméréssel, radartomográfiai és neutron-porozitásszelvényezéssel kombinálta. Guérin (2005) az elektromágneses módszerek alkalmazásának előnyeit hangsúlyozta a vízkutatásban. Dobróka és szerzőtársai (1991) felszín alatti bányák hidrogeológiai felmérése során a fúrólukbeli szeizmikus és bá-

nyabeli geoelektromos adatok együttes inverziójával megbecsülték a szeizmikus sebességet és fajlagos ellenállást, kiszámították a vízzáró rétegek vastagságát, valamint kiemelték a tektonikai zavarok, vetőzónák és a vízbeáramlás helyeit.

A standard kiértékelési eljárások mellett hasznos lehet egy-egy új (független) módszer bevonása a tároló értékelésbe, mivel az új és a meglévő módszerek együttes alkalmazása jelentősen javíthatja a kiértékelés eredményének pontosságát és megbízhatóságát. A tanulmányban egy többváltozós statisztikai módszert mutatunk be, mely a karotázsszelvényeket egyetlen eljárásban dolgozza fel a szivárgási tényező vertikális eloszlásának meghatározása céljából. A faktoranalízist általában nagyméretű statisztikai problémák változószámának csökkentésére és az adatrendszerben elrejtett, nem mérhető információk kinyerésére használják (Lawley, Maxwell 1962). A faktoranalízis földtudományi alkalmazásai azt mutatják, hogy a mérési adatokból származtatott új statisztikai változók (faktorok) a földtani szerkezetek számos kőzetfizikai jellemzőivel jól korrelálnak. Szabó (2011) üledékes kőzetek agyagtartalmának becslésére faktoranalízisen alapuló módszert vezetett be, mely több hazai és tengerentúli szénhidrogénmező fúrásaiban alkalmazhatónak bizonyult (Szabó, Dobróka 2013b). E tanulmányok azt mutatják, hogy a fúrólukszelvények varianciájának legnagyobb részéért felelős (első) faktor jó agyagindikátor, mellyel a litológiai egységek jól elkülöníthetők. A fenti eljáráshoz hasonlóan mérőszondázási adatok faktoranalízisével a felszínközeli rétegek víztelítettségét határozhatjuk meg (Szabó et al. 2012). Ez utóbbi tanulmány a faktoranalízis algoritmusának 2-D földtani szerkezetekre történő kiterjesztését és a neutronszelvény pótlásának lehetőségét is tartalmazza. A faktoranalízisen alapuló agyagtartalom meghatározásának módszerét hazai vízkutató fúrásokban Szabó és szerzőtársai (2014) vizsgálták, aminek eredményeként általános (közéltő) regressziós összefüggést találtak a kelet-magyarországi régióra. A módszert Asfahani (2014) Dél-Szíria nagy kiterjedésű bazaltos területének litológiai jellemzésére használta fel, ahol a nukleáris szelvényeket, beleértve a természetes-gamma-intenzitás-, sűrűség- és neutronporozitás-adatokat, valamint a rövid és hosszú normál szondával mért fajlagosellenállás-szelvényeket faktoranalízissel dolgozta fel. Seth és szerzőtársai (2015) a Bering-tenger törmelékes és diatomás üledékei agyagtartalmának meghatározására alkalmazta a faktoranalízisen alapuló eljárást.

Ebben a tanulmányban azt feltételezzük, hogy az első faktorszelvény megfelelően korrelál a szivárgási tényezővel, mely szoros kapcsolatban áll az elsődleges porozitással a kőzetek agyagtartalmával. A regressziós függvény ismeretében a szivárgási tényező közvetlenül előállítható a karotázs-adatrendszer faktoranalízisével. A statisztikus eljárás alkalmazhatóságát szintetikus modellkísérletek és terepi alkalmazások bizonyítják, ahol a faktoranalízissel kapott szivárgási tényezők értékét a laboratóriumi mérések eredményei és a kütteszt adatok is megerősítik.



## A Kozeny–Carman-modell

A Darcy-törvény szerint a szivárgási tényező ( $K$ ) a víz áramlásának Darcy-féle sebessége ( $q$ ) és a hidraulikus gradiens ( $dh/dl$ ) közötti sebesség dimenziójú arányossági tényező

$$q = K \frac{dh}{dl}, \quad (1)$$

mely elsődleges porozitású kőzetekben a pórusvíz sűrűségétől és viszkozitásától, a szemcseméret- és pórusméret-eloszlástól, a porozitás (agyagtartalom) nagyságától és a víztelítettségétől függ. A szivárgási tényező egyenesen arányos a permeabilitással, mely a vízáradó kőzet átteresztőképességét jellemzi. E kapcsolódó mennyiségek a fűrőlyuk-geofizikai mérésekből lezármasztathatók. A Kozeny–Carman-egyenletet széleskörűen alkalmazzák a szivárgási tényező becslésére, mely Bear (1972) alapján cm/s egységben:

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{d^2}{180} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2}, \quad (2)$$

ahol  $d$  (cm) a jellemző szemcseméret,  $\Phi$  a réteg porozitása,  $\rho_w$  (g/cm<sup>3</sup>) a pórusfolyadék sűrűsége,  $\mu$  (g cm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) a dinamikai viszkozitás és  $g$  (cm/s<sup>2</sup>) a nehézségi gyorsulás normálértéke. A Kozeny–Carman-egyenlet továbbfejlesztésével jelenleg is széles körben foglalkoznak. Srisutthiyakorn és Mavko (2015) a pórusgeometriát (ún. látszólagos pórusátmérő) és a tekervényességi együtthatót figyelembe véve módosította a (2) összefüggést. Dlubac és szerzőtársai (2010) nukleáris mágnesesrezonancia-mérésekből származtatták a Kozeny–Carman-egyenlet alapparamétereit, majd az új modellegyenletet vízzel telített agyagos homokkőmintákon tesztelték. E vizsgálatok azt mutatták, hogy a Kozeny–Carman-egyenlet megfelelő becslést ad anizotróp közegben is a szivárgási tényező értékére. Konszolidálatlan üledékes víztárolók szivárgási tényezőjének a Kozeny–Carman-modell alapján történő meghatározása, mely a szemcseméret és a porozitás értékének ismeretén alapul, tovább javítható a kompakció hatásának a figyelembevételével, ami a cementációs kitevő, tortuozitási együttható és egyéb texturális jellemzők bevonásával lehetséges. A (2) egyenletben szereplő  $d$  (cm) domináns szemcseátmérő szemeloszlás-vizsgálatából meghatározható (Juhász 2002)

$$d = \frac{d_{10} + d_{60}}{2} \sqrt{\frac{d_{10}}{d_{60}}}, \quad (3)$$

ahol  $d_{10}$  (cm) és  $d_{60}$  (cm) a kumulatív gyakorisági görbe 10% és 60%-ához tartozó szemcseátmérők. Mivel a kőzetminták elemzésével a szükséges szemcseátmérők meghatározhatók, és a porozitás fűrőlyukszelvényekből becsülhető, a szivárgási tényező szelvénye (2) alapján számítható.

## A statisztikus eljárás elmélete

Jelen tanulmányban egy új statisztikai módszert mutatunk be, mely valamennyi szelvényt felhasználja a szivárgási tényező becslésére a vizsgált szakasz mentén. A faktoranalízis

következőképpen alkalmazható fűrőlyukszelvényeken. Tároljuk  $\mathbf{d}^l$  oszlopvektorban az  $l$ -edik szondához tartozó (mérhető) fizikai változó különböző mélységpontokban mért értékeit. Az összes szelvényadatot a  $\mathbf{D}$  adatmátrixba gyűjtjük össze

$$D_{il} = d_i^l, \quad (4)$$

ahol  $i = 1, 2, \dots, N$  a vizsgált szakaszon megfigyelt mélységpontok száma és  $l = 1, 2, \dots, L$  az alkalmazott lyukeszközök száma. A bemenő adatokat először standardizáljuk:

$$\hat{D}_{il} = \frac{(D_{il} - \bar{D}_l)}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_{il} - \bar{D}_l)^2}}, \quad (5)$$

ahol  $\bar{D}_l$  jelenti az  $l$ -edik szonda által mért adatok számtani átlagát. A faktoranalízis az  $N \times L$  méretű skálázott adatmátrixot az alábbi módon bontja fel

$$\hat{\mathbf{D}} = \mathbf{F}\mathbf{W}^T + \mathbf{E}, \quad (6)$$

ahol  $\mathbf{F}$  az adatokból származtatott új statisztikai változókat (faktorokat) tartalmazó  $N \times M$  méretű mátrix,  $\mathbf{W}$  az  $L \times M$  méretű faktorsúlyok mátrixa,  $\mathbf{E}$  az  $N \times L$  méretű hibakomponens-mátrix (T a mátrix transzponáltját jelöli). A dimenziócsökkentés során a mért változóknál kevesebb számú faktort állítunk elő ( $M < L$ ). Az  $\mathbf{F}$  mátrix oszlopai a faktorszelvényeket képviselik, míg a  $\mathbf{W}$  mátrix az egyes adattípusok faktorokra eső súlyait tartalmazza. A faktorsúlyok gyakorlatilag a faktorok és a bemenő adatok közötti korreláció mértékét adják meg.

Tételezzük fel, hogy a faktorok lineárisan függetlenek ( $N^{-1}\mathbf{F}^T\mathbf{F} = \mathbf{I}$ ), ekkor a standardizált adatok korrelációs mátrixa kifejezhető a faktorsúlyokkal

$$\mathbf{R} = N^{-1}\hat{\mathbf{D}}^T\hat{\mathbf{D}} = N^{-1}(\mathbf{F}\mathbf{W}^T)^T(\mathbf{F}\mathbf{W}^T) + \mathbf{E}^2 = \mathbf{W}\mathbf{W}^T + \mathbf{\Psi}, \quad (7)$$

ahol  $\mathbf{\Psi}$  a hibavariációk diagonális mátrixa, mely a mérési változók varianciájának közös faktorokkal nem értelmezhető részét képviseli. A faktorszelvények számítása érdekében először a faktorsúlyokat és a hibavariációkat az alábbi cél-függvény minimalizálásával egyszerre becsüljük meg (Móri 1999):

$$\Omega(\mathbf{W}, \mathbf{\Psi}) = \text{tr}(\mathbf{R} - \mathbf{W}\mathbf{W}^T - \mathbf{\Psi})^2, \quad (8)$$

ahol  $\text{tr}$  az argumentumban szereplő négyzetes mátrix nyomát jelöli. A  $\mathbf{W}$  és  $\mathbf{\Psi}$  mátrixokat ismertnek feltételezve a faktorok az alábbi log-likelihood függvény maximalizálásával származtathatók

$$\lg P = -\frac{1}{2} [\lg |2\pi \mathbf{\Psi}| + (\hat{\mathbf{D}} - \mathbf{F}\mathbf{W}^T)\mathbf{\Psi}^{-1}(\hat{\mathbf{D}} - \mathbf{F}\mathbf{W}^T)^T] = \max. \quad (9)$$

A (9) egyenlet Bartlett (1953) linearitásra vonatkozó hipotézise alapján az alábbi megoldásra vezet:

$$\mathbf{F}^T = (\mathbf{W}^T\mathbf{\Psi}^{-1}\mathbf{W})^{-1}\mathbf{W}^T\mathbf{\Psi}^{-1}\hat{\mathbf{D}}^T, \quad (10)$$

ahol az  $\mathbf{F}$  mátrix oszlopai a faktorok különböző mélységpontoknál becsült értékeit (faktorszelvényeket) tartalmaz

zák. Például az első oszlop az első faktort, mely a mérési adatok varianciáját legnagyobb részben magyarázza, a második oszlop a második faktort, a harmadik a harmadikat stb. számszerűsíti. A faktorok optimális számát statisztikai próbával (Bartlett 1950) vagy közelítő eljárással határozhatjuk meg (Jöreskog 2007). A nyers faktorokat a könnyebb fizikai értelmezhetőség érdekében általában a  $\mathbf{W}\mathbf{W}^T = \mathbf{W}^*\mathbf{W}^{*T}$  és  $\mathbf{W}^* = \mathbf{W}\mathbf{V}$  transzformációnak vetik alá, ahol  $\mathbf{V}$  egy megfelelően választott  $M \times M$  méretű ortogonális mátrix. A faktorsúlyokon végzett ortogonális transzformáció (geometriai értelemben forgatás) a faktorokra nézve egyenértékű megoldást eredményez. Ebben a tanulmányban az elforgatott faktorok előállítása a Kaiser (1958) által javasolt varimax módszerrel történik.

Bontsuk fel a standardizált mérési változók  $\mathbf{R}^* = \mathbf{R} - \Psi = \mathbf{W}\mathbf{W}^T$  redukált korrelációs mátrixát az SVD eljárással (Bronshtein et al. 2007)

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \quad (11)$$

ahol  $\mathbf{U}$  és  $\mathbf{V}$   $L \times L$  méretű ortogonális mátrixok, továbbá az  $\mathbf{S}$  diagonális mátrix a pozitív (csökkenő sorrendbe állított) szinguláris értékeket tartalmazza. A mérési adatokban rejlő földtani információk különböző mértékben jelennek meg a faktorokban. A mérési adatok teljes varianciáját az  $\mathbf{S}$  mátrix főátlóbeli elemeinek összege adja, míg a  $j$ -edik faktorra eső relatív varianciarányad:

$$\sigma_j = \frac{S_{e, jj}}{\text{tr}(\mathbf{S}_e)} \cdot 100 \text{ (%).} \quad (12)$$

A faktorok és a vízázó rétegek közetfizikai paraméterei regresszióanalízissel hozhatók egymással kapcsolatba. Szabó és szerzőtársai (2014) nemlineáris (exponenciális) kapcsolatot találtak az első faktor (az  $\mathbf{F}$  mátrix első oszlopa) és konszolidálatlan vízázó rétegek agyagtartalma között. A regressziós függvény együtthatói különböző kelet-magyarországi területeken közelítőleg megegyeztek. Elsődleges porozitású kőzetek szivárgási tényezője az agyagtartalommal fordítottan arányos (Benson, Trast 1995, Sallam 2006, Shevnin et al. 2006). Ennek alapján az feltételezhető, hogy az első faktor szintén érzékeny a szivárgási tényezőre. A tanulmányban szereplő szintetikus és terepi példák az első faktor és a  $\kappa = K/K_0$  (ahol  $K_0 = 1 \text{ cm/s}$ ) dimenziótlan szivárgási tényező tizes alapú logaritmusának lineáris kapcsolatát mutatják:

$$\lg \kappa = \alpha F_1 + \beta, \quad (13)$$

ahol  $\alpha$  és  $\beta$  a mérési területre jellemző konstansok és  $F_1$  a tetszőleges intervallumba skálázott első faktor. A léptékváltást az alábbi formulával könnyen elvégezhetjük

$$F_1' = F_1'_{\min} + [(F_1'_{\max} - F_1'_{\min}) / (F_1 - F_1'_{\min})] (F_1 - F_1'_{\min}), \quad (14)$$

ahol  $F_1$  és  $F_1'$  az első faktor becsült és skálázott értéke az adott mélységpontban,  $F_1'_{\min}$  és  $F_1'_{\max}$  az első faktorszelvény szélsőértékei,  $F_1'_{\min}$  és  $F_1'_{\max}$  az első faktor előírt új alsó és felső határa. A faktor – szivárgási tényező kapcsolat erősségének jellemzésére a Pearson-féle korrelációs koefficientet használjuk:

$$R = \text{cov}(\kappa, F_1') / (\sigma_\kappa \sigma_{F_1'}), \quad (15)$$

ahol  $\text{cov}$  a minta kovarianciaoperátor,  $\sigma_\kappa$  és  $\sigma_{F_1'}$  a szivárgási tényező és a skálázott első faktor tapasztalati szórása. Szintetikus modellkísérletek esetén ismert petrofizikai modellt tételezünk fel. Ekkor a modellen számított (hibátlan) és a zajjal terhelt (kvázimért) adatok eltérését a relatív adattávolsággal jellemezhetjük:

$$D_d = \sqrt{\frac{1}{NL} \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \left( \frac{d_{il}^{(m)} - d_{il}^{(sz)}}{d_{il}^{(m)}} \right)^2} \cdot 100 \text{ (%),} \quad (16)$$

ahol  $d_{il}^{(m)}$  és  $d_{il}^{(sz)}$  jelöli az  $l$ -edik mért és számított adatot az  $i$ -edik mélységpontban. A különböző forrásból becsült szivárgási tényezők kapcsolatának erősségét a (15) korrelációs együtthatóval mérhetjük.

## Szintetikus modellkísérletek

A faktoranalízisen alapuló eljárást elsőként szimulált geológiai környezetben teszteljük. A vizsgált üledékes formáció közetfizikai modelljét ismertnek tételezzük fel, melynek paraméterei az effektív porozitás ( $POR$ ), az elárasztott zóna víztelítettsége ( $SX0$ ), az érintetlen zóna víztelítettsége ( $SW$ ), az agyagtartalom ( $VSH$ ), a homoktartalom ( $VSD$ ), a domináns szemcseátmérő ( $D$ ) és a szivárgási tényező ( $K$ ). A konszolidálatlan üledéket homok- és agyagrétegek építi fel, melyek pórusterét édesvíz és gáz (levegő) tölti ki. A levegőtelítettség az  $SG = 1 - SW$  egyenletből számítható, mely mobilis ( $SGM = SX0 - SW$ ) és kötött ( $SGIR = 1 - SX0$ ) részekre bontható. Az öt réteg összetétele fentről lefelé: kőzetlisztes homok (átlagos porozitás 18%, melynek ~42%-a levegő és ~58%-a víz), finomszemcsés homok (24% átlagos porozitás, ~42% levegő és ~58% víz), agyag (12% átlagos porozitás, 100% víz), finomszemcsés homok (24% átlagos porozitás, ~35% levegő és ~65% víz) és agyagos homok (16% átlagos porozitás, 100% víz). A jellemző szemcseméreteket az irodalom alapján határozhatjuk meg (Wentworth 1922), míg a szivárgási tényezőt az (2) összefüggés alapján számíthatjuk.

A direkt feladat keretében a fenti modell alapján sűrűség ( $DEN$ ), természetes-gamma-intenzitás- ( $GR$ ), természetes-potenciál- ( $SP$ ), mélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás- ( $RD$ ), sekélybehatolású szondával mért fajlagos ellenállás- ( $RS$ ) és neutron-neutron-intenzitás- ( $NN$ ) szelvényadatokat számíthatunk. A víztároló formációban alkalmazott szondaválaszfüggvények a következők:

$$DEN = POR \left[ (SX0 \cdot DEMF) + (1 - SX0) DEG \right] + VSH \cdot DESH + VSD \cdot DESD, \quad (17)$$

$$GR = GRSD + \frac{(VSH \cdot GRSH \cdot DESH + VSD \cdot GRSD \cdot DESD)}{DEN}, \quad (18)$$

$$SP = VSH \cdot SPSH - C \cdot \lg\left(\frac{RMF}{RW}\right)(1 - VSH), \quad (19)$$

$$NN = POR \cdot NNF + VSH \cdot NNSH + VSD \cdot NNSD, \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{RD}} = \left[ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{\sqrt{RSH}} + \frac{(\sqrt{POR})^m}{\sqrt{a \cdot RW}} \right] (\sqrt{SW})^n, \quad (21)$$

$$\frac{1}{\sqrt{RS}} = \left[ \frac{VSH^{(1-VSH/2)}}{\sqrt{RSH}} + \frac{(\sqrt{POR})^m}{\sqrt{a \cdot RMF}} \right] (\sqrt{SX0})^n, \quad (22)$$

$$POR + VSH + VSD = 1. \quad (23)$$

A (17)–(22) egyenletekben a térfogatjellemző mennyiségek mellett további zónaparaméterek is szerepelnek, melyek a közetmátrix, az agyag és a pórufolyadék fizikai tulajdonságait fejezik ki. A zónaparaméterek értékét a víztároló szakaszon állandónak tételezzük fel (1. táblázat). A mérési környezetre vonatkozó (23) anyagmérleg-egyenlet a modellparaméterekre ír elő korlátozást. A (17)–(22) egyenletekkel szintetikus adatokat számíthatunk, melyeket véletlen zajjal terhelve kvázimért szelvények állíthatók elő. A zajos adatok feldolgozásával megvizsgálható, hogy mennyire pontosan állítja elő a statisztikai eljárás az egzakt modell paramétereit. A szintetikus kísérletekkel a módszer teljesítő-képessége, stabilitása és zajérzékenysége vizsgálható.

A faktoranalízisen alapuló eljárást elsőként szintetikus modellen számított szelvényadatokon teszteljük. A modellparaméterek (*POR*, *SX0*, *SW*, *VSH*, *VSD*) aktuális értékeinek a (17)–(22) egyenletekbe való helyettesítésével hatféle szelvénytypust (*GR*, *SP*, *DEN*, *NN*, *RS*, *RD*) számítunk 250 mélységpontban, így az adatok száma 1500. A kvázimért adatrendszert úgy állítjuk elő, hogy a hibátlan adatokhoz zérus középértékű és a kívánt zajszinttel arányos szórású, Gauss-eloszlásból származó véletlen zajt adunk. Az 5% Gauss-zajt tartalmazó adatrendszer korrelációs mátrixát a 2. táblázat tartalmazza, mely szerint a mért változók viszonylag erősen korrelálnak.

A faktoranalízis eredményeként két faktort számítunk, melyek a mért adatok teljes varianciájának külön-külön a 90.8%-át és 9.2%-át magyarázzák. Az 5% Gauss-eloszlású zajjal terhelt szintetikus adatrendszer esetében a (8) egyenlet megoldásával számított faktorsúlyokat a 3. táblázat tartalmazza. Látható, hogy az első faktor leginkább a litológiai szelvényekkel, míg a második faktor a fajlagosellenállás-szelvényekkel korrelál. Ezek az eredmények összhangban vannak mélyfúrásokban kapott korábbi eredményekkel (Szabó 2011, Szabó, Dobróka 2013b, Szabó et al. 2014, Asfahani 2014). A faktorsúlyoknak a (10) egyenletbe történő helyettesítésével két faktort számítunk. A 0–100 tartományba skálázott első faktor és a szivárgási tényező lineáris kapcsolata az 1. ábrán látható. A regresszióanalízis eredményként kapott (13) modellegyenlet

**1. táblázat** | Szintetikus modellkísérletek során alkalmazott zónaparaméterek  
**Table 1** | Groundwater-zone parameters used for synthetic modeling experiments

Zónaparaméter	Definíció	Szimbólum	Konstans	Mértékegység
Természetes- $\gamma$ -intenzitás	Agyag	<i>GRSH</i>	160	API
	Homok	<i>GRSD</i>	10	API
Természetes potenciál	Agyag	<i>SPSH</i>	0	mV
	Homok	<i>SPSD</i>	12,3	mV
	Hőmérsékleti tényező	<i>C</i>	70	–
Termikus- $n^0$ -intenzitás	Agyag	<i>NNSH</i>	4,0	kcpm
	Homok	<i>NNSD</i>	7,5	kcpm
	Pórus-fluidum	<i>NNF</i>	3,0	kcpm
Gamma-gamma (sűrűség)	Iszapfiltrátum	<i>DEMF</i>	0,9982	g/cm <sup>3</sup>
	Agyag	<i>DESH</i>	2,5	g/cm <sup>3</sup>
	Homok	<i>DESD</i>	2,65	g/cm <sup>3</sup>
	Gáz (levegő)	<i>DEG</i>	1,2 · 10 <sup>-3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
Fajlagos ellenállás	Iszapfiltrátum	<i>RMF</i>	8	ohmm
	Pórusfluidum	<i>RW</i>	12	ohmm
	Agyag	<i>RSH</i>	2	ohmm
Texturális paraméterek	Cementációs kitevő	<i>m</i>	1,5	–
	Szaturációs kitevő	<i>n</i>	2,0	–
	Tekervényességi együttható	<i>a</i>	1,0	–
Hidraulikai paraméterek	Dinamikai viszkozitás	$\mu$	0,019	g/cm · s
	Nehézségi gyorsulás	<i>g</i>	981	cm/s <sup>2</sup>

**2. táblázat** Szintetikus modellen számított fúrólúkszelvevények korrelációs mátrixa  
**Table 2** Correlation matrix of noisy well logs calculated on synthetic model

	<i>SP</i>	<i>GR</i>	<i>DEN</i>	<i>NN</i>	<i>RS</i>	<i>RD</i>
<i>SP</i>	1	0,97	0,56	-0,84	-0,82	-0,80
<i>GR</i>	0,97	1	0,56	-0,86	-0,84	-0,82
<i>DEN</i>	0,56	0,56	1	-0,46	-0,51	-0,49
<i>NN</i>	-0,84	-0,86	-0,46	1	0,71	0,69
<i>RS</i>	-0,82	-0,84	-0,51	0,71	1	0,98
<i>RD</i>	-0,80	-0,82	-0,49	0,69	0,98	1

**3. táblázat** Szintetikus modellen számított szelvényadatok faktoranalízisével előálló faktorsúlyok  
**Table 3** Factor loadings derived from well logs calculated on synthetic model

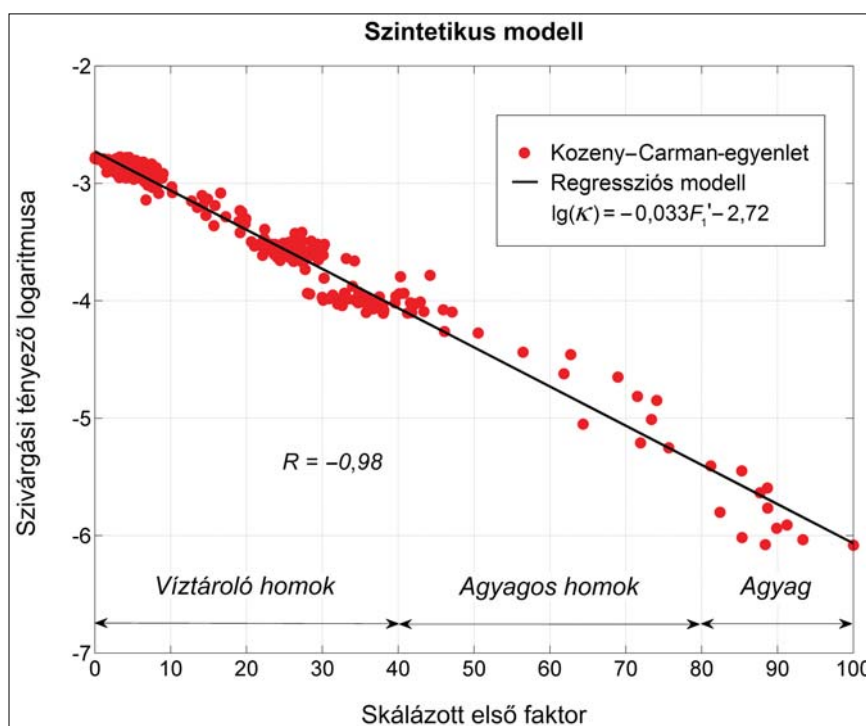
Faktor	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(DEN)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(RS)}$	$W^{(RD)}$
Első	0,97	0,98	0,55	-0,86	-0,80	-0,78
Második	-0,06	-0,08	-0,09	0,02	0,58	0,62

$$\lg \kappa = -0,033 F_1 - 2,72, \quad (24)$$

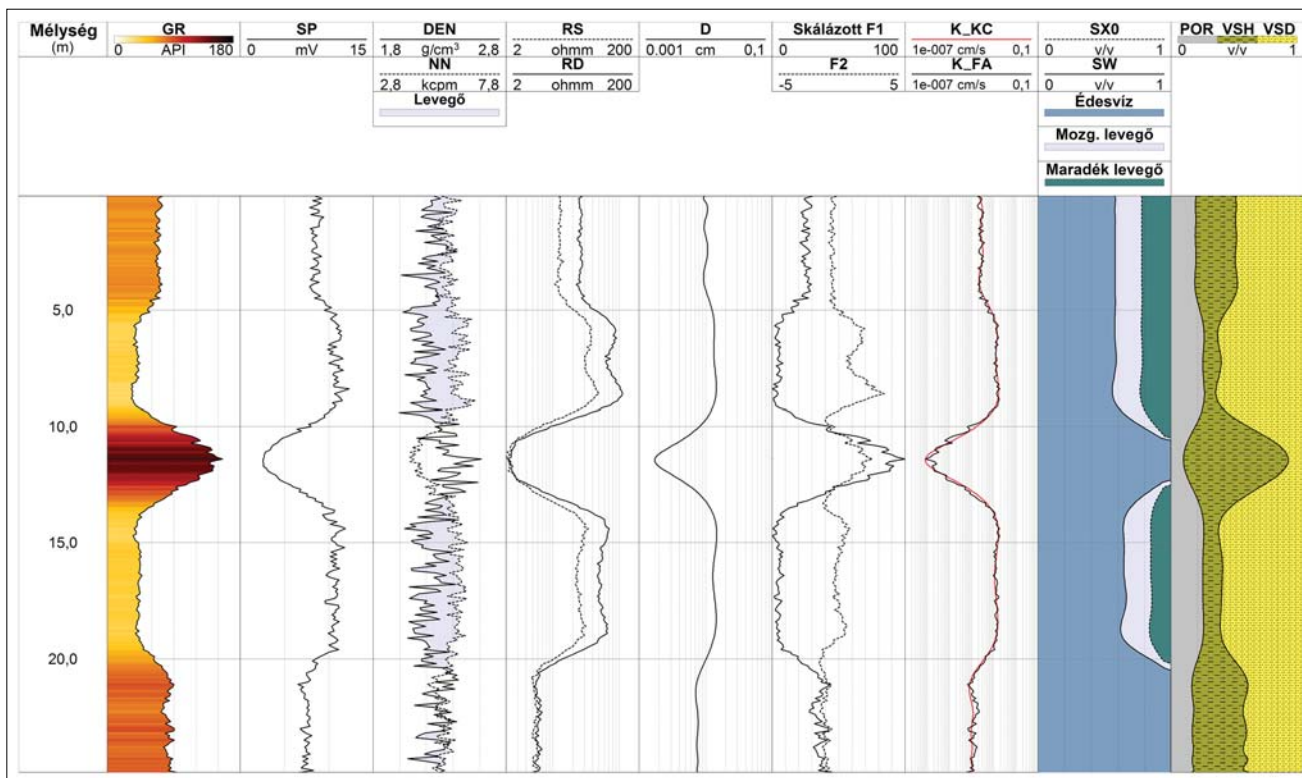
ahol a regressziós együtthatók hibahatárai 95%-os konfidenciaszint mellett:  $\alpha_{\min} = -0,034$ ,  $\alpha_{\max} = -0,032$ ,  $\beta_{\min} = -2,75$ ,  $\beta_{\max} = -2,70$ . A faktor – szivárgási tényező kapcsolat korrelációs együtthatójának értéke  $R = -0,98$ , mely erős korrelációt és a változók fordított arányosságát igazolja. A 2. ábra a bemenő szelvényeket (1–4. oszlop), a petrofizikai modellt (5., 8–9. oszlop) és a becsült faktorszelvényeket mutatja (6. osz-

lop). A (2) egyenletből számított egzakt ( $K_{KC}$ ) és a faktoranalízissel becsült ( $K_{FA}$ ) szivárgásitényező-szelvények megfelelő egyezést mutatnak. A  $R = 0,98$  korrelációs együttható szoros kapcsolatot számszerűsít.

A faktoranalízissel becsült paraméterek pontossága függ a bemenő adatokat terhelő zaj nagyságától. Az eljárás zajérzékenységének vizsgálatára a szintetikus modellen számított (hibátlan) szelvényadatokat különböző mértékű hibával terheljük. Az adatrendszerekhez tartozó (11) relatív adattávol-



**1. ábra** Szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata 5% Gauss-zajjal terhelt szintetikus szelvények esetén  
**Figure 1** Hydraulic conductivity versus factor scores derived from synthetic well-logging data contaminated by 5% Gaussian distributed noise



**2. ábra** Szintetikus modellen számított fűrőlyukszelvények, faktoranalízissel számított faktorszelvények (F1, F2), szivárgásitényező-szelvények a Kozeny–Carman- (egzakt) formulával ( $K_{KC}$ ) és faktoranalízissel meghatározva ( $K_{FA}$ )  
**Figure 2** Theoretical well logs (track 1–4) calculated on synthetic model (tracks 5, 8–9), well logs of the extracted factors (track 6), hydraulic conductivity logs estimated from Kozeny–Carman (exact) equation and factor analysis (track 7)

ságot és a statisztikus kiértékelés eredményeit a 4. táblázat tartalmazza. Az adatrendszerek 1–10%-os Gauss-zajt tartalmaznak, emellett nem Gauss-típusú (aszimmetrikus eloszlású) adatrendszereket is generálunk úgy, hogy a Gauss-zajjal terhelt adatokhoz további kiugró értékeket (az adatok véletlenszerűen kiválasztott 10%-ához ötször nagyobb mértékű véletlen zajt) adunk. Az adatrendszerek faktoranalízisével minden esetben két faktort számítunk. A táblázatban látható, hogy a faktorsúlyok nagysága és előjele nem változik jelentősen, az első faktort befolyásoló litológiai szelvények súlyai csak kis mértékű csökkenést mutatnak a növekvő adattávolsággal. A szivárgási tényező és az első skálázott faktor kapcsolatára vonatkozó regressziós együtthatók nagy pontosságot és kis változást mutatnak. A becslési hibák egyenesen arányosak az adattávolsággal, nagyságuk relatíve kicsi még nagy adattérbeli zaj esetén is. A Pearson-féle korrelációs együttható ( $R$ ) értékei a két változó szoros kapcsolatát mutatják. A nem Gauss-eloszlású zajjal terhelt adatok numerikus vizsgálata azt mutatja, hogy a regressziós kapcsolat a kiugró hibák ellenére is jó közelítéssel érvényes. A szintetikus modellvizsgálatok tanúsága szerint a statisztikai eljárás stabil és megbízható.

### A statisztikus eljárás terepi alkalmazása

#### Faktoranalízis és a Kozeny–Carman-módszer összehasonlítása

A faktoranalízisen alapuló eljárás terepi alkalmazását elsőként a Baktalórántháza-1 sz. fúrás (Szabolcs-Szatmár-Be-

reg megye, Kelet-Magyarország) adatain mutatjuk be. A területen előzetesen végzett felszíni geofizikai vizsgálatok célja a földtani szerkezet megismerése és a szénhidrogén-potenciál felmérése volt. Bár kőolajat és földgázt nem találtak, a fúrás termásvíz kinyerésére alkalmasnak bizonyult. A fúrás legfelső 80–100 méterén pleisztocén korú üledékek találhatók, döntően homokok, melyben geoelektromos módszerrel csak a szemcseméret változását lehetett nyomon követni. A fűrőlyukszelvények a homokos összlet alatt agyagokat mutattak ki. A 100–160 m intervallumon ismét homokok települtek, melyet egy agyagos formáció követ, végül 5–15 m vastagságban durvaszemcsés rétegeket azonosítottak. A konszolidálatlan porózus-permeábilis rétegek jó minőségű vizet tárolnak. A pleisztocén és pannon üledék határa 240 m mélységben jelentkezik. A pannon korú agyagos komplexum főként agyagos homokból, kavicsból, agyagos kőzetlisztből, agyagos márgából és bitumenes agyagból áll. A faktoranalízist az agyagtartalom meghatározására korábban Szabó és Kormos (2012) alkalmazta. Jelen tanulmányban a fűrőlyukszelvények faktoranalízisével a rétegek szivárgási tényezőjét értékeljük ki a 105–486 m szakaszon. Ebben a mélységintervallumban 176 magmintát is gyűjtöttek, mely a Kozeny–Carman-egyenlet alkalmazása révén a faktoranalízistől függetlenül becslést nyújt a szivárgási tényezőre.

A faktoranalízisbe bevont szelvények a természetes-gamma-intenzitás ( $GR$ ), természetes potenciál ( $SP$ ), sekély behatolású szondával mért fajlagos ellenállás ( $RS$ ), gamma-

**4. táblázat** Faktoralízis zajérzékenységi vizsgálata különböző mértékű zajjal terhelt szintetikus karotázis-adattrendszerek felhasználásával  
**Table 4** Results of noise sensitivity tests of factor analysis using several noisy synthetic well-logging data sets

Zaj	$D_d(\%)$	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(DBN)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(BS)}$	$W^{(RD)}$	$\alpha_{\min}$	$\alpha$	$\alpha_{\max}$	$\beta_{\min}$	$\beta$	$\beta_{\max}$	$R^{(r,lg\kappa)}$
Gauss-eloszlás	1,0	0,99	0,99	0,88	-0,99	-0,83	-0,80	-0,031	-0,030	-0,030	-2,74	-2,73	-2,72	-0,99
	2,0	0,99	0,99	0,78	-0,97	-0,82	-0,78	-0,033	-0,032	-0,031	-2,74	-2,72	-2,71	-0,99
	3,0	0,98	0,98	0,68	-0,93	-0,80	-0,76	-0,032	-0,031	-0,030	-2,75	-2,73	-2,71	-0,99
	4,0	0,97	0,98	0,53	-0,90	-0,77	-0,74	-0,034	-0,033	-0,032	-2,75	-2,73	-2,71	-0,98
	5,0	0,97	0,98	0,55	-0,86	-0,80	-0,78	-0,034	-0,033	-0,032	-2,75	-2,72	-2,70	-0,98
Gauss-eloszlás és kiugró adatok	10,0	0,89	0,92	0,31	-0,57	-0,66	-0,60	-0,037	-0,035	-0,033	-2,60	-2,54	-2,49	-0,93
	1,66	0,98	0,98	0,77	-0,98	-0,77	-0,74	-0,032	-0,032	-0,031	-2,78	-2,76	-2,74	-0,99
	3,22	0,98	0,98	0,63	-0,92	-0,83	-0,80	-0,030	-0,029	-0,029	-2,77	-2,75	-2,74	-0,98
	5,28	0,95	0,98	0,32	-0,74	-0,77	-0,73	-0,035	-0,034	-0,033	-2,58	-2,55	-2,52	-0,98
	7,01	0,93	0,96	0,28	-0,71	-0,71	-0,68	-0,035	-0,034	-0,033	-2,70	-2,66	-2,63	-0,96
	7,98	0,93	0,94	0,49	-0,61	-0,74	-0,71	-0,039	-0,037	-0,036	-2,34	-2,29	-2,25	-0,96
	15,64	0,80	0,87	0,03	-0,39	-0,63	-0,54	-0,043	-0,040	-0,037	-2,38	-2,30	-2,22	-0,87

gamma-intenzitás ( $GG$ ) és neutron–neutron-intenzitás ( $NN$ ), melyeket közös statisztikai eljárásban dolgozunk fel. A statisztikai minta teljes adatszám 19075. Az 5. táblázatban látható, hogy a mért változók közötti korreláció erőssége közepes. Az adatok redukált korrelációs mátrixának SVD felbontása azt mutatja, hogy a mért változók teljes varianciája két litológiai faktorról kifejezhető. Az első faktor az adatok varianciájának 82%-áért felelős, míg a második faktor magyarázza a megfigyelt információ 18%-át. A becült faktorsúlyokat a 6. táblázat tartalmazza, melyek a  $GR$  és  $RS$  szelvények első faktorra gyakorolt meghatározó szerepét hangsúlyozzák. Az első skálázott faktor és a (2) egyenlet alapján számított szivárgási tényező tízes alapú logaritmus közötti regressziós kapcsolatot a 3. ábra illusztrálja. A szivárgási tényező meghatározásánál a jellemző szemcseátmérőt a (3) összefüggés alapján számíthatjuk, melyben a  $d_{10}$  és  $d_{60}$  értéket a magminták szemeloszlási görbéiből adjuk meg. A Kozeny–Carman-egyenletben szereplő porozitást a neutronszelvényből határozzuk meg. A (20) válasz egyenletben szereplő zónaparamétereket a neutron–neutron–gamma-gamma keresztdiagramból olvashatjuk le ( $NNSD = 7,5$  kcpm,  $NNSH = 4,0$  kcpm,  $NNF = 1,0$  kcpm). Látható, hogy a (13) regressziós függvény jól közelíti az első faktor és a szivárgási tényező kapcsolatát. A Pearson-féle korrelációs együttható a lineáris kapcsolatot és a fordított arányosságot erősíti meg. Az eredményül kapott érték ( $R = -0,79$ ) erősen függ a szelvények hibájától és a magmintavételi helyek megadásának bizonytalanságától. A regressziós függvény

$$\lg \kappa = -0,046 F_1 - 3,38 \quad (25)$$

alakban írható fel, ahol a regressziós együtthatók 95%-os szignifikanciaszint mellett:  $\alpha = [-0,052, -0,041]$  és  $\beta = [-3,66, -3,11]$ . A fúrásban mért karotázisszelvényeket és a statisztikus kiértékelés eredményét a 4. ábra szemlélteti. A  $GR$  szelvény 240 m mélységben jelzi a pleisztocén és pannon komplexum határát. Az utóbbi főleg agyagos homokból, kőzetlisztből és márgából áll, míg az előbbi többnyire durvaszemcsés homok- és kavicsrétegek alkotják. A rétegsor tetején holocén árvízi üledékek találhatóak. Az agyagtartalmat a Larionov (1969) által javasolt,  $GR$  szelvényen alapuló módszerrel és faktoranalízissel is meghatározhatjuk (Szabó et al. 2014). Az utolsó oszlopban  $VSH$  a Larionov-féle agyagtartalom-szelvényt jelöli. A porozitást ( $POR$ ) az  $NN$  és  $GR$  szelvényből, míg a homoktartalmat ( $VSD$ ) a (23) egyenletből számítjuk. Mivel a rétegek a teljes szakaszon vízzel telítettek, ezért az elárasztott és az érintetlen zóna víztelítettsége 100% ( $SX0 = SW = 1$ ). Az 5. oszlopban az első skálázott és a második faktorszelvény látható. A domináns szemcseátmérők a magmintavételi helyeken tüntethetők fel (6. oszlop). A mintavételi helyeken piros körök jelölik a (2) egyenlettel számított  $K_{MAG}$  szivárgásitényező-értékeket (7. oszlop). A faktoranalízissel meghatározott folytonos szivárgásitényező-szelvényt a  $K_{FA}$  görbe ábrázolja. A két független módszerrel meghatározott szivárgásitényező-értékek szoros illeszkedést mutatnak.



**5. táblázat** | A Baktalórántháza-1 fúrásban mért szelvények korrelációs mátrixa  
**Table 5** | Correlation matrix of well logs observed in Baktalórántháza-1

	SP	GR	GG	NN	RS
SP	1	-0,13	-0,42	-0,14	-0,01
GR	-0,13	1	0,36	0,05	-0,74
GG	-0,42	0,36	1	0,02	-0,33
NN	-0,14	0,05	0,02	1	-0,06
RS	-0,01	-0,74	-0,33	-0,06	1

**6. táblázat** | A Baktalórántháza-1 fúrásban mért szelvényekből számított faktorsúlyok  
**Table 6** | Factor loadings derived from well logs collected from Baktalórántháza-1

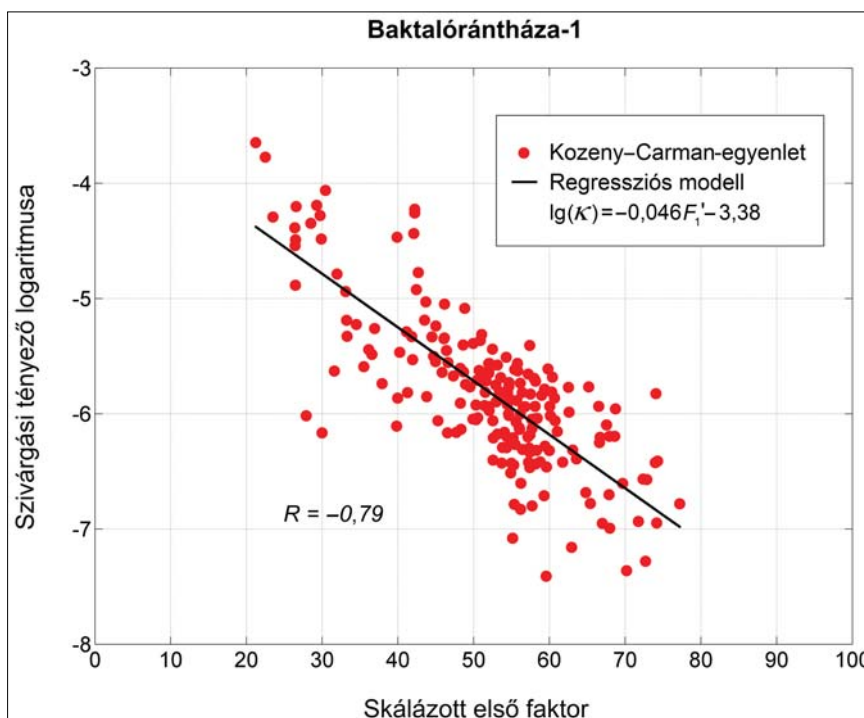
Faktor	$W^{(SP)}$	$W^{(GR)}$	$W^{(GG)}$	$W^{(NN)}$	$W^{(RS)}$
Első	-0,41	0,91	0,36	0,03	-0,79
Második	0,85	-0,15	-0,24	-0,18	0,21

**Faktoranalízis- és kütteszteredmények összehasonlítása**

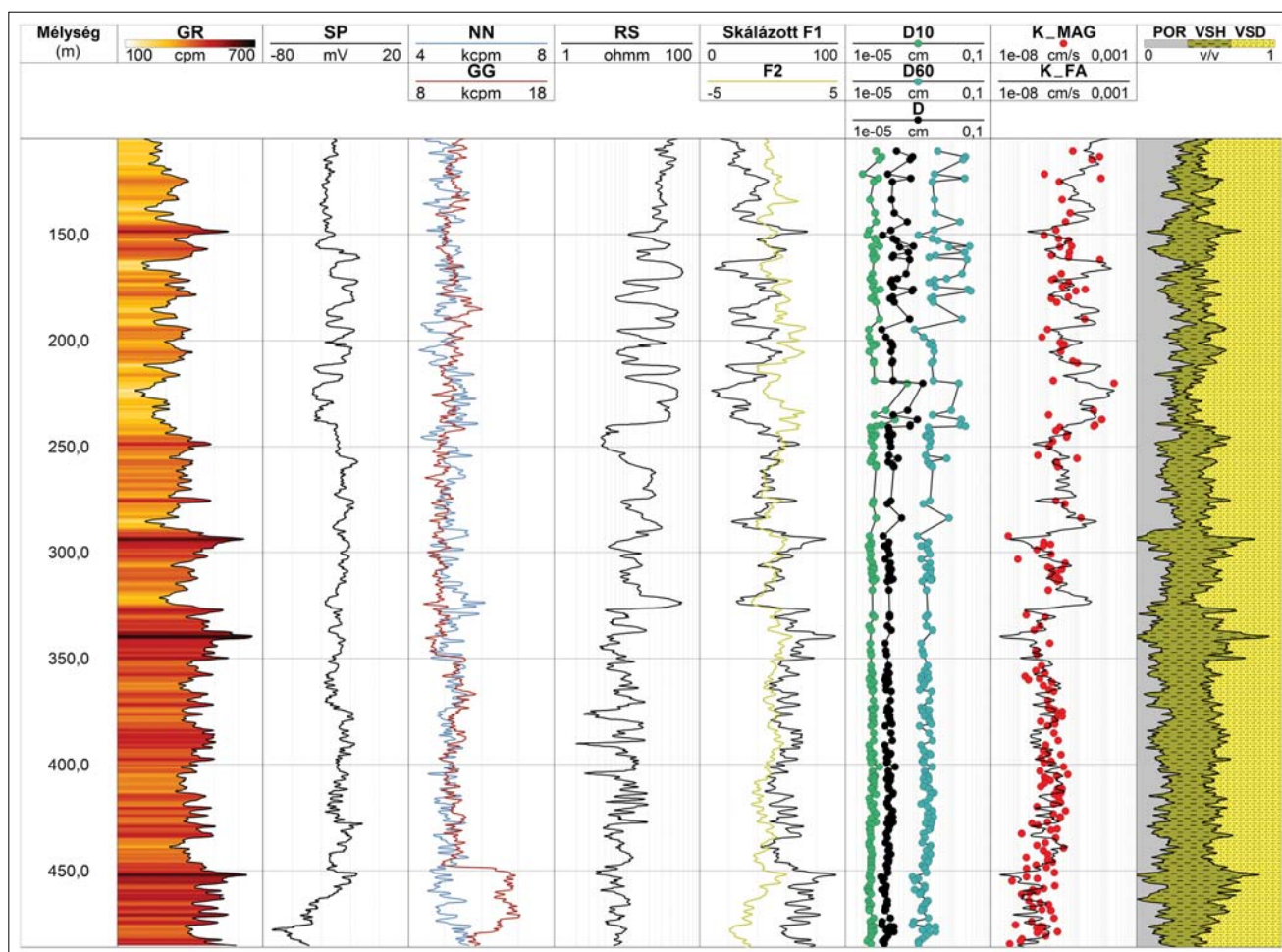
Az FL-800 jelű fúrást a Waupun (Fond du Lac megye, Wisconsin, USA) területén található ordoviciumi Sinnipee Csoport rétegtani és hidrogeológiai jellemzése céljából mélyítették. A USGS regionális vízföldtani projektjének célja az volt, hogy minél részletesebb földtani-geofizikai információt szerezzenek a felszín alatti vízkészletek gazdaságos felhasználása és védelme érdekében. Ehhez magmintákon laboratóriumi méréseket, valamint részletes fúróluk-geofizikai

és hidrogeológiai kutatásokat végeztek, melyek eredményét Dunning és Yeskis (2007) foglalta össze.

Az ordoviciumi Sinnipee Csoportot vízáadó alapkőzetnek tekintik, mely fentről lefelé a Galena, Decorah és a Platteville formációkból áll. Ezekre közvetlenül negyedidőszaki konszolidálatlan üledékek települtek vékony rétegek formájában. A vizsgált szakaszon a Sinnipee Csoport fő alkotó kőzete a dolomit és az agyagos dolomit. Kőzetmagokon végzett mérések alapján az elsődleges porozitás a dolomitban 2–4%, míg az agyagos szakaszokon maximum 10%. A dolomit tömör, melyben a repedések és a rétegzés síkjá-



**3. ábra** | Magadatokból számított szivárgási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata a Baktalórántháza-1 fúrásban  
**Figure 3** | Regression relation between hydraulic conductivity calculated from core analysis and first factor derived from well logs measured in Baktalórántháza-1



**4. ábra** A Baktalórántháza-1 fúrásban mért karotázsszelvények, faktoranalízissel becsült első és második faktorszelvény (Skálázott F1, F2), szivárgásítényező-értékek magadatokból ( $K\_MAG$ ), faktoranalízissel becsült szivárgásítényező-szelvény ( $K\_FA$ )

**Figure 4** Well logs measured in Baktalórántháza-1 (tracks 1–4), well logs of first and second factors (track 5), hydraulic conductivity logs estimated from grain-size analysis made on core samples and factor analysis (track 7)

ban megjelenő párhuzamos elválások felelősek a másodlagos porozitásért és permeabilitásért. Ezeket a geometriai jellemzőket akusztikus lyuktelevízióval, irányított radarreflexiók, valamint fúrólukák közötti radartomográfiai mérésekkel határozták meg. Az akusztikus lyuktelevíziós mérések arra utalnak, hogy a víz elsősorban a rétegzés síkjában lévő elválások mentén áramlik. Néhány elszigetelt szakaszon a hidraulikai tesztek alapján horizontális szivárgási té-

nyezőt becsültek, melyek megfelelő egyezést mutattak a hőimpulzusos áramlásmérésből származó értékekkel. Ebben a tanulmányban az ún. „slug”-tesztekből becsült szivárgási tényezőt (Hvorslev 1951) hasonlítjuk össze a faktoranalízis eredményével.

Bontsuk fel az FL-800 fúrásban mért természetes-gamma-intenzitás- ( $GR$ ), rövid és hosszú szondahossz mellett mért neutron–neutron-intenzitás- ( $NN\_közeli$  és  $NN\_távli$ ),

**7. táblázat** | Az FL-800 fúrásban mért szelvények korrelációs mátrixa  
**Table 7** | Correlation matrix of well logs measured in FL-800

	$GR$	$NN\_köz.$	$NN\_táv.$	$RES\_16$	$RES\_64$	$LAT.$	$TEMP$
$GR$	1	-0,52	-0,66	-0,65	-0,50	-0,69	-0,03
$NN\_köz.$	-0,52	1	0,59	0,46	0,40	0,47	0,12
$NN\_táv.$	-0,66	0,59	1	0,56	0,51	0,57	0,17
$RES\_16$	-0,65	0,46	0,56	1	0,92	0,98	0,36
$RES\_64$	-0,50	0,40	0,51	0,92	1	0,85	0,51
$LAT.$	-0,69	0,47	0,57	0,98	0,85	1	0,28
$TEMP$	-0,03	0,12	0,17	0,36	0,51	0,28	1

**8. táblázat** | Az FL-800 fúrásban mért szelvényekből számított faktorsúlyok  
**Table 8** | Factor loadings derived from well logs measured from FL-800

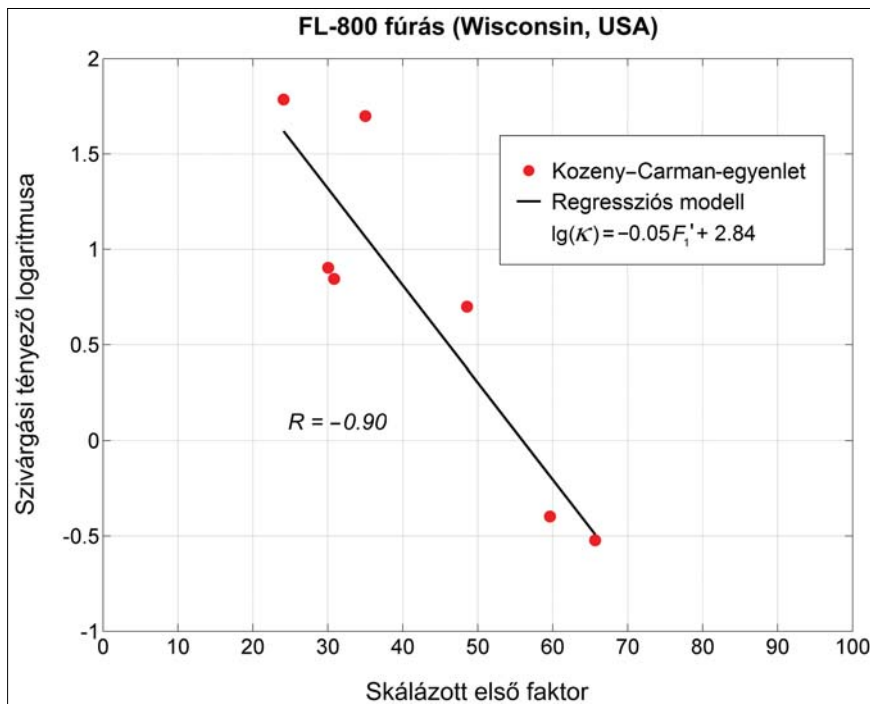
Faktor	$W^{(GR)}$	$W^{(NN-köz.)}$	$W^{(NN-táv.)}$	$W^{(RES\_16)}$	$W^{(RES\_64)}$	$W^{(LAT.)}$	$W^{(TEMP)}$
Első	-0,47	0,21	0,20	0,81	0,59	0,87	0,11
Második	-0,67	0,63	0,83	0,39	0,32	0,41	0,03
Harmadik	-0,02	0,11	0,17	0,44	0,73	0,29	0,59

fajlagosellenállás- ( $RES\_16$  – rövid normál,  $RES\_64$  – hosszú normál,  $LATERAL$  – gradiens) és hőmérséklet- ( $TEMP$ ) adatok mátrixát a (6) egyenletnek megfelelően! A faktoranalízissel feldolgozott szakaszon, amely az Egyesült Államokban használt NGVD-29 alapszinthez képest 910–750 láb (277,4–228,6 m) magasságban helyezkedik el, összesen 11298 adatot mértek. A 7. táblázatban található korrelációs mátrix a fúrólyukszelvények mérsékelt szoros kapcsolatát mutatja. A standardizált adatmátrix felbontásával három faktort számítottunk. A (11) felbontás eredményei azt mutatják, hogy a mért változók teljes varianciájának 79,1%-át az első faktor, 14,9%-át a második, a maradék 6%-át a harmadik faktor magyarázza. A faktorsúlyok a 8. táblázatban találhatóak, melyek az elsődleges porozitású kőzetekhez képest jelentős eltérést mutatnak. Az első faktor főként ellenállás-tényezőként értelmezhető, míg a litológiára vonatkozó információ megoszlik az első két faktor között. A második faktor korrelál erősebben a  $GR$  szelvényvel, ugyanakkor a második faktort a neutronszelvényvel indikált kötött víztartalom is jelentősen befolyásolja. A repedezett formációban az első faktor a fajlagos ellenállással egyenesen arányos, míg a természetes-gamma-szelvényvel fordított arányos-

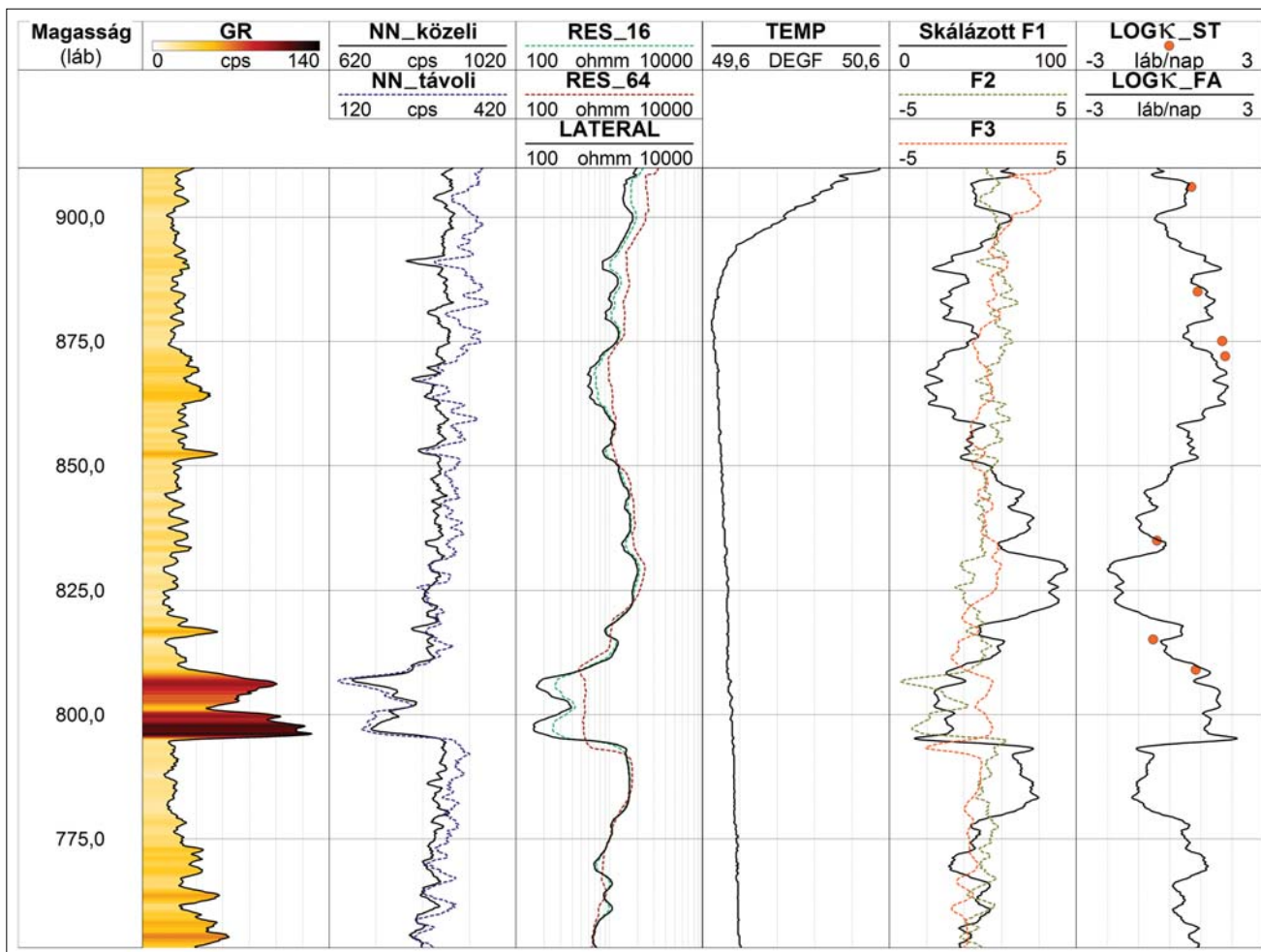
ságban áll. Mindezek mellett a küttesztekéből számított szivárgási tényező és az első faktor kapcsolata erős (5. ábra), melyet az  $R = -0,90$  korrelációs együttható is igazol. A regressziós függvény  $K_0 = 1$  láb/nap ( $1 \text{ m/s} = 2,83 \cdot 10^5$  láb/nap) dimenziótlanító tényező mellett

$$\lg \kappa = -0,05 F_1 + 2,84, \quad (26)$$

ahol a 95%-os szignifikanciaszint mellett becsült regressziós együtthatók hibataromány:  $\alpha = [-0,08, -0,02]$  és  $\beta = [1,47, 4,21]$ . A Galena Dolomit és Decorah Formációk határa 810 láb (246,9 m) tengerszint feletti magasságban fut és a Platteville Formáció teteje 790 láb (240,8 m) körül található (6. ábra). A  $GR$  szelvény az agyagtartalom változásáról tájékoztat, mely maximum 40% a Decorah Formációban. A legnagyobb szivárgási tényezőjű formáció az agyagos dolomit, kb. 870 láb (265,2 m) környékén, amit áramlásméréssel is igazoltak. Ugyanitt az akusztikusimage-szelvények is sűrűn megjelenő, közel vertikális helyzetű repedéseket és rétegzés irányú elválásokat mutattak. Feltehetőleg a Decorah Formáció nagyobb effektív porozitása okozza a relatíve magasabb szivárgási tényezőt a Platteville Formáció masszív dolomitjához képest. Önmagában a kis  $NN$  beütés-

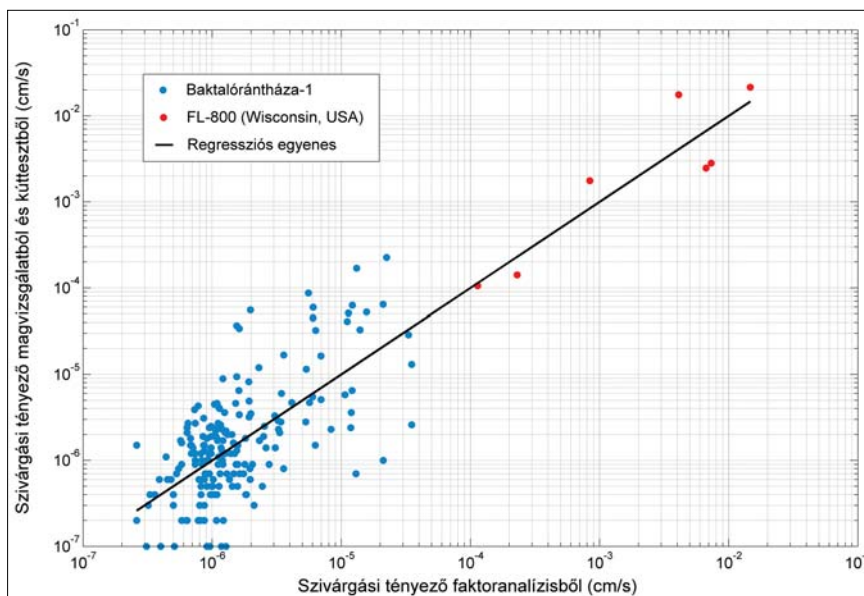


**5. ábra** | Kütteszt alapján számított szivárgási tényező és az első faktor regressziós kapcsolata az FL-800 jelű fúrásban  
**Figure 5** | Regression relation between hydraulic conductivity calculated from slug tests and first factor derived from well logs measured in FL-800



**6. ábra** Az FL-800 jelű fúrásban mért karotázsszelvények, faktoranalízissel becült első három faktorszelvény (Skálázott F1, F2, F3), a szivárgási tényező logaritmusát küttesztből ( $LOG\kappa_{ST}$ ) és faktoranalízissel becült szivárgási tényező-szelvény ( $LOG\kappa_{FA}$ )

**Figure 6** Well logs measured in FL-800 (tracks 1–4), first, second and third factor logs (track 5), hydraulic conductivity calculated from slug tests and factor analysis (track 6)



**7. ábra** Faktoranalízissel becült szivárgási tényező és a mag-, ill. küttesztadatokból származó szivárgási tényező regressziós kapcsolata

**Figure 7** Regression relation between factor analysis-derived hydraulic conductivity and hydraulic conductivity estimated from core analysis and slug tests



számok (megemelkedett látszólagos mészkőporozitás) és a nagy *GR* intenzitásértékek nagy agyagtartalmat, vagyis nem áteresztőképes kőzetet jeleznek. Mivel itt nem agyagról, hanem ordoviciumi agyagpaláról van szó, a kőzet irányított szövege az a tényező, melynek alapján az agyagos formációk a vízadók. Ez azonban nem következik sem a *GR*, sem pedig a *NN* szelvényekből, hanem kizárólag a különböző behatolású fajlagosellenállás-görbék repedezett zónabeli eltérése mutat rá a kőzet permeábilis mivoltára. Egyedül a fajlagos ellenállás csökkenése csak az agyagosság hatását mutatná. Emiatt van nagy jelentősége annak, hogy az első faktorra nemcsak a litológiai szelvények, hanem több különböző szondahosszal mért fajlagosellenállás-szelvény is jelentős hatást gyakorol. A faktoranalízis eredményeképpen kapott faktorszelvények a 6. ábra 5. oszlopában találhatóak. A 6. oszlopban a piros körökkel jelölt logaritmikus szivárgási tényező  $LOG\kappa_{ST}$  értékei a „slug”-tesztekből származnak, míg a folytonos  $LOG\kappa_{FA}$  görbét faktoranalízissel becsültük.

## Diszkusszió

Az esettanulmányok a faktoranalízisen alapuló eljárás hatékonyságát mutatják két, egymástól eltérő felépítésű földtani környezetben. A magyarországi fúrásban megfelelő egyezést találtunk az első faktor és a mágnezésből származtatott szivárgási tényezők között. A 7. ábrán a Baktalórántháza-1 fúrásban becsült szivárgási tényező-értékek a  $10^{-7} < K < 10^{-4}$  cm/s tartományban jelentkeznek. A pleisztocén korú kőzetekben a keresztábrák összetartozó pontjai nagyobb eltérést mutatnak a  $K_{FA} = K_{MAG}$  egyenletet ábrázoló (fekete) egyeneshez képest, míg a szóródás mértéke a kisebb szivárgási tényezőjű miocén formációban kisebb. Az USA-beli FL-800 fúrásban a faktoranalízisből és a kútesztekből becsült szivárgási tényező-értékek között még szorosabb illeszkedés jelentkezik. Itt a regressziós egyenes a  $10^{-4} < K \leq 10^{-2}$  cm/s intervallumon a  $K_{FA} = K_{ST}$  egyenlőséget mutatja. Az elvégzett szintetikus és terepi vizsgálatokból az a következtetés vonható le, hogy a statisztikus eljárás a vízadó formációk szivárgási tényezőjének meghatározására megfelelően alkalmazható.

## Összefoglalás

A tanulmányban egy többváltozós statisztikai eljárást javasolunk, mely víztároló képződményekben mért fúrólukszelvények egyidejű feldolgozásával állítja elő a szivárgási tényező folytonos szelvényét. A módszer jól alkalmazható a magmintavételi és szivattyúzott szakaszok között a szivárgási tényező meghatározására, ill. interpolációjára. Szintetikus modellezési kísérletek azt mutatják, hogy a becslési eredmények pontosak és megbízhatók, valamint ellentmondásmentesek különböző mértékű és eloszlású adattérbeli zaj esetén is. A módszer alkalmazása során több változó mérésekből származó, nagyméretű statisztikai mintát dolgozunk fel, mellyel a becslési hiba hatékonyan csökkenthető az egyetlen szelvényen alapuló kiértékelési módszerekkel szemben. A statisztikus eljárás különösen hatékony lehet

több fúrás adatrendszerének faktoranalízise esetében, mely alkalmas a szivárgási tényező nagyobb területre vonatkozó térbeli változásának nyomon követésére.

A tanulmányban bemutatott példák megerősítik a (13) tapasztalati összefüggés érvényességét, az összefüggés regressziós együtthatóinak az adott mérési területre történő meghatározása javasolható. A tanulmányban közölt formula mag- vagy egyéb kúteszt- (például próbaszivattyúzási) adatok hiányában is megfelelő nagyságrendi becslést ad a szivárgási tényezőre. Korábbi eredményeinkre alapozva a módszert elsősorban törmelékeny víztárolók kiértékelésére javasoljuk, ahol az első faktor és az agyagtartalom között egyenes arányosság, ill. ugyanezen faktor és a szivárgási tényező között erős fordított arányosság áll fenn. A tanulmányban példával demonstráltuk a statisztikus eljárás alkalmazhatóságát repedezett kőzetekben is. Szemecseközi porozitással rendelkező kőzetekben az első faktor főleg az agyagtartalomra érzékeny, ahol a faktorsúlyok pozitív korrelációt mutatnak a litológiai szelvényekkel. Másodlagos vagy vegyes porozitású kőzetekben, ahol az ásványos összetétel és a pórusstruktúra összetettebb, az első faktortól eltérő tulajdonságok is befolyásolhatják (például a pórustartalom vagy másodlagos permeabilitás). A repedezett kőzetekhez kapcsolódó faktorok értelmezését a jövőbeli kutatások során tovább kell vizsgálni. Jelen eredmények azt mutatják, hogy a fúróluk-geofizikai adatok faktoranalízise hasznos információt szolgáltat a vízadó kőzetek szivárgási jellemzőiről, ami jelentősen javíthatja a hidrogeológiai modell megbízhatóságát.

## Köszönetnyilvánítás

A szerző mint a PD109408 sz. Ifjúsági OTKA témavezetője köszönetet mond az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásáért. Emellett köszönetét fejezi ki a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásáért. Külön köszönetet mond Dobróka Mihály professzornak előremutató tanácsiért, Kiss Anettnek, a tanulmány előkészítésében nyújtott segítségével, Bucsi Szabó Lászlónak és Latrán Bélának a Baktalórántháza-1 fúrás terepi adatainak és a mérési területre vonatkozó speciális ismeretek átadásáért, Drahos Dezsőnek és Zilahi-Sebess Lászlónak a tanulmány lektorálása során adott hasznos javaslatáért, valamint Charles P. Dunningnak, aki hozzájárult a FL-800 fúrás karotázis-adatrendszerének felhasználásához és közzétételéhez.

## A tanulmány szerzője

Szabó Norbert Péter

## Hivatkozások

- Alger R. P. 1966: Interpretation of electric logs in fresh water wells in unconsolidated formations. SPWLA 7th Annual Logging Symposium Transactions, pp. 1–25
- Alger R. P., Harrison C. W. 1989: Improved fresh water assessment in sand aquifers utilizing geophysical well logs. The Log Analyst 30, 31–44

- Archie G. E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. SPE, Transactions of the AIME 146, 54–62
- Asfahani J. 2014: Statistical factor analysis technique for characterizing basalt through interpreting nuclear and electrical well logging data (case study from Southern Syria). Applied Radiation and Isotopes 84, 33–39
- Bartlett M. S. 1950: Tests of significance in factor analysis. British Journal of Psychology 3, 77–85
- Bartlett M. S. 1953: Factor analysis in psychology as a statistician sees it. Nordisk Psykologi's Monograph Series 3, Almqvist and Wiksell, Uppsala, pp. 23–34
- Bear J. 1972: Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, New York
- Benson C. H., Trast J. M. 1995: Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. Clays and Clay Minerals 43, 669–681
- Bronstein N., Semendyayev K. A., Musiol G., Muehlig H. 2007: Handbook of Mathematics, 5. kiadás, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Csókás J. 1995: Vízadó rétegek jellemző hozamának és a vízminőségének meghatározása geofizikai fűrőlyukszelvények alapján. Magyar Geofizika 35, 176–203
- Dlubac K., Knight R. 2010: An assessment of the use of the Kozeny-Carman relationship to estimate permeability in anisotropic materials from NMR data. SEG Denver, 2010 Annual Meeting, pp. 2644–2648
- Dobróka M., Gyulai Á., Ormos T., Csókás J., Dresen L. 1991: Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. Geophysical Prospecting 39, 643–665
- Drahos D. 2005: Inversion of engineering geophysical penetration sounding logs measured along a profile. Acta Geodetica et Geophysica Hungarica 40, 193–202
- Dunning C. P., Yeskis D. J. 2007: Lithostratigraphic and hydrogeologic characteristics of the Ordovician Sinnipee Group in the vicinity of Waupun, Fond du Lac County, Wisconsin, 1995–96. Scientific Investigations Report 2007–5114, USGS, Reston
- Guérin R. 2005: Borehole and surface-based hydrogeophysics. Hydrogeology Journal 13, 251–254
- Hvorslev M. J. 1951: Time lag and soil permeability in groundwater observations. Waterways Experimentation Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Bulletin 36, Wicksburg
- Idrissy E. H. E., De Smedt F. 2007: A comparative study of hydraulic conductivity estimations using geostatistics. Hydrogeology Journal 15, 459–470
- Juhász J. 2002: Hidrogeológia. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Jöreskog K. G. 2007: Factor analysis and its extensions. In: Cudeck R., MacCallum R. C. (szerk.) Factor analysis at 100 historical developments and future directions. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey
- Kaiser H. F. 1958: The varimax criterion for analytical rotation in factor analysis. Psychometrika 23, 187–200
- Khalil M. A., Ramalho E. C., Monteiro Santos F. A. 2011: Using resistivity logs to estimate hydraulic conductivity of a Nubian sandstone aquifer in southern Egypt. Near Surface Geophysics 9, 349–355
- Larionov V. V. 1969: Radiometry of boreholes (orosz nyelven). Nedra, Moszkva
- Lawley D. N., Maxwell A. E. 1962: Factor analysis as a statistical method. The Statistician 12, 209–229
- Móri T. 1999: Főkomponens- és faktoranalízis. ELTE Valószínűségelméleti és Statisztika Tanszék, egyetem jegyzet, pp. 1–13
- Odong J. 2013: Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. International Journal of Agriculture and Environment 1, 1–8
- Perdomo S., Ainchil J. E., Kruse E. 2014: Hydraulic parameters estimation from well logging resistivity and geoelectrical measurements. Journal of Applied Geophysics 105, 50–58
- Ross J., Ozbek M., Pinder G. F. 2007: Hydraulic conductivity estimation via fuzzy analysis of grain size data. Mathematical Geology 39, 765–780
- Roy J., Lubczynski M. 2003: The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigations. Hydrogeology Journal 11, 455–465
- Sallam O. M. 2006: Aquifers parameters estimation using well log and pumping test data, in arid regions – Step in sustainable development. The 2nd International Conference on Water Resources and Arid Environment, pp. 1–12
- Seth V., Srivardhan V., Maiti S. 2015: Evaluation of formation shaliness using factor analysis of site-U1344A of IODP expedition 323 in the Bering Sea. 77th EAGE Conference and Exhibition, Extended abstract, pp. 1–4
- Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A., Ryjov A. 2006: Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional 45, 195–207
- Slater L. 2007: Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries – A review. Surveys in Geophysics 28, 169–197
- Srisutthiyakorn N., Mavko, G. 2015: An Improved Kozeny–Carman for Irregular Pore Geometries. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015, 3015–3019
- Szabó N. P. 2011: Shale volume estimation based on the factor analysis of well-logging data. Acta Geophysica 59, 935–953
- Szabó N. P., Dobróka M., Drahos D. 2012: Factor analysis of engineering geophysical sounding data for water saturation estimation in shallow formations. Geophysics 77, WA35–WA44
- Szabó N. P., Kormos K. 2012: Édesvíztároló rétegek agyagtartalmának meghatározása fűrőlyukszelvények faktoranalízise alapján. Magyar Geofizika 53, 80–90
- Szabó N. P., Dobróka M. 2013a: Float-encoded genetic algorithm used for the inversion processing of well-logging data. In: Michalski A. (szerk.) Global optimization: Theory, developments and applications. Mathematics Research Developments, Computational Mathematics and Analysis Series, Nova Science Publishers, New York
- Szabó N. P., Dobróka M. 2013b: Extending the application of a shale volume estimation formula derived from factor analysis of wireline logging data. Mathematical Geosciences 45, 837–850
- Szabó N. P., Dobróka M., Turai E., Szűcs P. 2014: Factor analysis of borehole logs for evaluating formation shaliness: a hydrogeophysical application for groundwater studies. Hydrogeology Journal 22, 511–526
- Timur A. 1968: An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships. SPWLA 9th Annual Logging Symposium, 1968-J
- Walsh D., Turner P., Grunewald E., Zhang H., Butler J. J., Reboullet E., Knobbe S., Christy T., Lane J. W., Johnson C. D., Munday T., Fitzpatrick A. 2013: A small-diameter NMR logging tool for groundwater investigations. Groundwater 51, 914–926
- Wentworth C. K. 1922: A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journal of Geology 30, 377–392



# Magnetotellurikus adatok sorfejtéses inverziója

PRÁCSER E.<sup>1,@</sup>, DOBRÓKA M.<sup>2,&</sup>

<sup>1</sup> MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

<sup>1</sup> Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

@E-mail: pracser.erno@csfk.mta.hu; &E-mail: dobroka@uni-miskolc.hu

A hagyományos két-, illetve háromdimenziós inverziók esetében a modellparaméterek a direktfeladat-megoldáshoz szükséges rács celláihoz rendelt fajlagos ellenállás értékek. Ezeknek a száma meglehetősen nagy, ami az inverziót számításigényessé és bizonyos esetekben instabillá is teszi. A geofizikai kutatások során előfordul olyan kétdimenziós geoelektromos modell, amely lényegében rétegzett, de a rétegek jellemzői (fajlagos ellenállás, vastagság) a szelvény mentén megváltoznak. Pontos előmodellezésként az ilyen modellekre is a numerikus modellezés jöhet szóba, amely a már említett rács alapján végezhető el. Ebben az esetben az inverzió ismeretlen paramétereinek a száma lényegesen nagyobb annál, mint amivel a változó rétegvastagságú rétegzett modell megadható. Ezért az ilyen modellekre az általános kétdimenziós inverzió helyett célszerű speciális inverziós eljárást alkalmazni. A módszer lényege, hogy az ilyen modelleknél az előmodellezés lényegesen kevesebb paraméterrel történhet, mint az általános kétdimenziós esetben. Az inverziót is érdemes egy ilyen, csökkentett paraméterszámú előmodellezésre alapozni. Ebben a cikkben erre mutatunk egy eljárást magnetotellurikus mérések esetére.

## Prácser, E., Dobróka, M.: Series expansion inversion of magnetotelluric data

The model parameters of the traditional 2- and 3-dimensional inversions are the resistivities of the grid, which is used to the forward modeling. The fairly large number of these parameters requires large computer capacity and in some cases makes the inversion unstable. During the geophysical explorations often happens such a model, which is essentially one-dimensional but the features of the layers (resistivity, thickness) may vary along the profile. For the correct forward calculation for these models, the numerical modeling can be applied, which is based on the grid mentioned above. In this case, the number of unknowns is much higher than the number of parameters which defines the layered model with varying parameters. For this type of models, instead of the general two-dimensional inversion, it is worth to apply a special inversion algorithm. The essence of the method is that the forward modeling for these type of models requires significantly less parameters. It is worth to base the inversion for such a forward modeling with reduced number of parameters. In this paper, an algorithm will be presented for magnetotelluric measurements.

*Beérkezett:* 2015. július 31.; *elfogadva:* 2015. szeptember 18.

## Bevezetés

A magnetotellurikus mérési adatok értelmezésére már régóta alkalmazzák a kétdimenziós inverziót (Jupp, Vozoff 1977). A linearizált inverziós számításoknál a leginkább számításigényes feladat a Jacobi-mátrix előállításához szükséges parciális deriváltak számítása. Az előmodellezés eredménye – azaz az elméleti mérési adatok – az azokat meghatározó parciális differenciálegyenlet numerikus megoldásával kapható meg. Ehhez a mérés alatti térrészben (amelyre a kutatás kiterjed) fel kell venni egy rácsot, és a rács elemeihez hozzárendelt fajlagos ellenállásértékek lesznek az inverzió ismeretlen paraméterei. Ez meglehetősen

nagyszámú paramétert jelent. A rácsponatok – és ezzel az ismeretlenek – száma 2D esetben 1000–10 000 nagyságrendű, 3D esetben még további két nagyságrenddel számolhatunk. A parciális differenciálegyenlet numerikus megoldásakor az elméleti mérési adatok egy lineáris egyenletrendszer megoldásából adódnak. Ennek az egyenletrendszernek a modellparaméterek szerinti deriválásával egy hatékony algoritmus kapható a parciális deriváltak számítására (Haber et al. 2000, Siripunvaraporn, Egbert 2000). Ez szükségtelenné teszi a parciális deriváltak differenciáhányadossal való közelítését, ezért nincs szükség az előmodellezési feladat nagyszámú megoldására. Ezzel együtt a Jacobi-mátrix mérete (az adatok száma szorozva az ismeretlenek számával)

rendkívül nagy. Az így előálló inverz feladat erősen alulhatározott lesz (2D esetben tipikusan néhány száz adat, szemben néhányszor ezer vagy tízezer ismeretlennel). Alulhatározott inverz feladat megoldásához további (rendszerint önkényes, nem fizikai) segédfeltételek kitzúése szükséges. Erősen alulhatározott inverz feladatnál ezek száma jelentősen meghaladja a mérési adatok (fizikai feltételek) számát, következésképpen a megoldást egyre inkább a segédfeltételek határozzák meg. Ezen az úton rendszerint „simított, elkenet” eredmény modellt kapunk.

Az általunk javasolt inverziós eljárás a rétegparaméterek sorfejtéses előállításán alapul. E sorfejtéses inverzió megvalósításakor jelenleg viszont csak a differenciálhányadosok numerikus előállítása jöhet szóba. Látni fogjuk, hogy a földtani modell elegendően pontos leírásához szükséges a sorfejtési együtthatók (az inverz feladat ismeretlenjei) száma jóval kisebb is lehet, mint a mérési adatok száma. Ebben a közelítésben tehát az inverz feladat túlhatározott lehet, nincs szükség önkényes kiegészítő feltételek bevezetésére. Továbbá, mivel a paraméterek száma nagyságrendekkel kisebb, mint a hagyományos (alulhatározott) kétdimenziós inverziók esetében, a sorfejtéses inverziós eljárás számítási igénye a numerikus differenciálhányadosok számítás ellenére sem növekszik meg túlságosan.

## A sorfejtéses inverziós módszer

Azt feltételezzük, hogy a modell lényegében rétegzett, de a rétegek vastagságai, illetve fajlagos ellenállásai a szelvény mentén változhatnak. A modellparamétereket a Legendre-polinomok szerinti sorfejtés alakjában keressük. A Legendre-polinomok a  $[-1, 1]$  intervallumon vannak értelmezve, de tetszőleges  $[y_{\min}, y_{\max}]$  intervallum transzformálható erre az intervallumra. Például az  $i$ -edik réteg vastagságát a szelvény mentén az  $y$  koordinátájú pontban a

$$d_i(y) = \sum_{j=0}^n d_{i,j} P_j(\bar{y}) \quad (1)$$

képlet adja, ahol  $\bar{y}$  az  $y$  pont megfelelője a  $[-1, 1]$  intervallumon,  $P_j$  a  $j$ -edik Legendre-polinom,  $n$  a figyelembe vett polinomok száma. Hasonló képlet érvényes a fajlagos ellenállásokra is:

$$\rho_i(y) = \sum_{j=0}^n \rho_{i,j} P_j(\bar{y}). \quad (2)$$

$d_{i,k} = 0$ , ha  $k > 0$  azt jelenti, hogy az  $i$ -edik réteg vastagsága állandó a szelvény mentén ( $d_i(y) = d_{i,0}$ ). Hasonló állítás érvényes a  $\rho_{i,j}$  paraméterekre is. A  $\rho_{i,j}$  és  $d_{i,j}$  paraméterek meghatároznak egy egyszerű, kétdimenziós szerkezetet. Ha az inverz feladat megoldására az általánosan elterjedt kétdimenziós inverziók közül alkalmaznánk egyet, akkor az ismeretlen modellparaméterek száma lényegesen meghaladná a  $\rho_{i,j}$  és  $d_{i,j}$  paraméterek számát. Ezért egy olyan inverziós eljárást valósítottunk meg, amely ezeket a paramétereket tekinti ismeretlen modellparamétereknek. Az előremodellezést úgy oldottuk meg, hogy a  $\rho_{i,j}$  és  $d_{i,j}$  paraméterek által

meghatározott szerkezetet rávetítettük egy kétdimenziós rácsra, azaz annak minden egyes cellájához azt a  $\rho$  értéket rendeltük, amelyet annak koordinátái alapján az (1), (2) képletekkel meghatározott szerkezetleírás adott.

Az ilyen típusú modell-leírás alapján inverzióra létezik egy egyszerű megoldás is, amikor a szondázási görbék egydimenziós előremodellezéssel számítjuk. Azt feltételezzük, hogy egy adott  $y$  koordinátájú pont alatt a modell rétegzett és a rétegparaméterek az ismertett szerkezetleírásnak az  $y$  koordinátához tartozó rétegparaméterei. A lokálisan 1D előremodellezésen alapuló inverziót alkalmazták már egyenáramú, szeizmikus és magnetotellurikus mérések inverziójára is (Gyulai, Ormos 1999, Dobróka et al. 1991, Dobróka et al. 2013).

A kétdimenziós magnetotellurikus előremodellezést Sirpunvaraporn és Egbert inverziós programjából vettük át (Sirpunvaraporn, Egbert 2000), amely a véges különbségek módszerével számítja az elektromágneses teret. Az algoritmus E polarizációs látszólagos fajlagosellenállás- és fázisadatokat számítottunk. A most ismertetésre kerülő inverzió iterációs elven működő linearizált inverzió, és a Jacobi-matrix szinguláris értékek szerinti felbontásán (SVD) alapul.

A geofizikai inverzió részletes elemzésével számos könyv és publikáció foglalkozik (Tarantola 1984, Parker 1994), ezért most csak az SVD-n alapuló linearizált inverzió legfontosabb képleteit közöljük. A linearizált inverzió azon alapul, hogy a modellparaméterek kismértékű megváltozása és a számított adatok megváltozása között lineáris kapcsolat van:

$$\Delta \mathbf{d} = \mathcal{J} \Delta \mathbf{m},$$

ahol  $\mathbf{m}$  a modellparamétereket tartalmazó  $n$ -dimenziós vektor,  $\mathbf{d}$  az adatokat tartalmazó  $m$ -dimenziós vektor, a  $\mathcal{J}$  az előremodellezés Jacobi-mátrixa, amely a mérési adatok modellparaméterek szerinti parciális deriváltjait tartalmazza. Esetünkben feltételezhetjük, hogy a mérési adatok száma meghaladja az ismeretlen modellparaméterek számát, azaz  $n > m$ . A Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontása (Jackson 1972),

$$\mathcal{J} = \mathcal{U} \Lambda \mathcal{V}^T. \quad (3)$$

$\mathcal{U}$  az adattérbeli sajátvektorokat tartalmazó mátrix,  $\mathcal{V}$  a paramétertérbeli sajátvektorokat tartalmazó mátrix,  $\Lambda$  a sajátértékek átlós mátrixa,  $T$  jelenti a mátrix transzponáltját. (3)-ból kiindulva és kihasználva a sajátvektorok ortogonalitását megkapjuk a paraméterek megváltozását a  $\Delta \mathbf{d}$  függvényében:

$$\Delta \mathbf{m} = \mathcal{V} \Lambda^{-1} \mathcal{U}^T \Delta \mathbf{d}. \quad (4)$$

Az  $m \times m$  méretű  $\Lambda$  átlós mátrix invertálható, ha nincs 0 értékű sajátérték. Ha vannak 0 értékű sajátértékek, akkor az azokhoz tartozó oszlopvektorokat elhagyjuk az  $\mathcal{U}$  és  $\mathcal{V}$  mátrixokból, és a  $\Lambda$  mátrix méretét is ennek megfelelően csökkentjük. A linearizált inverzió egy iterációs lépése során tehát a (4) képletet alkalmazzuk. A  $\Delta \mathbf{d}$  vektor tartalmazza a mérési adatok és az aktuális közelítő modellhez tartozó elemleti adatok különbségét. A  $\Delta \mathbf{m}$  megadja a modellparamé-

terek változását annak érdekében, hogy az új modellhez tartozó elméleti adatok közelebb legyenek a mérési adatokhoz. A (4) képlet alkalmazásakor gondot okozhat ha a  $\Lambda$  mátrix átlójában kis értékű sajátértékek vannak, mivel ezek reciproka túl nagy paraméterműtést okoz, ami instabillá teszi az inverziót. Ezért egy  $\alpha$  csillapító tényezővel módosítjuk a képletet és a  $\Lambda^{-1}$  mátrix átlójában

$$1/\lambda_j \text{ helyett } 1/(\lambda_j^2 + \alpha)\text{-val számolunk.}$$

A legnagyobb és a legkisebb sajátértékek hányadosa egy jó jellemzője az inverzió stabilitásának. Egydimenziós inverziós tapasztalataink azt mutatják, hogy ha ez az arány 10000 alatt van akkor zajmentes adatok esetén valamennyi modellparaméter nagy pontossággal meghatározható. A Jacobi-mátrix alapján a paraméterek kovarianciamátrixa, korrelációs mátrixa és a szórása is könnyen számítható az adatok kovarianciamátrixából. Most azt feltételezzük, hogy valamennyi adatnak a szórása  $\sigma$ , és az egyes adatokat terhelő hibák függetlenek. Ekkor a kovariancia mátrix

$$\text{cov}(\Delta \mathbf{m}) = \sigma^2 (\mathcal{J}^T \mathcal{J})^{-1}.$$

Ennek a mátrixnak az átlója tartalmazza az egyes modellparaméterek szórásnégyzeteit. Ha nincs szükség a teljes kovarianciamátrixra, akkor a modellparaméterek szórásnégyzete a

$$\text{var}(m_k) = \sum_{i=1}^p \left( \frac{v_{k,i}}{\lambda_i} \right)^2 \tag{5}$$

képlettel is számítható.  $m_k$  jelöli az  $\mathbf{m}$  paramétervektor  $k$ -edik elemét (valamelyik réteg vastagságát, vagy fajlagos ellenállását),  $p$  a nem 0 sajátértékek száma,  $v_{k,i}$  a  $\mathcal{V}$  mátrix egy eleme. Az inverzió során kapott modellparamétereket a hozzájuk rendelt szórási értékekkel együtt érdemes elemezni.

Érdemes még szót ejteni a linearizált inverzió alkalmazásáról a sorfejtéses inverzió esetében. A linearizált inverzió alapja – amint arról már szó volt – az, hogy a paraméterek kismértékű megváltozása a modellszámítás eredményében csak kismértékű változást okoz. Itt az inverziós modell paraméterei csak közvetett módon köthetők valós fizikai paraméterekhez. A fizikai paramétereket egy polinom adja, és ezeknek az együtthatói az inverzió ismeretlen paraméterei. Ezért az együtthatók kismértékű megváltozása is okozhat nagyobb eltéréseket a fizikai paraméterekben és ezen keresztül az előremodellezés eredményében. Figyelembe kell venni, hogy az előremodellezés egy véges különbségek alapján működő numerikus differenciálegyenlet-megoldás és nem egy analitikus képlet, továbbá a sorfejtési együtthatók szerinti deriváltat a differenciahányadossal közelítjük. Ez újabb pontatlanságot okoz, és megnehezítheti a linearizált inverzió alkalmazását. Ez csak annyit jelent, hogy a kezdeti modell megválasztására ez a módszer érzékenyebb, mint a kis rétegszámú egydimenziós inverzió.

Az inverzió minőségének az egyik jellemzője az RMS, amely szám kifejezi a mérési adatok és a modellhez tartozó elméleti adatok különbségét:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{d_j^{(o)} - d_j^{(c)}}{d_j^{(o)}} \right)^2},$$

ahol  $n$  az adatok száma,  $d_j^{(o)}$  a  $j$ -edik mért adat,  $d_j^{(c)}$  a  $j$ -edik számított adat.

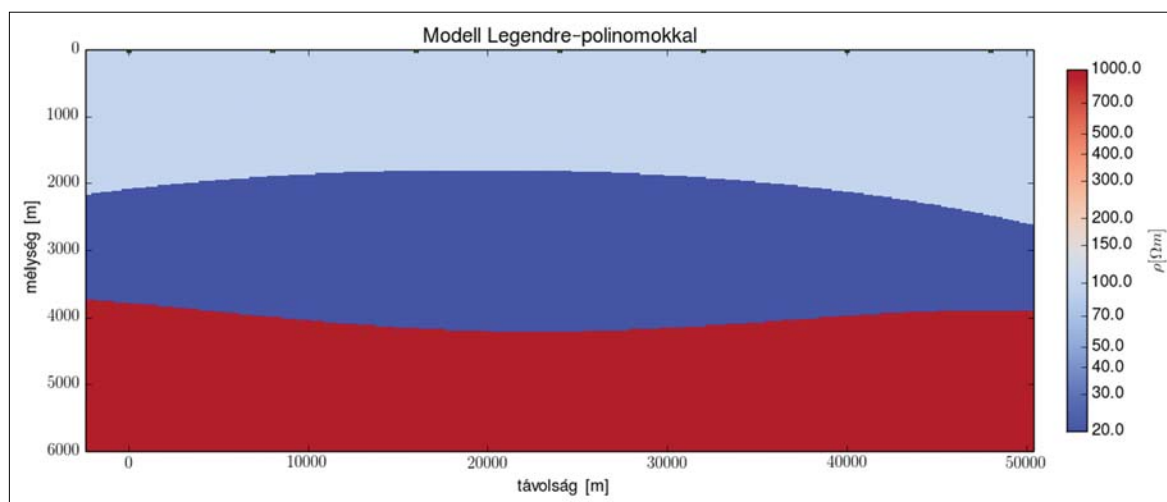
Néhány, szintetikus adatokon alapuló inverziós példán szemléltetjük a most bemutatott inverzió főbb jellemzőit. Két modellre végzünk inverziós vizsgálatokat. A két modell hasonló, csak a második modell esetén a szelvény hossza rövidebb, de a modellparaméterek ugyanazokkal a Legendre-polinomokkal írhatók le, mint az első modell esetén. Első lépésként zajmentes adatok alapján invertálunk, de megjegyzendő, hogy az előremodellezés numerikus megvalósítása eleve okozhat egy kis zajt. Össze fogunk hasonlítani algoritmusokat és modelleket, és ezeket az összehasonlításokat célszerű zajtól függetlenül megtenni. Bemutatjuk az SVD-n alapuló linearizált inverzió esetében számítható (5) szórási értékeket, valamint a sajátértékeket. A harmadik példánál az inverziót a második példa zajjal terhelt adataival végeztük el.

### Első inverziós példa

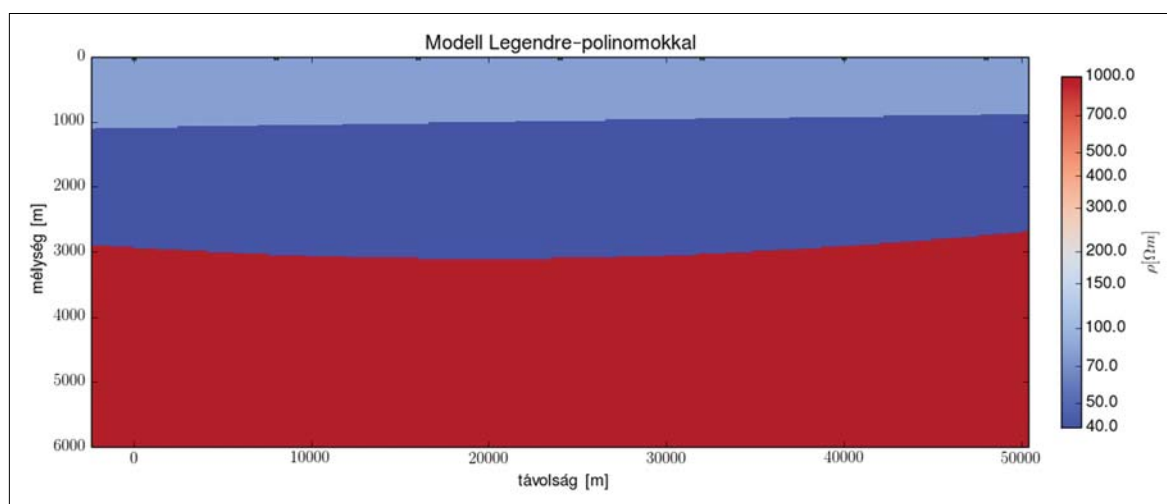
Teszteljük az inverziós eljárást szintetikus adatokon! Az adatok számítására az 1. ábrán látható modellt használtuk, a modell paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. A táblázat első sorában a sorszám a Legendre-polinom együtthatóinak a sorszámára utal. A modell háromréteges, a második réteg fajlagos ellenállása kisebb, mint az első, illetve a harmadik rétegé. Valamennyi modellparamétert, azaz a rétegek fajlagos ellenállásait és vastagságait, a Legendre-polinomok szerinti sor első három tagja határozza meg. Az inverziós program a paraméterek logaritmusával számol, ezzel kerülhetjük el, hogy rétegvastagságként, illetve ellenállásértékként negatív számokat kapjunk. Bár nem lenne feltétlenül szükséges, a program egyszerűsége érdekében a 0-nál nagyobb indexű együtthatókra is a logaritmussal számolunk. A táblázatban az 1 érték tehát azt jelenti, hogy a megfelelő sorszámmal 0. A szintetikus adatok generálására szolgáló modell esetében a rétegek fajlagos ellenállásai nem változnak a szelvény mentén. Az inverziós algoritmus viszont számol a fajlagos ellenállások szelvény menti lehetséges változásaival is. Szükség esetén az együtthatókat rögzíteni lehet.

1. táblázat | Modellparaméterek az 1. példához

Sorszám	0	1	2
$\rho_1$ [ $\Omega\text{m}$ ]	100,0	1,0	1,0
$\rho_2$ [ $\Omega\text{m}$ ]	20,0	1,0	1,0
$\rho_3$ [ $\Omega\text{m}$ ]	1000,0	1,0	1,0
$d_1$ [m]	2000,0	1,1	1,2
$d_2$ [m]	2000,0	0,9	0,7



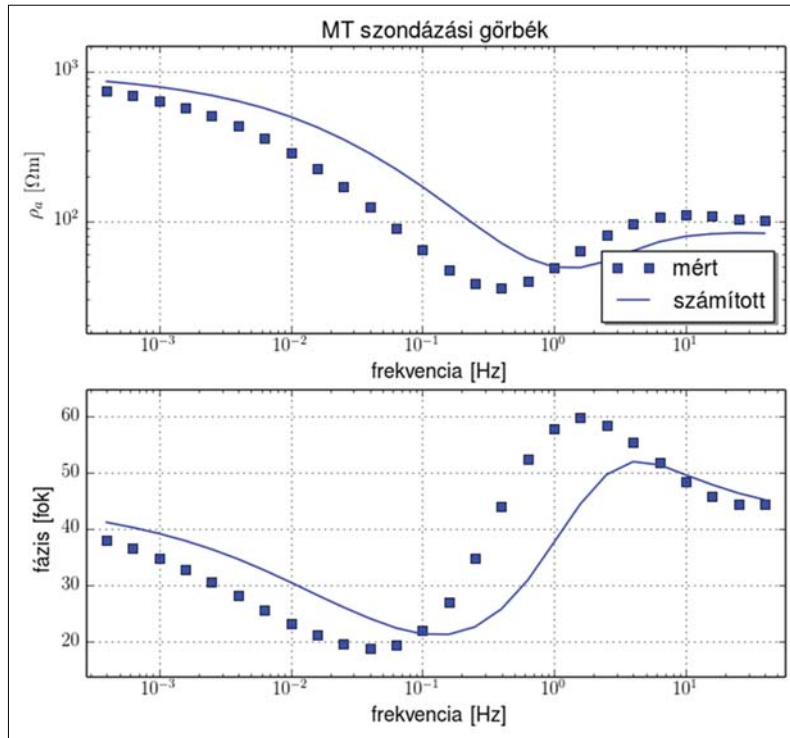
**1. ábra** | Modell a szintetikus adatok generálásához (1. példa)  
**Figure 1** | Model to generate synthetic data (1st example)



**2. ábra** | Startmodell az 1. inverziós példához  
**Figure 2** | Startmodel to the inversion of 1st example

A szelvény mentén 7 pontra számítottunk szondázási görbéket. A szomszédos szondázási pontok közötti távolság 8000 m. A linearizált inverzió startmodellje látható a 2. ábrán. A 3. szondázási ponthoz tartozó szimulált mérési adatok és a startmodellhez tartozó adatok illeszkedése látható a 3. ábrán. A többi mérési ponthoz tartozó szondázási görbét nem jelenítettük meg, mivel a jellegük teljesen hasonló. Az első inverziós kísérlet során valamennyi modellparaméter változását megengedtük. A második réteg a környezetéhez képest jól vezető, és a jól vezető rétegeknek a paraméterei külön-külön nem határozhatóak meg, csak az összegzett vízszintes irányú vezetőképességük, az egyenáramú elektromos méréseknél ez a fajta ekvivalencia jól ismert. Egy közönséges egydimenziós inverzió esetében is egy viszonylag vékony, jól vezető rétegre csak a fajlagos ellenállás és a vastagság hányadosa határozható meg. Ezért nem is volt túlságosan meglepő, hogy a szelvény menti adatokra elvégzett inverzió nem adta vissza a generáló modell réteghatárait. Ehelyett a második réteg faj-

lagos ellenállását adta meg úgy, hogy az változott a szelvény mentén. Az így kapott modell geoelektromos szempontból ekvivalens volt a generáló modellel, amit az bizonyított, hogy az egyes szondázási görbék illeszkedése és az RMS ebben az esetben is jó volt. Az ekvivalencia kiküszöbölése érdekében a továbbiakban nem engedjük meg a második réteg fajlagos ellenállásának a szelvény menti változását. A  $\rho_{2,1} = 0$  és  $\rho_{2,2} = 0$  (a táblázatban 1 szerepel) rögzített paraméterekkel elvégzett inverzió eredményeként kapott modell látható a 4. ábrán. Összevetve ezt az 1. ábrával megállapítható, hogy a két modell között nincs számottevő eltérés. A vizuális egyezésen túl elemzünk még néhány, az inverzió minőségét jellemző mennyiséget. Az 5. ábrán látható a mért és az inverziós modellhez tartozó görbék illeszkedése. Zajmentes adatokról lévén szó, az illeszkedés teljesen megfelelő. Az RMS a startmodell esetén 0,52 volt, az ábrázolt inverziós modellhez tartozó RMS 0,004. A bemutatott inverziós modellt a 40. iteráció után kaptuk, de a modell és az RMS már a 10. iteráció után



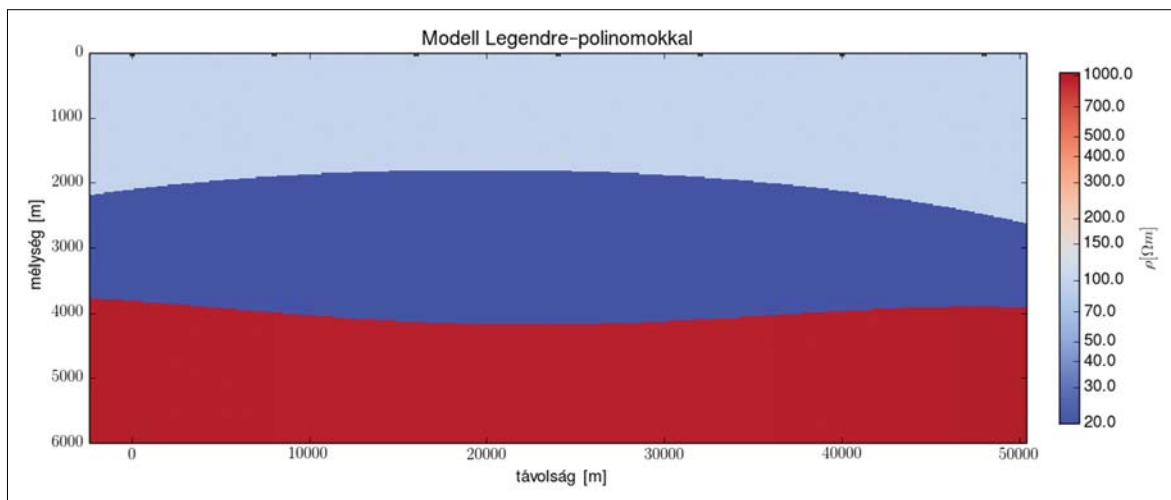
**3. ábra** | A szintetikus adatok és a startmodellhez tartozó elméleti adatok a 3. szondázási pontnál (1. példa)

**Figure 3** | Synthetic data and theoretical data belonging to the start model at the 3rd site (1st example)

beállt egy értékre, és ezután már nem változott számottevően. A kapott modellparaméterek értékeit tartalmazza a 2. táblázat. Látható, hogy amint az el is várható, a legnagyobb pontossággal az első réteg ellenállását meghatározó paramétereket kaptuk vissza, a leggyengébben a 3. réteg ellenállásának a változására hatással levő  $\rho_{3,2}$ -t. A generáló modell esetében a harmadik réteg ellenállása a szelvény mentén állandó volt, az inverziós modell esetén egy kis mértékű változás fellép.

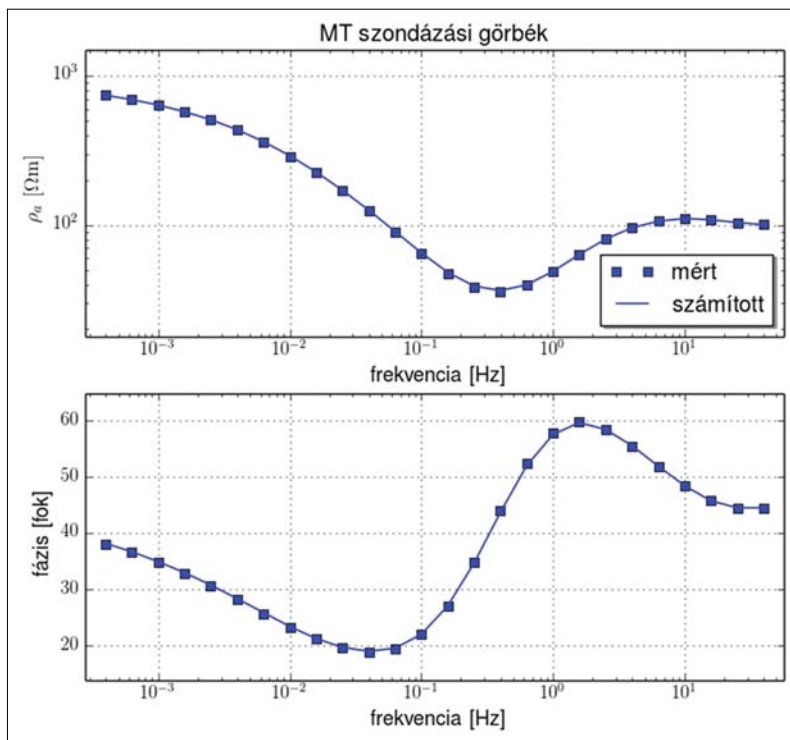
**2. táblázat** | Az inverziós modell paramerei (1. példa)

Sorszám	0	1	2
$\rho_1$ [ $\Omega\text{m}$ ]	99,96	1,002	0,098
$\rho_2$ [ $\Omega\text{m}$ ]	19,91	1,0	1,0
$\rho_3$ [ $\Omega\text{m}$ ]	987,51	1,008	1,036
$d_1$ [m]	2002,87	1,097	1,205
$d_2$ [m]	1991,01	0,900	0,713



**4. ábra** | Az 1. példa inverziós modellje

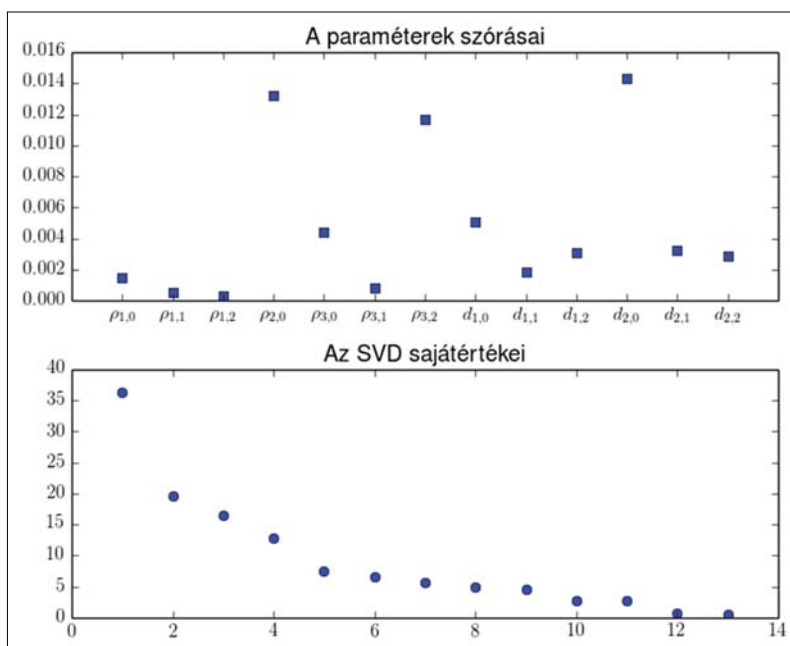
**Figure 4** | The inversion model of the 1st example



**5. ábra** | A szintetikus és a számított adatok illeszkedése a 3. mérési pontnál (1. példa)  
**Figure 5** | The fit of synthetic and calculated data at the 3rd site (1st example)

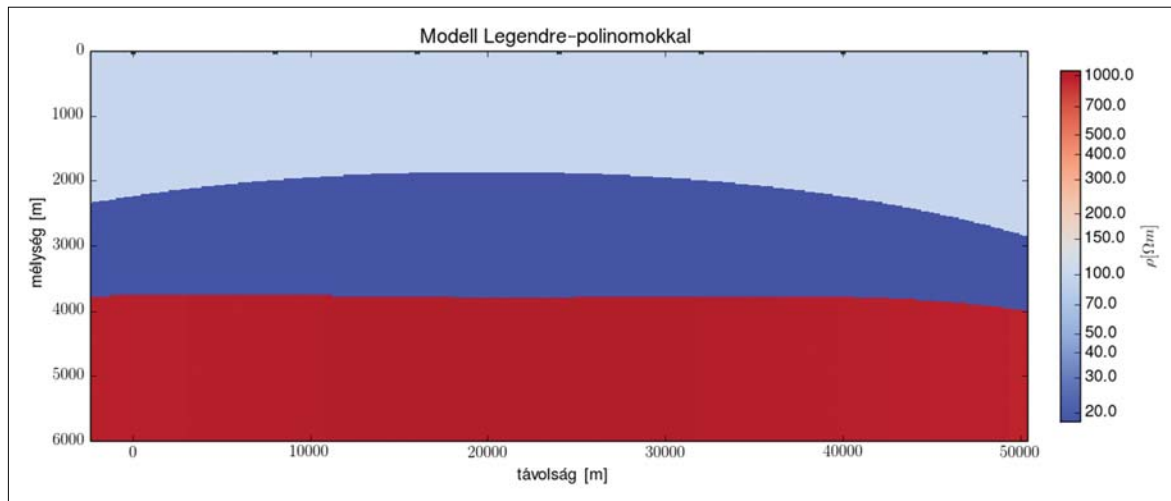
A 6. ábrán láthatóak a paraméterek szórásai, valamint az SVD sajátértékei. A két legnagyobb szórás érték a második réteg fajlagos ellenállásához és vastagságához tartozik. Ez a már említett, jól vezető rétegekre érvényes ekvivalenciából adódik. Egy másik viszonylag magas szórás érték a  $\rho_{3,2}$ -höz tartozik, ami megmagyarázza, hogy az inverziós modellben épp ennek a paraméternek az értéke esett viszonylag távol a generáló modell megfelelő

paraméterértékétől. A legkisebb szórásértékek az első réteg fajlagos ellenállását meghatározó paraméterekhez tartoznak, ami kapcsolatba hozható azzal, hogy az inverziós modell e paraméterei ezek legközelebb a generáló modell paramétereihez. A sajátértékek nagysága hasonlóan változik, mint a hasonló paraméterszámú egydimenziós inverziók során. A  $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 72,9$  arány is elfogadható minőségű inverzióra utal.



**6. ábra** | A paraméterek szórásai és az SVD sajátértékei (1. példa)  
**Figure 6** | Standard deviations of parameters and the eigenvalues of SVD (1st example)



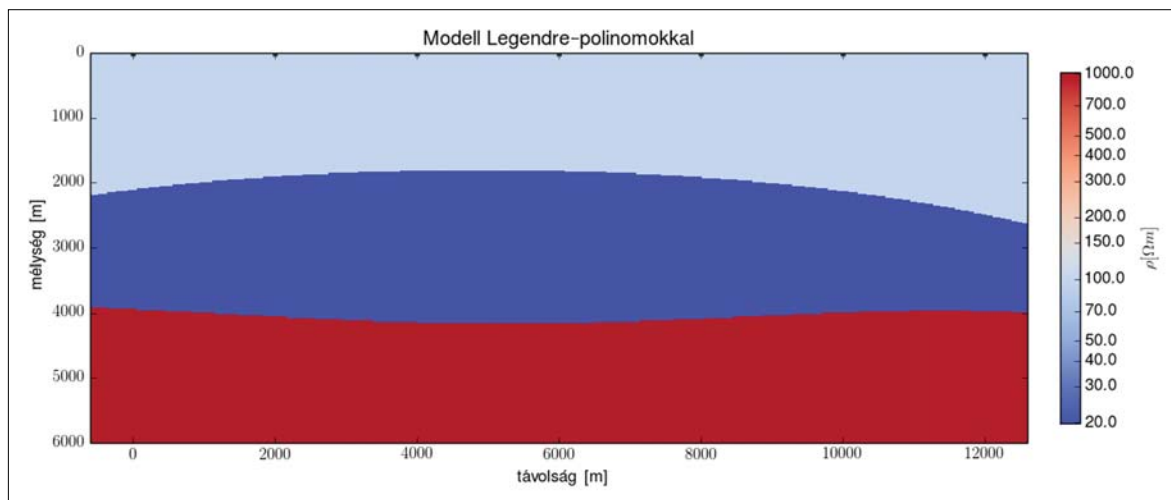


**7. ábra** | Az inverzió eredménye pontonkénti egydimenziós előremodellezéssel (1. példa)  
**Figure 7** | The result of inversion with local 1D forward modeling (1st example)

Végül nézzük meg, hogy milyen modellt kapunk, ha az inverzió a pontonkénti egydimenziós előremodellezésen alapul! Kezdeti modellként, a 4. ábrán levő modellt választottuk, hiszen most nem volt célunk az egydimenziós előremodellezésen alapuló inverzió beható elemzése, csak a kétféle előremodellezésen alapuló inverzió közötti eltérést akartuk szemléltetni. Másképpen fogalmazva, mindössze azt néztük meg, hogy a 2D-s előremodellezésen alapuló inverziós eredményt az 1D-s előremodellezésen alapuló inverzió milyen mértékben változtatja meg. A kapott modell (7. ábra) elsősorban a második réteghatárban különbözik a kétdimenziós modellezésen alapuló inverziós modelltől. Az  $RMS = 0,019$  érték nagyobb, mint a kétdimenziós előremodellezésnél, ami abból adódhat, hogy a kétdimenziós modell alapján számított szintetikus szondázási görbékhez nem illeszthetők pontosan egydimenziós modellhez tartozó szondázási görbék.

### Második inverziós példa

A következő tesztmodell teljesen hasonló lesz az előzőhöz. Azt nézzük meg, hogy miként működik az inverzió abban az esetben, ha a réteghatárok változása a szelvény mentén nagyobb mértékű. Ehhez az előző modellt zsugorítottuk a szelvény irányában, a szondázási pontok közötti távolság így 8 km helyett 2 km lett. Az inverziós modell egyéb paraméterei, a Legendre-polinomok együtthatói változatlanok maradtak. Ezért a generáló modellt külön meg sem jelenítjük, mivel csak a vízszintes tengely skálázásában különbözik az 1. ábrán ábrázolt modelltől. Az inverziót ugyanolyan módon alkalmaztuk, mint az előző példánál, ugyanúgy generáltuk a zajmentes szintetikus adatokat, ugyanazokat a kezdeti modellparamétereket használtuk. Az eredményül kapott inverziós modell az 8. ábrán látható. A vízszintes tengely skálázásán látszik, hogy itt a szondázási pontok 8 km helyett 2 km-enként vannak. A szondázási görbék illesz-



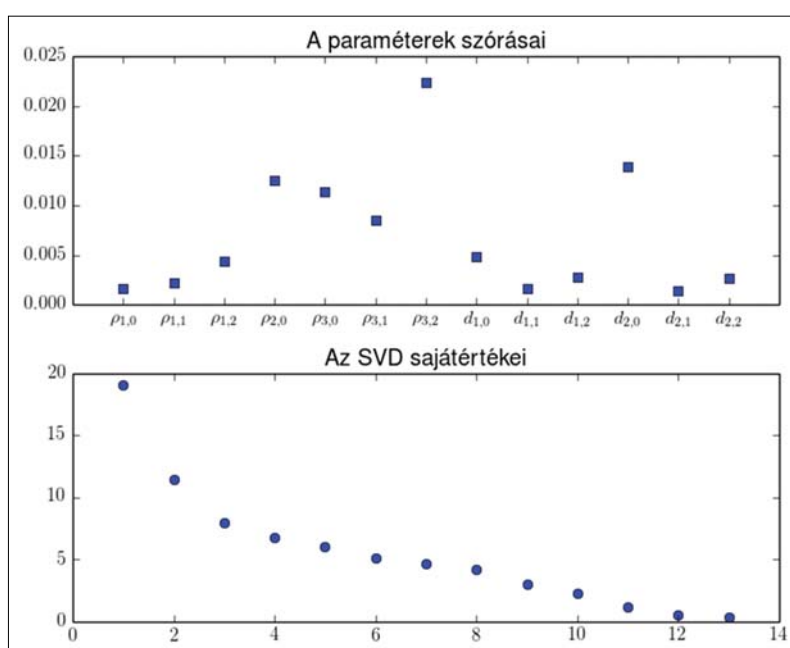
**8. ábra** | A második példa inverziós eredménye  
**Figure 8** | Inversion result of the second example

kedését ennél a modellenél nem jelenítettük meg, hiszen teljesen hasonló jellelgű ábrák lennének, mint a 3. és az 5. ábra. Az RMS nagyságrendje hasonlóan alakult, mint az első inverziónál. Szemmel látható, hogy a második réteghatár görbülete kissé kisebb, mint az 1. és a 4. ábrán. Ennek az oka jól megmagyarázható a modellparaméterekkel. A mélységet megjelenítő vonalak görbületét a Legendre-polinomok másodfokú tagjainak az együttthatói határozzák meg, azaz a  $d_{1,2}$  és  $d_{2,2}$ . A 3. táblázatból látszik, hogy a 2. réteghatár meghatározásában szereplő  $d_{2,2}$  paraméter értéke (0,752) itt most távolabb esik a generáló modell megfelelő paraméterétől (0,700), mint az első példa esetében (0,713). A többi modellparaméter esetén is vannak eltérések, de azok kisebbek. A 9. ábrán látható, hogy itt a  $\rho_{3,2}$  paraméter szórása a legnagyobb. A következő két legnagyobb szórás a második réteg

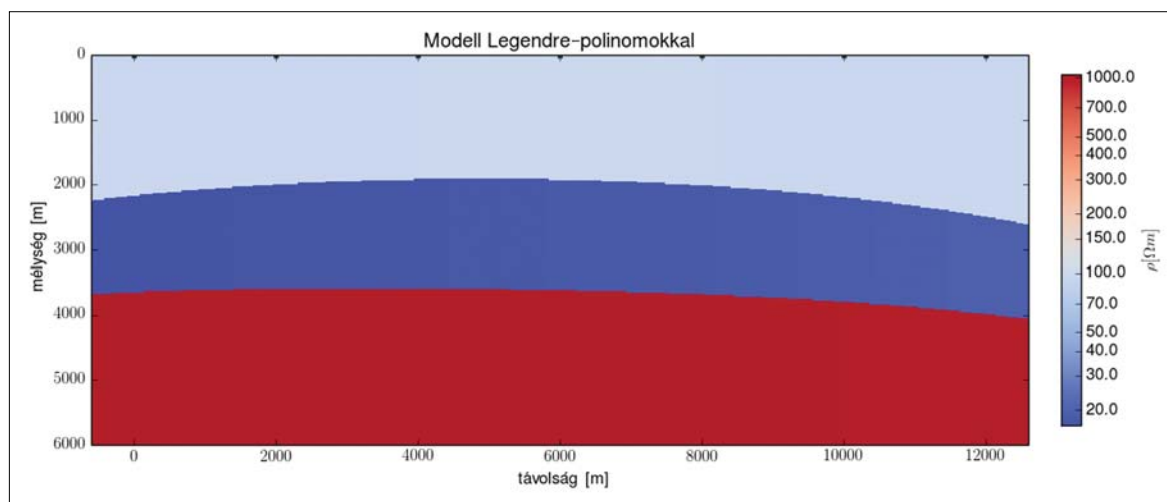
fajlagos ellenállásához és vastagságához tartozik, ami a már említett ekvivalencia következménye. Abban nincs változás, hogy a legbiztosabban az első réteg paraméterei határozhatók meg. A legnagyobb és legkisebb sajátérték hányadosa most 45,28, ami kissé jobb, mint az előző példánál.

3. táblázat | Az inverziós modell paraméterei a 2. példánál

Sorszám	0	1	2
$\rho_1$ [ $\Omega\text{m}$ ]	100,02	1,000	1,000
$\rho_2$ [ $\Omega\text{m}$ ]	19,80	1,0	1,0
$\rho_3$ [ $\Omega\text{m}$ ]	1009,38	0,994	0,988
$d_1$ [m]	2006,84	1,096	1,205
$d_2$ [m]	2023,50	0,887	0,752



9. ábra | A paraméterek szórásai és az SVD sajátértékei (2. példa)  
Figure 9 | Standard deviations of parameters and the eigenvalues of SVD (2nd example)



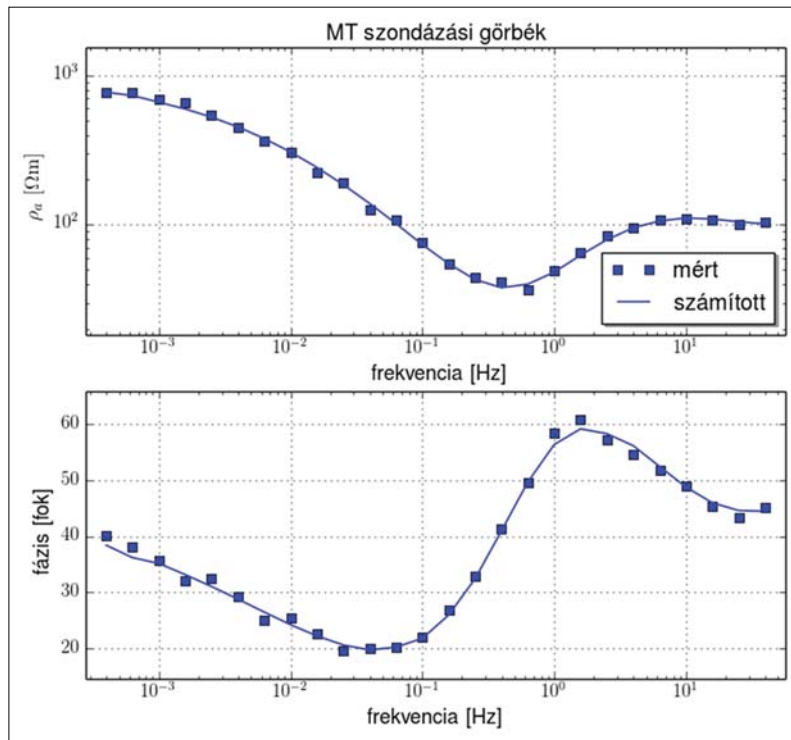
10. ábra | Az inverzió eredménye pontonkénti egydimenziós előmodellezéssel (2. példa)  
Figure 10 | The result of inversion with local 1D forward modeling (2nd example)

Végezzük el erre a modellre is a pontonkénti egydimenziós modellezésen alapuló inverziót (10. ábra). Az RMS ebben az esetben 0,014. Összehasonlítva ezt a modellt a 7. ábrán látható modellel megállapíthatjuk, hogy a modell kismértékben romlott – a szelvény közepe táján a második réteg vékonyabb lett – távolabb került a generáló modelltől. A második réteghatár görbülete is ellentétes lett a generáló modell második réteghatárának a görbületéhez képest. A paraméterek teljes táblázatát ennél az inverziónál nem közöljük, csak azt a két paramétert emeljük ki, amelyek esetén a legnagyobb az eltérés a várt értékhez képest. A  $d_{2,2}$  paraméter értéke 0,899 lett 0,700 helyett, a  $\rho_{3,0}$  értéke 1603,53

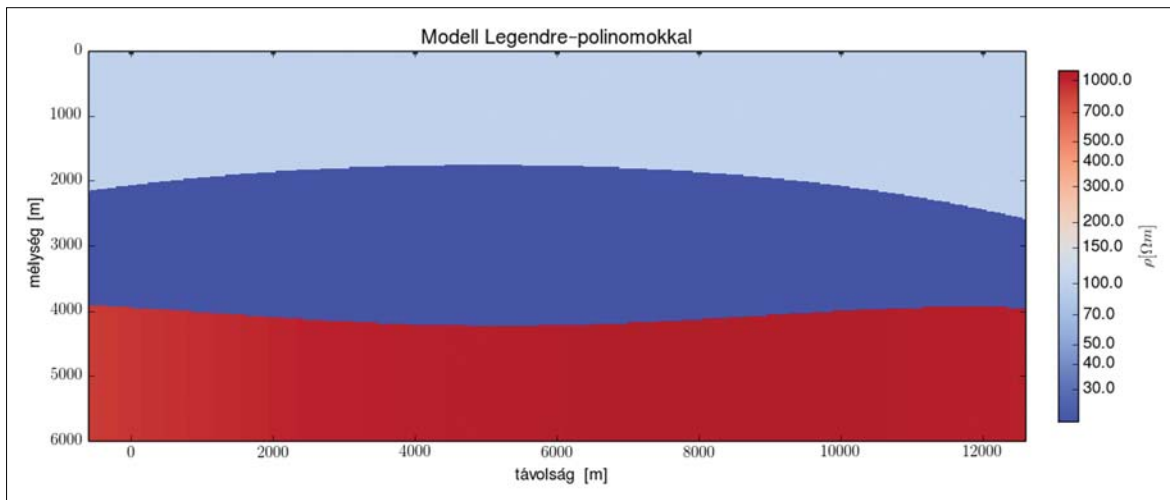
lett 2000,0 helyett. Mindkét eltérés lényegesen nagyobb annál, mint amilyen paramétereltéréseket kaptunk a két-dimenziós előremodellezésen alapuló inverziónál.

### Harmadik inverziós példa zajjal terhelt adatokkal

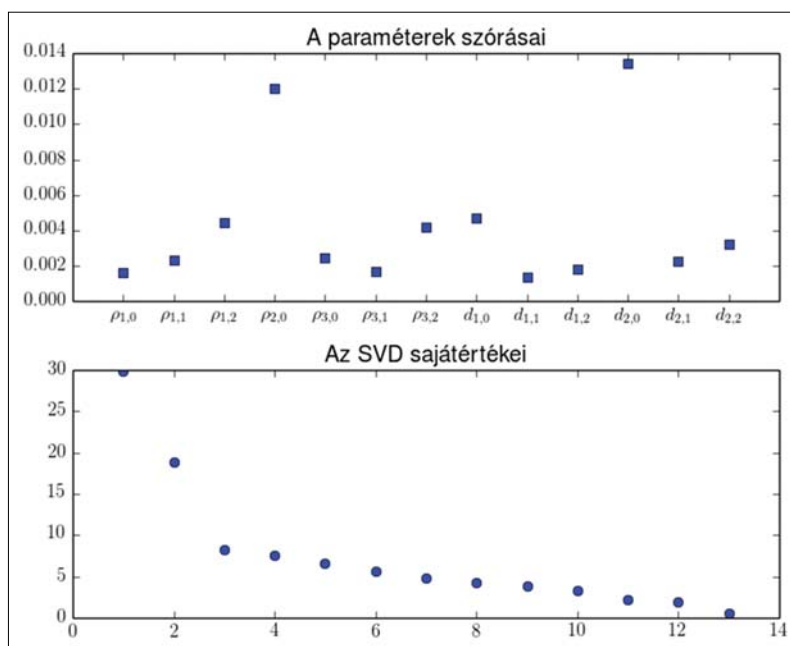
Az ismertetett inverziós eljárást zajjal terhelt adatokon is teszteltük. Ennek a sikeressége egy előfeltétele az inverzió gyakorlatban való alkalmazásának. Kiinduló modellként, a szintetikus adatok generálására a 2. példa modelljét alkal-



11. ábra | A zajos és számított adatok illeszkedése a 3. pontnál  
 Figure 11 | The fit of noisy and calculated data at site 3



12. ábra | A harmadik inverziós modell, zajjal terhelt adatokból  
 Figure 12 | The third inversion model from noisy data



**13. ábra** | A paraméterek szórásai és az SVD sajátértékei (3. példa)  
**Figure 13** | Standard deviations of parameters and the eigenvalues of SVD (3rd example)

maztuk, a mérési pontok koordinátái, a frekvenciák ugyanazok maradtak. A modell megfelel az *1. ábrán* levőnek, csak a tengely skálázása más, a mérési pontok 2 km-enként vannak. Ebben az esetben az adatokhoz 5% Gauss-eloszlású zajt adtunk. Egyébként az inverziót ugyanazzal a kezdeti modellel futtattuk. A *11. ábrán* látható a zajjal terhelt szintetikus adatok és az inverziós modellhez tartozó elméleti adatok illeszkedése a 3. szondázási pontnál. A *12. ábrán* látható az inverziós modell. Szemmel láthatóan alig különbözik a zajmentes adatokból kapott modelltől (*8. ábra*). Az RMS értéke itt természetesen nagyobb, mint a zajjal nem terhelt adatok esetében (0,044). A kapott modellparaméterek értékeit tartalmazza a *4. táblázat*. Ezek a 40. iteráció után kapott értékek, de meg kell jegyezni, hogy az RMS már a 20. iteráció után is 0,044 érték körül mozgott, a modellparaméterek is változtak kissé. Az inverzió az ilyen esetben, amikor az iterációs lépések során az RMS már érdemben nem változik, ekvivalens modellek sorát adja, azaz a modellparaméterek kissé változhatnak, de a modelltől számított elméleti mérési adatok csak elenyésző mértékben módosulnak. Ezt figyelembe kell venni az egyes modellparaméterek összehasonlításánál.

**4. táblázat** | A harmadik inverziós modell paraméterei zajjal terhelt adatok esetén

Sorszám	0	1	2
$\rho_1$ [ $\Omega\text{m}$ ]	100,06	1,001	0,993
$\rho_2$ [ $\Omega\text{m}$ ]	20,44	1,0	1,0
$\rho_3$ [ $\Omega\text{m}$ ]	1063,14	1,027	0,904
$d_1$ [m]	1959,92	1,168	1,240
$d_2$ [m]	2058,23	0,852	0,718

A paraméterek szórásértékei a *13. ábrán* láthatók. Érdekes, hogy a 2. példánál a  $\rho_{3,2}$ -höz tartozó viszonylag nagy szórásérték itt viszonylag lecsökkent. A valódi ekvivalenciát jellemző kapcsolatra utaló,  $\rho_{2,0}$ -hoz és  $d_{2,0}$ -hoz tartozó szórásértékek itt jobban elkülönülnek a többi paraméter szórásértékeitől, mint a zajmentes esetben. A legnagyobb és legkisebb sajátérték hányadosa 55,18, ami nem jelent lényeges különbséget az inverzió stabilitására vonatkozólag az előző két példához képest.

## Összefoglalás

Speciális, változó rétegvastagságú szerkezetekre sorfejtéses inverziós eljárást mutattunk be. Az előremodellezés és a parciális deriváltak számítása az általános numerikus 2D modellező programmal történt. Szintetikus adatokon bemutattuk, hogy az iterációs elven működő inverzió jól adja vissza a generáló modellt. Példákon mutattuk meg, hogy a bemutatott inverziós algoritmus jobb eredményt ad, mint a pontonkénti egydimenziós előremodellezésen alapuló inverzió. Az inverziót eredményesen teszteltük zajjal terhelt adatokon is. Ezért a gyakorlati alkalmazásnak sem látjuk akadályát.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a K109441. számú OTKA projektben kapott kutatási támogatásáért.

## A tanulmány szerzői

Prácsér Ernő, Dobróka Mihály

**Hivatkozások**

- Dobróka M., Gyulai A., Ormos T., Csókás J., Dresen L. (1991): Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. *Geophysical Prospecting* 39, 643–665
- Dobróka M., Prácser E., Turai E., Kavanda R. (2013): Quick imaging of MT data using an approximate inversion algorithm. *Acta Geodaetica et Geophysica* 48/1, 17–25
- Gyulai Á., Ormos T. (1999): A new procedure for the interpretation of VES data: 1.5-D simultaneous inversion method. *Journal of Applied Geophysics* 41, 1–17
- Haber E., Ascher U. M., Aruliah D. A., Oldenburg D. W. (2000): Fast simulation of 3D electromagnetic problems using potentials. *Journal of Computational Physics*, 163/1, 150–171
- Jackson D. D. (1972): Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data. *Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society* 28, 97–190
- Jupp D. L. B., Vozoff K. (1977): Two-dimensional magnetotelluric inversion. *Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society* 50, 333–352
- Parker R. L. (1994): *Geophysical Inverse Theory*. Princeton University Press, p. 386
- Siripunvaraporn W., G. Egbert (2000): An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics* 65, 791–803
- Tarantola A. (1984). *Inverse Problem Theory*. Elsevier Science Publishers B. V., p. 613

# Új fejezet az Eötvös-ingával végzett magyarországi mérések és felhasználásuk történetében

VÖLGYESI L.<sup>@</sup>, TÓTH GY., ULTMANN Z.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest  
<sup>@</sup>E-mail: volgyesi@eik.bme.hu

Az 1910-es évek első nagy sikerei, majd az 1950-es évektől az ingamérések második aranykora után az 1960-as évek végére gyakorlatilag befejeződtek Magyarországon a földtani kutatás céljából végzett ingamérések. Az ezt követő hosszabb szünet után napjainkban a fizikai geodézia tudománya újabb igényekkel jelentkezett további mérések végzésére. A korábban gyártott Eötvös-ingák közül jelenleg két műszert sikerült felújítva mérésekre alkalmassá tenni. Az egyik a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének Auterbal-ingája, a másik ennek az 1950-es évekre továbbfejlesztett változata, az ELGI E54 típusú műszere. Eötvös-ingával végzett terepi mérések éppen 40 éves szünetelése után 2007-ben indítottuk újra a méréseket. A tanulmányban röviden áttekintjük a fontosabb műszerfejlesztéseket, vizsgálatokat és az Eötvös-ingával végzett mérések fizikai geodéziai-geofizikai alkalmazásának mai jelentőségét.

## Völgyesi, L., Tóth, Gy., Ultmann, Z.: New chapter in the history of the Hungarian torsion balance measurements and their applications

Following the first big success in the 1910s and the second „Golden Age” in the 1950s torsion balance measurements for geological exploration have practically finished in Hungary by the end of the 1960s. After a long pause physical geodesy needed further measurements. Hence two Eötvös torsion balances manufactured previously has successfully been renovated for making measurements. One of these instruments is an Auterbal balance of the Department of Geodesy and Surveying, BME (Budapest University of Technology and Economics); the other one is an improved type E54 instrument of ELGI (Eötvös Loránd Geophysical Institute) used in the 1950s. After 40 years interruption field torsion balance measurements have been restarted in 2007. This paper shortly summarizes the more important instrument developments, examinations and the significance of the applications of the torsion balance measurements in physical geodesy and geophysics.

*Beérkezett:* 2015. július 2.; *elfogadva:* 2015. szeptember 21.

## 1. Bevezetés

Magyarországon a múlt században közel 60 000 mérést végeztek Eötvös-ingával elsősorban ásványi nyersanyagok kutatása céljából (Szabó 2004). Napjainkban már lényegesen hatékonyabb földtani kutatási módszereket alkalmaznak, ezért az Eötvös-ingával végzett mérések geofizikai hasznosítása helyett a geodéziai hasznosítás került előtérbe. A geofizikai alkalmazások céljára korábban csak a  $W_{zx}$  és a  $W_{zy}$  horizontális gradienseket dolgozták fel, a  $W_{\Delta}$  és  $W_{\gamma}$  görbületes adatok jórészt feldolgozatlanok maradtak. A geodéziában viszont éppen a görbületes gradiensek alapján számíthatók függővonal-elhajlások, amelyeknek többek között

a geoid finomszerkezetének meghatározása szempontjából van nagy jelentősége (Völgyesi 1993, 1995, 2001, 2005).

Az Eötvös-ingával végzett mérések geodéziai célú felhasználási lehetőségei a legutóbbi időkben tovább bővültek (Völgyesi 2014, Völgyesi et al. 2005, 2009b). A  $W_{zx}$  és a  $W_{zy}$  horizontális gradiensek felhasználásával a nehézségi erőtér, illetve a gravitációs anomáliák határozhatók meg interpolációval (Völgyesi et al. 2004, 2007), a  $W_{zx}$ ,  $W_{zy}$  horizontális gradiensek és a  $W_{\Delta}$ ,  $W_{\gamma}$  görbületes adatok együttes felhasználásával pedig vertikális gradiensek állíthatók elő az Eötvös-ingával végzett mérési pontokban (Haalck 1950, Tóth et al. 2004a, 2005, Tóth 2007). Új fejezetet nyitott az alkalmazások történetében a nehézségi erőtér 3D potenciálfügg-



vényének inverziós előállítás, amelyből valamennyi első és második potenciálderivált (a teljes Eötvös-tenzor,  $g$  értékek, függővonal-elhajlások) könnyen meghatározhatók (Dobróka, Völgyesi 2008, Völgyesi et al. 2012). Az Eötvös-ingával végzett mérések újrahasonosítása során felvetődött problémák megoldásához szükségessé vált további mérések végzése is Eötvös-ingával. Emiatt felújítottunk és a mai technikai lehetőségeknek megfelelően modernizáltunk korábbi műszereket, és olyan új vizsgálatokat is elvégeztünk, amelyekre korábban nem volt lehetőség (Völgyesi et al. 2009a, Völgyesi, Ultmann 2012, Tóth et al. 2014).

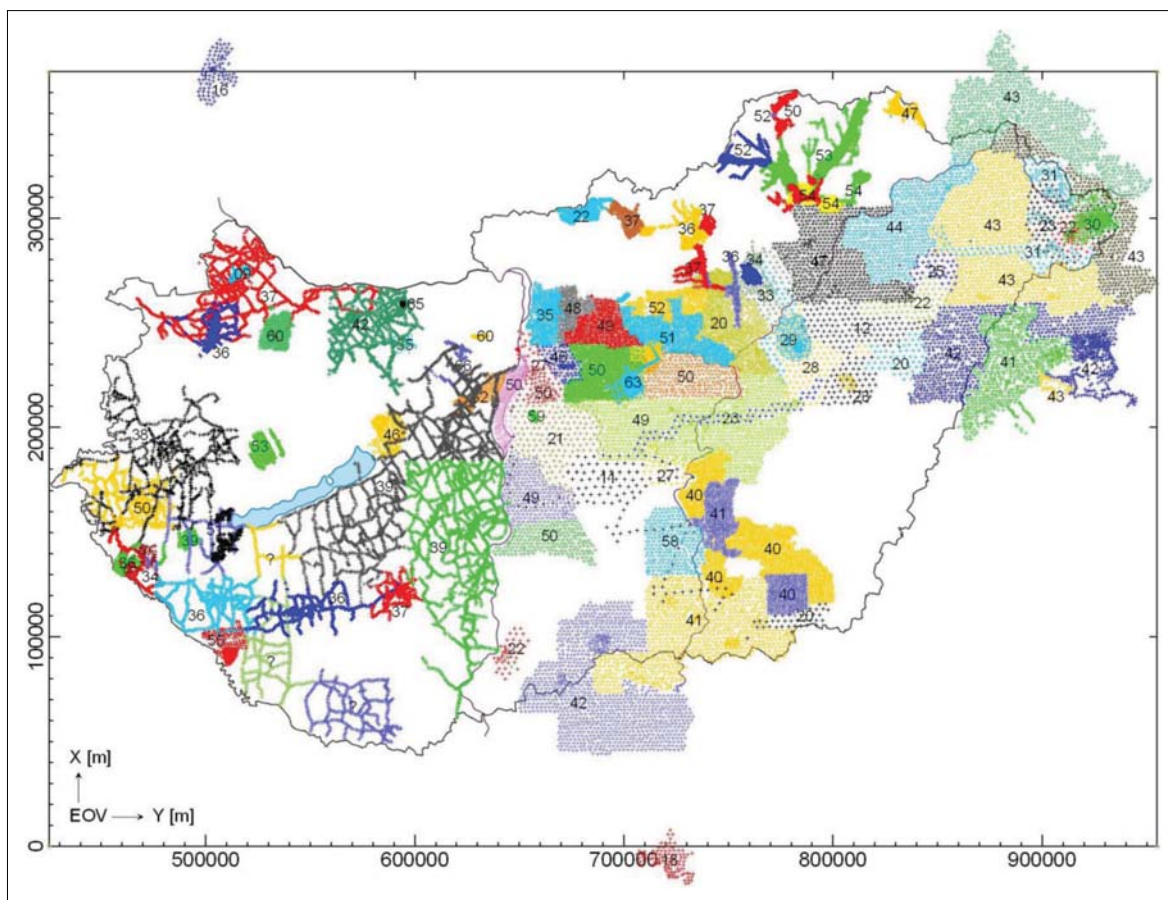
## 2. Korábbi ingamérések adatbázisba történő mentése

Az ELGI (ma MFGI) és a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszéke 1995-ben kutatási együttműködési szerződést kötött, amelynek keretében különböző pályázatok bevonásával 1995 óta rendszeresen folyt a korábbi Eötvös-ingával végzett mérések anyagának digitális adatbázisba történő mentése. Az adatbázist a még különböző formában fellelhető mérési anyagok (észlelési lapok, mérési jegyzőkönyvek, térképek vagy fénymásolt gradienstérképek) alapján lehetett elkészíteni. A 2014. év végére sikerült befejezni a ma még fellelhető valamennyi korábbi mérés digitális adat-

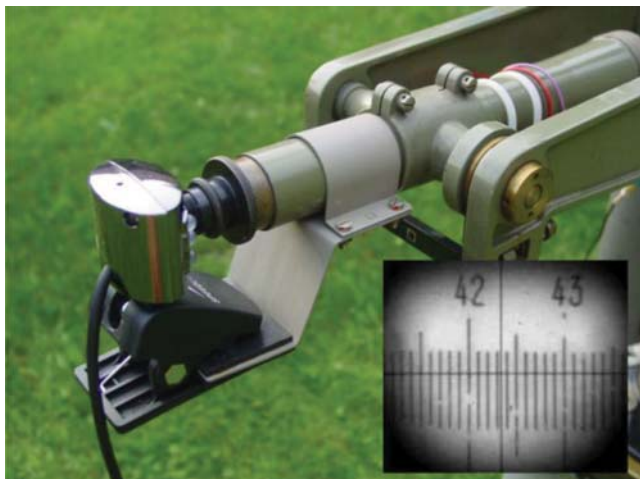
bázisba mentését, amely végeredményben 44 852 Eötvös-ingával végzett mérés adatait tartalmazza, és készen áll további felhasználásra. Sajnos mára mintegy 15 000 korábbi ingamérés adatai már valószínűen elvesztek, további nagyobb mennyiségű mérési anyag előkerülésének pedig igen kicsi az esélye. A digitalizált adatok területi eloszlását az 1. ábrán láthatjuk, amelyen különböző színekkel különítettük el, hogy az egyes területek melyik évtizedben történtek az ingamérések. Az ábrán a kétjegyű számok a mérések 1900 utáni évszámát jelölik.

## 3. Műszerfejlesztés, műszeres vizsgálatok

Kutatási feladataink teljesítése során több olyan probléma adódott, amely szükségessé tette újabb mérések elvégzését Eötvös-ingával. Ehhez az MFGI már korábban felújított E54 ingája mellett megjavítottuk és felújítottuk a BME működésképtelen Auterbal-ingáját. A javítás során a vezérlő óraműben egy törött alkatrész miatt át kellett alakítani a műszer vezérlőszerkezetét és rögzíteni kellett az egyik torziós szál korrodálódott befogását is. További fontos fejlesztéseket is végrehajtottunk: az automatikus leolvasás megvalósítása céljából CCD érzékelőket szereltünk fel a leolvasókarokra, a skálák megvilágítására pedig erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) erősítettünk a leolvasó táv-



**1. ábra** | Az Eötvös-ingával végzett 44 852 mérés területi eloszlása Magyarországon  
**Figure 1** | 44 852 torsion balance measurements in Hungary



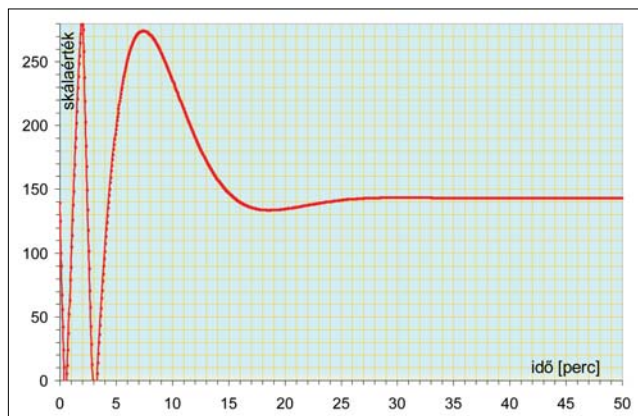
**2. ábra** | CCD kamera alkalmazása az automatikus leolvasáshoz és a CCD kamerával rögzített kép

**Figure 2** | Applying CCD camera for the automatic readings and a picture registered by the CCD camera

csövek alá (2. ábra). A CCD érzékelők vezérlését, a képek rögzítését és feldolgozását számítógéppel oldottuk meg, a szükséges szoftvereket Linux operációs rendszerben fejlesztettük.

A kamerák alkalmazásával lehetőség nyílt hosszú időn keresztül akár tizedmásodpercenkénti leolvasásokat végezni, ezáltal új távlatok nyíltak eddig ismeretlen jelenségek megfigyelésére. Lehetővé vált például a lengések csillapodásának minden eddiginél pontosabb és részletesebb megfigyelése, és a hosszú idejű drift, valamint a hőmérsékletváltozások hatásának pontosabb tanulmányozása (Völgyesi 2009, Völgyesi et al. 2009a).

A csillapodási görbék finomszerkezetének tanulmányozása céljából másodpercenként 12, azaz közel 0,08 másodpercenkénti leolvasással, az esetleges hosszabb periódusú mozgások regisztrálására pedig több 24 órás, 10 másodpercenkénti leolvasással rögzítettük az ingák mozgását. Ezzel a leolvasási sűrűséggel megnyílt a lehetőség a lengések csillapodásának minden eddiginél pontosabb és részletesebb megfigyelésére (3. ábra).



**3. ábra** | Az ingakar CCD kamerával rögzített csillapodása

**Figure 3** | Damping curve of the torsion balance recorded by CCD camera

A kezdetektől fogva fontos törekvés volt az inga lengésidejének csökkentése és ezáltal a mérési időtartam rövidítése (Rybár 1972). Erre mi is kerestünk megoldást. Első lépésben a különböző azimutokban végzett nagyszámú megfigyelés alapján meghatároztuk az adatsorok PSD-jét (Power Spectral Density = teljesítménysűrűség) is Riedel és Sidorenko szinuszos multitaper eljárásával (Völgyesi et al. 2010). Számos spektrális csúcsot találtunk, ám a legmarkánsabb a 0,416 Hz-es (2,4 s periódusú), a 0,835 Hz-es (1,20 s periódusú) és a 3,42 Hz-nél jelentkező (0,29 s periódusú) csúcs; (Tóth et al. 2014). Ezeknek a számunkra zavaró frekvenciáknak a leválasztásával válik lehetővé a csillapodási görbék kezdeti alakjából a nyugalmi helyzet előrejelzése, ezáltal jóval a 40 perces teljes csillapodási idő letelte előtt az inga nyugalmi helyzetének „leolvasása”. A nyugalmi helyzet becslésére két különböző megoldással próbálkozunk: a Navier–Stokes-egyenletek végesesemes megoldásán alapuló áramlási modell felhasználásával és a differenciális evolúciós algoritmus alkalmazásával.

Áramlási modellek segítségével elvégeztük az ingakar mozgásának pontosabb modellezését. Modellünk a végesesemes módszerén alapult, és figyelembe vette a mozgó test (az ingakar), az üreg és a csillapító közeg (levegő) geometriai és fizikai paramétereit. A Navier–Stokes-egyenlet alapján végesesemes módszerének alkalmazásával elvégeztük az ingaházban mozgó ingakar és az áramló levegő kétdimenziós, numerikus áramlási CFD (Computational Fluid Dynamics) modellezését. Eredményeink alapján – összhangban a differenciális evolúciós algoritmus alkalmazása során kapott eredményeinkkel – ígéretes lehetőség kínálkozik az Eötvös-inga azimutonkénti 40 perc hosszúságú mérési idejének jelentős csökkentésére. A CCD érzékelők-



**4. ábra** | A felújított Auterbal-inga a Mátyás-barlagban

**Figure 4** | The renewed Auterbal torsion balance in the Mátyás cave

kel rögzített mérési adatokat kiértékelve és az inga részletes mechanikai és fizikai modelljét felhasználva a számításokhoz megmutattuk, hogy a jelenlegi 40 perc helyett elegendő lehet az azimútonkénti 10 perces mérési idő az ingakar nyugalmi helyzetéhez tartozó skálaleolvasás kellően pontos becsléséhez (Völgyesi et al. 2010, Tóth et al. 2014). Vizsgálataink szerint nagyjából 10 perc után, a vizsgált és szűrésrel simított idősor esetében a csillapodás utáni helyzet becslési eltérései már kisebbek, mint a skálaosztás 1 egysége.

A felújított ingával széles körű vizsgálatokat végeztünk az inga használhatóságára vonatkozóan. Sikeres laboratóriumi méréseket hajtottunk végre az MFGI geodimiai laboratóriumában a Mátyás-barlangban (lásd a 4. ábrán) és a Műegyetemen kialakított gravitációs laboratóriumban, majd terepi méréseket végeztünk Budapesten, Makádon és Üllőn. Vizsgálataink során bebizonyosodott, hogy a közel 80 éve gyártott Eötvös–Rybár-ingával kiváló minőségű méréseket lehet végezni, és az inga alkalmazásával kapcsolatos számos új kutatási kérdésre választ lehet adni.

Fontos vizsgálatokat végeztünk az inga hőmérsékleti érzékenységre vonatkozóan is. Megállapítottuk, hogy a külső hőmérséklet változása a torziós szálak és az ingatest kiváló hőszigetelése miatt csak igen lassú nagy fáziskésésű változásokat eredményez a torziós szálak hőmérsékleti érzékenysége miatt, míg a szinte azonnali változások oka az ingakarok hőtágulása, hőmozgása (Völgyesi et al. 2009a).

Vizsgálatokat végeztünk arra vonatkozóan is, hogy mennyi idő múlva kezdhető a mérés abban a gyakori esetben, amikor az ingát valamely nyári napon az alacsonyabb hőmérsékletű raktárból kiszállítva a legalább 5 °C hőmérséklettel melegebb ingaházban felállítjuk, vagyis mennyi idő múlva alakul ki a hőmérsékleti egyensúlyt követő lineáris drift. Az erre vonatkozó vizsgálataink szerint kb. 5 °C hőmérséklet-különbség esetén az eddig alkalmazott és elfogadott 40 perces várakozási (csillapodási) idő helyett az első azimútban kb. 90 perc után alakult ki a lineáris drift állapota, ugyanakkor 20 °C hőmérsékletkülönbség esetén már három órás várakozás szükséges a megfelelő minőségű mérési eredmények eléréséhez (Ullmann 2013).

#### 4. Az Eötvös-ingával végzett mérések terepi korrekciójának vizsgálata

Az Eötvös-ingával végzett mérések terepi korrekciójának számításához elkészítettük Eötvös eredeti bilineáris interpoláción alapuló módszerével és Schweydar trigonometrikus interpolációs eljárásával a mérési pont közvetlen környezetének hatását számító programot, tetszőleges körgyűrű és sugár irányú felosztás esetén. Összevetettük a kétféle módszerrel számított korrekciókat, és ellenőriztük eredményeinket az MFGI-ben számított értékekkel és numerikus kvadraturával. A görbületes adatok esetében megállapítottuk, hogy a bilineáris interpolációs eljárás kb. 20–25%-kal alulreprezentálja az erőteret a trigonometrikus interpolációval szemben.

Az Eötvös-ingával végzett mérések terepi korrekciójának számítását a Schweydar által javasolt numerikus integrálási

eljárással és a derékszögű prizmamoddellel vizsgáltuk. A numerikus vizsgálatokat a Kecskemét környékén kiválasztott 705 ingamérési pontot tartalmazó kb. 70 × 40 km<sup>2</sup>-es területen végeztük el. Az eredeti, Schweydar-moddellel számított terepi korrekciókat összevetve a mérésekkel, például az északi irányú gradiens 0,49-es korrelációt mutatott, viszont az SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) DTM (Digitális TerepModell) prizmamodelljéből kapott gradienssel már csak elenyésző, 0,05-ös korrelációt tapasztaltunk. Felmerült, hogy esetleg a pontok vízszintes koordinátáinak a dátumeltérésekből adódó hibái miatt lett ilyen alacsony a korreláció. Viszont a koordináta bizonytalanságának korrelációs vizsgálata nem eredményezett szignifikáns javulást 200 × 200 m-es északi és keleti irányú lehetséges dátumeltéréseket vizsgálva. Azt is tapasztaltuk, hogy az SRTM3-ból számított terepi korrekciók korrelációja igen gyorsan, már 10 m-es eltolás esetén megszűnik. Ezért levonhattuk azt a következtetést, hogy ez a 70–90 m-es felbontású DTM modell nem alkalmas a gravitációs gradiensek felszínközeli terephatásának számítására, hiszen még az 5 m-es elemméret is indokolt lehet.

A terepi korrekciók vizsgálatához kapcsolódó alapkutatásként meghatároztuk az MFGI Gravitációs és Geodinamikai Observatórium komplex poliéder modelljének a tömegvonzási potenciálban, térerősségben, valamint az Eötvös-tenzor elemeiben észlelhető hatását. A modellszámításhoz kapcsolódóan hibavizsgálatot is végeztünk, a modellpontok koordinátahibáinak hatását megvizsgáltuk a modelltől számított nehézségi erőter paramétereire (a potenciál első és magasabb rendű deriváltjaira). Így a modell bármely pontjában történő műszeres észlelés helyére lehetőségünk van a méréseinkhez tartozó korrekció kiszámítására, és figyelembe vételére. A modellre számított eredményeket archív graviméteres, illetve archív és újonnan végzett, Eötvös-ingával történt mérések segítségével ellenőriztük az observatórium mikrobázisának pontjain (Tóth, Égető 2010).

A Csepel-sziget déli részén, a makádi teszterületen korábban Eötvös-ingával végzett mérések és terepszintezések eredményeit felhasználva is végeztünk kísérleti számításokat ezeknek a méréseknek a terepi korrekciójával kapcsolatban. A szóban forgó területen 30 pontban történtek mérések Eötvös-ingával, amelyek mellett a korábbi OTKA megbízás keretében elvégeztük az egyes mérési pontok környezetében a szintezési munkákat is (Csapó et al. 2009). Ennek megfelelően a pontok körül É, ÉK, K, DK, D, DNy, Ny, és ÉNy irányban a mérési pontoktól 1,5, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100 m távolságban terepmagasságokat mértek. E mérések alapján meghatároztuk az egyes pontokban a topografikus korrekciók értékét, és elláttuk az ingaméréseket ezekkel a javításokkal. A rendelkezésünkre álló topográfiai térkép alapján előállított 5 m-es DTM-ből poliéderes tömegmodell segítségével szintén meghatároztuk az ingamérési állomások helyére számított terepi korrekciókat. Ezeket összevetettük az MFGI-ben alkalmazott Schweydar-módszerrel kapott eredményekkel. Megállapítottuk, hogy míg a horizontális gradiensek esetében a vizsgált, közel sík területen az egyezés általában kielégítő (átlagosan ±2–6 Eötvös),

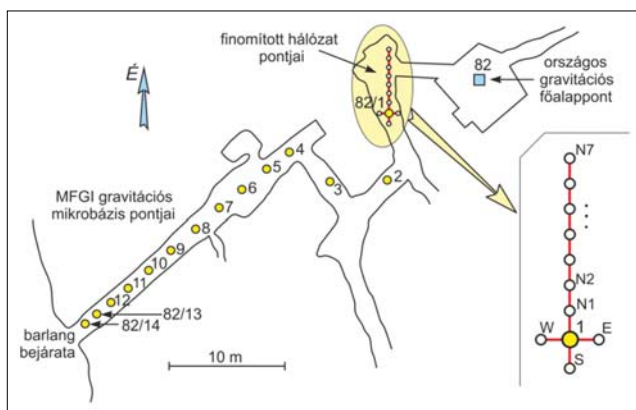


addig a görbületi gradiensek teljesen eltérnek egymástól. A vizsgálataink azt jelzik, hogy még az 5 m-es felbontású tömegmodell sem kellően részletes a terepi korrekciók számításához, ezt legalább a mérési állomások helye környezetében szükséges tovább sűríteni.

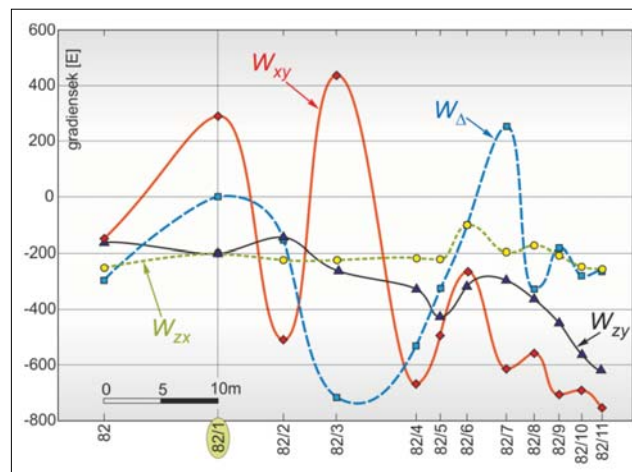
### 5. Mért gradiensek elemzése, linearitás-vizsgálat

Az Eötvös-ingával történt mérések alapján végzett függővonal-elhajlás interpolációja, a geoid finomszerkezetének meghatározása, a  $g$  vagy  $\Delta g$  értékek számítása és a vertikális gradiensek interpolációja során a numerikus integrálás számításakor valamennyi esetben fontos alapkövetelmény a  $W_{zx}$ ,  $W_{zy}$  nehézségi gradiensek és a  $W_{\Delta}$ ,  $W_{xy}$  görbületi értékek két pont közötti lineáris változása. Az interpolációs számítások során az elérhető pontosság alapvetően a linearitás függvénye. Ezért az interpolációkhoz az Eötvös-ingával végzett mérések olyan geometriai elrendezésére és pontsűrűségére van szükségünk, amely biztosítja ezt a fontos feltételt. Ennek vizsgálata céljából az MFGI E54 és az általunk felújított Auterbal-ingával is végeztünk méréseket, az MFGI gravitációs mikrobázisának 5. ábrán látható pontjain a Mátyás-barlangban, majd a méréseinket a 82/1 jelű pont közvetlen környezetében tovább finomítottuk, a pont körül észak–déli illetve kelet–nyugati irányban a mérési pontokat 30 cm lépésközben sűrítettük.

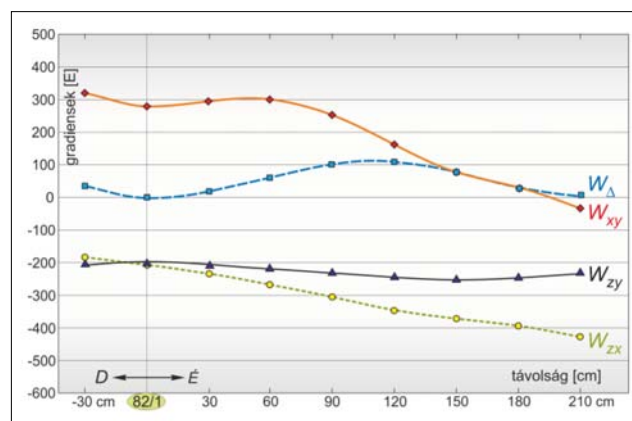
Az Eötvös-ingával történt mérésekkel párhuzamosan modellszámításokat is végeztünk. A tömegmodell kialakítása külső és a barlangon belüli felmérés eredményei alapján történt. A külső felületmodell előállításához a hagyományos geodéziai mérések mellett fotogrammetriai módszer alkalmazásra is szükség volt, a barlang bejárati oldalán található bonyolult formájú és nehezen megközelíthető sziklafal miatt. A külső sziklafal felületmodelljét megfelelő digitális fotók alapján a Photomodeler szoftver alkalmazásával készítettük el, az üregmodell pedig a barlang belsejének geodéziai felmérése alapján készült. A modellszámítást az általunk fejlesztett PolyGravp szoftverrel hajtottuk végre, mely tettszöleges, homogén sűrűségeloszlású poliéder test gravitációs



5. ábra | Gravitációs mikrobázis pontjai  
Figure 5 | Points of gravity microbase network



6. ábra | Gradiensek a mikrobázis pontjain  
Figure 6 | Gravity gradients on the microbase network points

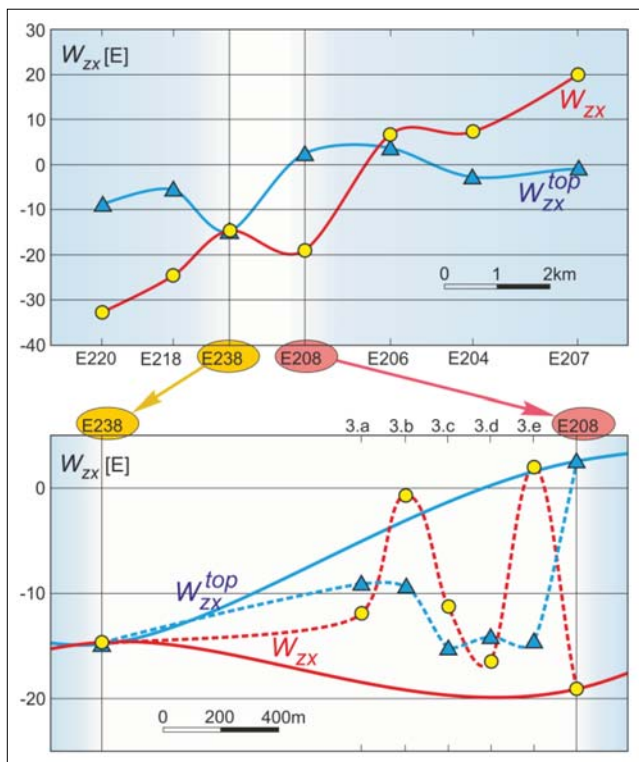


7. ábra | Gradiensek a finomított hálózat pontjain  
Figure 7 | Gravity gradients on the refined network points

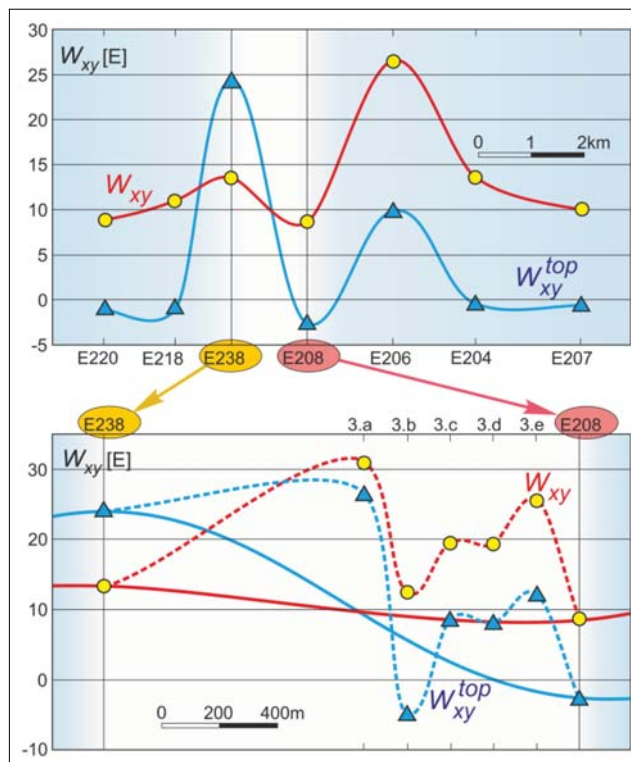
hatásának számítását végzi (Tóth, Égető 2010). A mért és a számított gradiensértékek egyezése igen jónak bizonyult. A  $W_{zx}$ ,  $W_{zy}$  nehézségi gradiensek és a  $W_{\Delta}$ ,  $W_{xy}$  görbületi adatok változása a gravitációs mikrobázis pontjain a 6. ábrán, a finomított hálózat pontjain pedig a 7. ábrán látható.

Mind a méréseink, mind a számításaink alapján megállapítható, hogy a mérési pontokban tapasztalható extrém magas és rendkívül erősen változó gradiensértékek esetén csupán mintegy 0,5 m távolságon belül tekinthető lineárisnak a gradiensek változása (Völgyesi, Ultman 2010, 2014).

A Mátyás-barlangban a szélsőségesen nagy gradiensértékek esetén végzett linearitásvizsgálatok eredményei alapján viszont nem lehet következtetéseket levonni az átlagos terepviszonyok mellett végzett Eötvös-ingával történt mérési eredmények viselkedésére vonatkozóan. Erre irányuló vizsgálatainkat a Csepel-sziget déli részén végeztük, ahol korábban 1950-ben történtek átlagosan 1,5 km pontsűrűséggel ingamérések, majd ugyanezen a területen 2006 és 2010 között végeztünk helyenként 150 m távolságban sűrítő méréseket (Csapó et al. 2009). Mind a korábbi, mind az új mérési pontokban rendelkezésre álltak a gradienseknek a szintezések alapján meghatározott topografikus redukcióval javított értékei is.



**8. ábra** | A  $W_{zx}$  vízszintes gradiens változása a teszterületen  
**Figure 8** | Changing the  $W_{zx}$  gradient on the test area



**9. ábra** | A  $W_{xy}$  görbületi gradiens változása a teszterületen  
**Figure 9** | Changing the  $W_{xy}$  gradient on the test area

Példaképpen a 8. és a 9. ábra felső részén az 1950-ben mért, körökkel jelölt pontok által alkotott szelvényben láthatjuk a  $W_{zx}$  vízszintes és a  $W_{xy}$  görbületi gradiensek Eötvös-ingával mért változását, a háromszögekkel jelölt értékek pedig ugyanezen mérések topografikus redukcióval javított értékei. Annak a kérdésnek az eldöntése céljából, hogy a gradiensek változásában vannak-e magasabb frekvenciájú összetevők is, az E238 és az E208 pont között a 3.a, 3.b, 3.c, 3.d, 3.e pontokkal 150 m ponttávolságra tovább sűrítettük a korábbi Eötvös-ingával végzett méréseket. Az új finomított mérések alapján a gradiensek finomabb felbontású változása a 8. és a 9. ábra alsó részén látható. A piros szín a korrekció nélküli mérési eredményeket, míg a kék a topografikus korrekcióval ellátott értékeket mutatja, a korábbi méréseket folyamatos, az új sűrített méréseket pedig szaggatott vonallal ábrázolva. A vízszintes tengelyeken a távolságokat a pontok közötti valódi távolságokkal arányosan tüntettük fel.

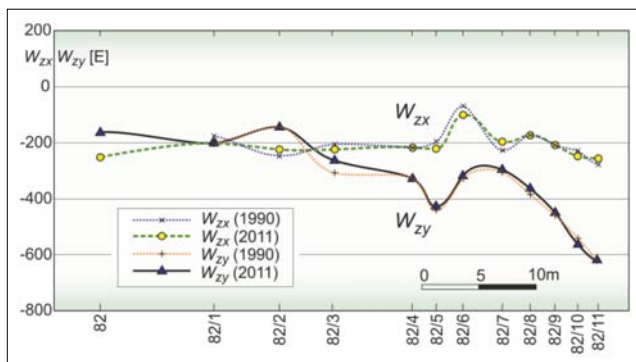
A 8. és a 9. ábrán látható görbéket szemlélve és a lineáris regresszió  $R^2$  korrelációs együtthatójának számított értékei alapján (Völgyesi, Ultmann 2014) megállapítható, hogy a mérési pontok távolságának 1000–1500 m-ről 300–150 m-re történő csökkenésével nem javul szignifikánsan a linearitás. Ebből pedig az a következtetés vonható le, hogy a Csepel-szigeten a vizsgált területen az 1950-ben végrehajtott ingamérések átlagos pontsűrűsége nem biztosítja a gradiensek lineáris változását a szomszédos hálózati pontok között. Sajnos a helyzeten nem javít a topografikus redukciók alkalmazása sem, mivel a topografikus redukcióval ellátott gradiensértékek két pont közötti változása sem tekinthető lineárisnak (Völgyesi, Ultman, 2010, 2014). Hiába

vesszük figyelembe ugyanis a topografikus redukcióval a felszíni látható tömeg-rendellenességek hatását, ha közvetlenül a felszín alatt is gyorsan változik a kőzetek sűrűsége. Márpedig a Duna korábbi árterületein a kavicsos, agyagos, homokos üledékek gyors, szabálytalan mélységbeli és oldalirányú váltakozása a felszín alatti sűrűségértékek markáns váltakozását eredményezi.

Ezek a megállapítások a Csepel-sziget déli részén a vizsgált területre vonatkoznak. Fontos lenne a vizsgálatokat a korábbi, Eötvös-ingával végzett mérések néhány más, magyarországi területére is kiterjeszteni.

## 6. Korábbi és újabb ingamérések összehasonlítása

Korábban modellszámításokat végeztünk a nehézségi erő gradienseinek időbeli változására vonatkozóan (Tóth et al. 2004b), majd lehetőségeket kerestünk ezeknek mérésekkel történő kimutatására. Elsőként az MFGI Mátyás-hegyi Gravitációs és Geodinamikai Observatóriuma gravitációs mikrobázisának 82, 82/1, 82/2, 82/3, 82/4, 82/5, 82/6, 82/7, 82/8 pontjain (a 82 jelű pont Magyarország gravitációs főalappontja) próbálkoztunk, ahol az ELGI 1990–92-ben már végzett méréseket Eötvös-ingával. A méréseket ugyanezen a pontokon 2009-ben és 2011-ben is megismételtük az MFGI E54 műszerével és az általunk felújított Auterbal-ingával. A 10. ábrán a 1990, 1992-ben és a 2009, 2011-ben meghatározott gradiensértékeket hasonlíthatjuk össze (a görbületi adatokat a korábbi mérések során nem határozták



**10. ábra** Gradiensek a 1990-ben és 2009-ben mért gradiensek összehasonlítása a Mátyás-barlangban mikrobázis pontjain

**Figure 10** Comparison of the gravity gradients measured in 1990 and 2011 in the Mátyás cave

meg). A különböző mérési sorozatok eredményeit összevetve nem látható határozott trend a gradiensek időbeli változására vonatkozóan. Ez részben várható is volt, elsősorban a különböző mérési időpontokban fennálló eltérő mérési körülmények (pl. a hőmérséklet-különbségek, az eltérő kezdőazimút-beállítások stb.) miatt.

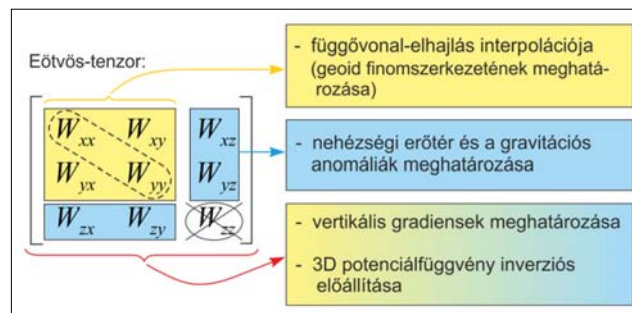
E vizsgálataink során felvetődött egy fontos kérdés, az inga kezdőazimútjának beállítási pontosságára vonatkozóan. A mágneses deklináció adott helyre és időpontra vonatkozó valódi értékének ismerete hiányában ugyanis nem lehetséges az inga kezdőazimútját pontosan beállítani, márpedig ez jelentős mérési hibákat okozhat különösen olyan markáns gradiensváltozások esetén, amelyek a Mátyás-barlangban tapasztalhatók (Völgyesi, Csontos 2014a,b).

Méréseket végeztünk a 2009. évi dunai árvíz időpontjától kezdődően a BME gravitációs laboratóriumában különböző vízmagasságok mellett a Duna víztömege gravitációs hatásának kimutatására, a vízszintingadozások által okozott változások kimutatására. Erre vonatkozóan már a korábbi 2002. évi dunai árvíz idején is végeztünk vizsgálatokat, és modellszámításokat is készítettünk a Duna víztömegének ingadozása és a nehézségi erő gradienseinek változása közötti összefüggés meghatározására (Tóth et al. 2004b). A mérési eredményeink a korábbi számításainknak megfelelően tükrözték a Duna víztömegének hatását az Eötvös-ingával mérhető gradiensekre.

A Csepel-sziget déli részén 1950-ben Eötvös-ingával történt mérések két pontjában 2007 és 2008-ban is végeztünk ismételt méréseket. Mindkét pontban jelentős eltéréseket tapasztaltunk, azonban ebből szintén nem lehet időbeli változásra következtetni, mivel a korábbi mérések pontos koordinátáit nem ismertük, és a megismételt méréseket nagy valószínűséggel nem pontosan az eredeti pontokon végeztük.

## 7. Eötvös-ingával végzett mérések felhasználása

A 11. ábrán röviden összefoglaltuk az Eötvös-ingával végzett mérések hasznosításának jelenlegi lehetőségeit. Az ábra



**11. ábra** Az Eötvös-ingával végzett mérések felhasználási lehetőségei  
**Figure 11** Application possibilities of the torsion balance measurements

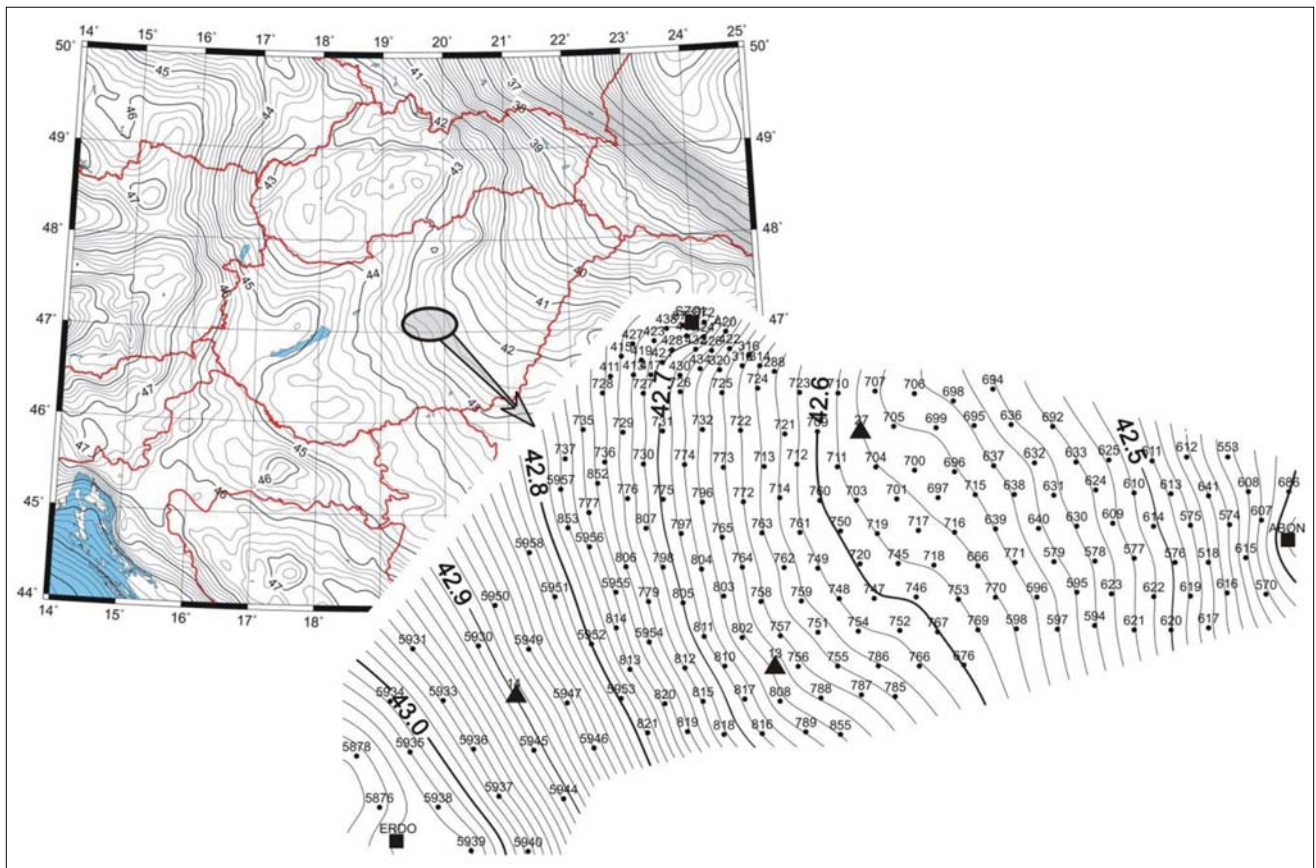
bal oldalán az Eötvös-tensor elemeit három csoportba osztottuk: a sárga színnel jelölt területen az ingával mérhető görbületi adatokat emeltük ki, a kék színnel a horizontális gradienseket jelöltük, míg az áthúzott  $W_{zz}$  függőleges gradiens a torziós ingával közvetlenül nem mérhető tenzor-elem. Ugyannak az ábrának a jobb oldalán azt szemléltettük, hogy az Eötvös-tensor különböző elemeinek felhasználásával milyen számítások végezhetők, illetve milyen fontos adatok határozhatók meg.

Az ingamérések egyik legfontosabb geodéziai alkalmazási lehetőségére, a függővonal-elhajlás-értékek sűrítésére elsőként Eötvös Loránd (1906) hívta fel a figyelmet. Ennek a nagy összefüggő területekre vonatkozó gyakorlati megoldását a modern számítástechnikai adottságok tették elérhetővé (Völgyesi 2012a,b). Ezeknek a függővonal-elhajlás-értékeknek a gyakorlati életben rendkívül fontos szerepük van, felhasználásukkal várhatóan minden eddiginél pontosabb magyarországi geoidkép határozható meg. A függővonal-elhajlás interpolációjához és a geoid finomszerkezetének meghatározásához különféle, a mai számítástechnikai adottságoknak megfelelő számítási eljárásokat dolgoztunk ki. A 12. ábrán Magyarország Cegléd–Abony környéki területén láthatjuk az Eötvös-ingával végzett mérések alapján finomított geoidszerkezetet. Emellett az ingával mérhető vízszintes gradiensek kiváló lehetőséget adnak a nehézségi erőter finomszerkezetének meghatározására, valamint a vertikális gradiensek interpolációjára is, aminek a gravimetriában van nagy jelentősége.

A geoidmeghatározás céljából továbbfejlesztettük a Forsberg (1987) által írt algoritmust a logaritmikus kovarianciafüggvényekkel végzett kollokáció megvalósítására, így az elkészített programunkkal már képesek vagyunk az összes mérhető nehézségi erőteret jellemző – beleértve az ingával mért gradiensek – együttes felhasználására. Vizsgálatokat végeztünk a görbületi adatok bevonásának lehetőségére a geoidmeghatározás kollokációval történő megoldási eljárásába, és szoftvert készítettünk, amellyel elvégezhetjük a nehézségierő-, gravitációsanomália- és vertikálisgradiens-interpolációkat.

Vizsgálataink szerint a kollokációs eljárás numerikus stabilitása függ a felhasznált adatok eloszlásától és az alkalmazott kovarianciafüggvények szerkezetétől (Tóth 2009). Ennek ellenőrzésére a nagy felbontású EGM2008-as modellel redukáltuk a  $W_{zx}$ ,  $W_{zy}$  vízszintes gradienseket, és legkisebb





**12. ábra** | A geoid finomszerkezete Eötvös-ingával végzett mérések alapján Magyarország középső területén  
**Figure 12** | Fine structure of the geoid forms in the middle part of Hungary based on torsion balance measurements

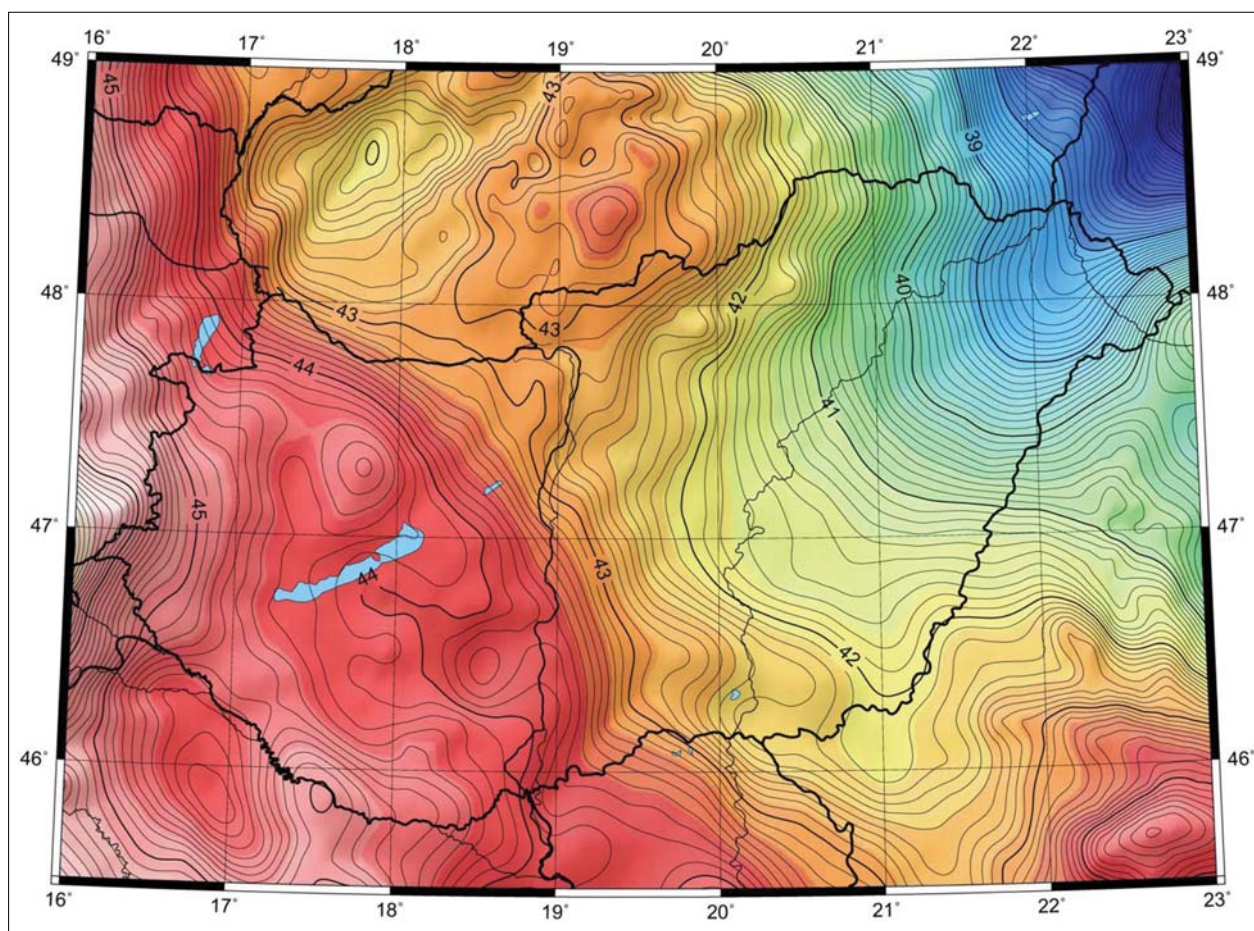
négyszetek szerinti kollokációval vizsgáltuk a maradék függővonal-elhajlások, illetve a geoidundulációk predikcióját (Tóth, Szűcs 2011).

Matematikailag megoldottuk a  $W_{\Delta}$ ,  $W_{xy}$  görbületi adatok és a  $W_{xz}$ ,  $W_{yz}$  vízszintes gradiens együttes inverziós alkalmazását, és a korábbi kétdimenziós (2D) eljárás (Dobróka, Völgyesi 2005) továbbfejlesztésével megoldottuk a nehézségi erőter 3D potenciálfüggvényének inverziós előállítását (Dobróka, Völgyesi 2010). Olyan algoritmust dolgoztunk ki, amellyel a bemenő adatokhoz megfelelő súlyfüggvényeket tudunk rendelni, továbbá a számításokba bevontuk a Laplace-egyenletet is, amivel sikerült tovább stabilizálni a megoldást.

A kidolgozott inverziós megoldás nagyszámú, Eötvös-ingával történő és graviméteres mérés, valamint digitális terepmodell adatok továbbá néhány függővonal-elhajlás- és vertikálisgradiens-adat együttes inverziójának felhasználásával a 3D potenciálfüggvény meghatározására nyújt lehetőséget. Az így előállított potenciálfüggvényből számos gyakorlati fontosságú mennyiséget, (pl. vertikális gradiensket, függővonal-elhajlásokat, nehézségierő-értékeket és gravitációs anomáliákat) származtathatunk nem csupán a mérési pontokban, hanem ezek 3D környezetében, a teljes mérési területen is. Az eljárás nagy előnye, hogy mindezt egy jelentősen túlhatározott inverzprobléma megoldásával tehetjük.

A gradiensek meglehetősen változatos képe miatt esetünkben a potenciáler sorfejtéses leírása csak viszonylag magas fokszámú polinomokkal lehetséges. Tapasztalataink szerint a polinomok fokszámának meghatározásakor körültekintően kell eljárunk, mert a fokszám növelésével kezdetben lassan, majd egyre gyorsabban csökken a megoldandó normálegyenletek együtthatómátrixának kondicionáltsága, a fokszám csökkentésével viszont romlik a felbontóképesség. Vizsgálataink szerint a  $P = 18-24$  általában jó kompromisszumnak látszik a felbontóképesség és a normálegyenletek kondicionáltsága vonatkozásában. Mi  $P = 19$  fokszámú Legendre-polinomot alkalmaztunk.

A módszer alkalmazhatóságának vizsgálatára a Szabadszállás–Kiskörös környéki területen és a Csepel-sziget déli részén végeztünk kísérleti számításokat. Előbbi területen 248 Eötvös-ingával végzett és 1197 graviméteres mérés eredményei álltak rendelkezésre, továbbá 3 asztrogeodéziai és további 10 asztrogravimetriai pont is található, ahol ismertek a függővonal-elhajlás-értékek. Az inverziós feladat megoldása során meghatároztuk mindazokat a sorfejtési együtthatókat, amelyek segítségével a teljes területre előállítható mind a nehézségi erőter potenciálfüggvénye, mind a potenciálfüggvény valamennyi első és második deriváltja. Összehasonlítva az Eötvös-ingával mért, valamint az együttes inverzióval előállított gradiens képét, kiváló egyezés adódott (Dobróka, Völgyesi 2010).



**13. ábra** Új geoidmegoldás Magyarország területére  
**Figure 13** New Hungarian geoid solution

A Csepel-sziget déli részén lévő teszterületünkön első sorban a vertikális gradiensek meghatározását teszteltük, ahol 30 pontban álltak rendelkezésre Eötvös-ingával történt mérési adatok, és a 30 pontból 27 ponton vertikális gradiens mérésekre is sor került, amelyek egy részét kiinduló adatként használtuk, a fennmaradó pontok értékei pedig ellenőrzésre szolgáltak. Mivel az ellenőrző pontokban inverzióval meghatározott vertikálisgradiens- (VG) értékek középhibája megegyezett ugyanezekben a pontokban a mért értékek középhibájával, ezért megállapítható, hogy a vizsgált teszterületen a rendelkezésre álló adatrendszerrel a vertikális gradiensek számítása is kiválóan működik (Völgyesi et al. 2012). Ennek az a jelentősége, hogy a vertikális gradiensek az Eötvös-ingával közvetlenül nem mérhetők, így viszont lehetőség adódik a többi, Eötvös-ingával történt mérési adat alapján a vertikális gradiensek meghatározására is.

A magyarországi geoidfelület meghatározása tekintetében megvizsgáltuk az Eötvös-inga és a GOCE műhold mérési adatainak bevonásához a különböző nehézségi erőter mennyiségek (Eötvös-inga, GPS/szintezési, gravimetriai, függővonal-elhajlás) spektrumát. A számított spektrumokat magas fokszámú geopotenciális modellel és analitikus meghatározással hasonlítottuk össze. A gravimetriai adatok esetében az erőteret leíró fokvarianciákat megfelelő auto-

és keresztkovariancia függvénné transzformálva maradék geoidmagasságokat határoztunk meg legkisebb négyzetes predikcióval, és összehasonlítottuk a mért értékekkel. A különböző típusú adatok spektrális érzékenysége a geoid súlyozott spektrális kombinációval, illetve kollokációval történő meghatározásánál vehető figyelembe (Szűcs et al. 2014).

Az ESA (European Space Agency) GOCE gradiométeres méréseket végző mesterséges holdja nagymértékben hozzájárult a földi nehézségi erőter korábbiaknál jobb felbontású meghatározásához. A mérések befejezése után 2014-ben számunkra is elérhetővé váltak a GOCE ötödik generációs nehézségierőter-modelljei, ezért olyan új geoidmegoldást készítettünk Magyarország területére, amely már tartalmazza a GOCE méréseit is (13. ábra). A megoldás módszere a Magyarországon először alkalmazott gömbi bázisfüggvényeken alapuló legkisebb négyzetes paraméterbecslés. E modellezési technika egyik fontos előnye, hogy különböző típusú és heterogén eloszlású adatok nehézség nélkül kombinálhatók egy szigorú értelemben vett paraméterbecslési eljárásban, amely egyúttal a becsült paraméterek kovarianciamátrixát is szolgáltatja. A GOCE modellen kívül felhasználtuk a felszíni függővonal-elhajlások, nehézségi rendellenességek és OGPSH (Országos GPS Hálózat) magasságok adatait is (Tóth, Földváry 2015a,b).



## 8. Összefoglaló megjegyzés

Kutatási eredményeink jelentős felértékelődése várható a fizikai geodéziában az új gradiométerek megjelenésével, ugyanis az eredményeink és a kidolgozott módszereink nemcsak az Eötvös-ingával mérhető gradiensek kezelésére alkalmasak, hanem változtatás nélkül alkalmazhatók lesznek a következő évtizedekben a legújabb technikai berendezések által meghatározott gradiensek kezelésére, felhasználására is.

## Köszönetnyilvánítás

Kutatásaink a K76231. sz. OTKA támogatásával folytak.

## A tanulmány szerzői

Völgyesi Lajos, Tóth Gyula, Ultmann Zita

## Hivatkozások

- Csapó G., Égető Cs., Kloska K., Laky S., Tóth Gy., Völgyesi L. (2009): Kísérleti mérések Eötvös-ingával és graviméterekkel az Eötvös-inga mérések eredményei geodéziai célú hasznosításának vizsgálata céljából, *Geomatikai Közlemények XII*, 91–100
- Dobróka M., Völgyesi L. (2005): A nehézségi erőter potenciálfüggvényének inverziós rekonstrukciója Eötvös-inga adatok alapján. *Geomatikai Közlemények VIII*, 223–230
- Dobróka M., Völgyesi L. (2008): Inversion reconstruction of gravity potential based on gravity gradients. *Mathematical Geosciences* 40/3, 299–311
- Dobróka M., Völgyesi L. (2010): Sorfejtéses Inverzió IV. A nehézségi erőter potenciálfüggvényének inverziós előállítása. *Magyar Geofizika* 51/3, 143–149
- Eötvös R. (1906): Bestimmung der Gradienten der Schwerkraft und ihrer Niveauflächen mit Hilfe der Drehwaage. *Verhandl. d. XV. allg. Konferenz der Internat. Erdmessung in Budapest*.
- Forsberg R. (1987): A new covariance model for inertial gravimetry and gradiometry. *J. Geophys. Res.* 92/B2, 1305–1310, doi:10.1029/JB092iB02p01305.
- Haalck H. (1950): Die vollständige Berechnung örtlicher gravimetrischer Störefelder aus Drehwaagemessungen. *Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes Potsdam*, Nr. 4, Potsdam
- Rybár I. (1972): Vizsgálatok az Eötvös-inga csillapítási ideje csökkentésének, megbízhatóságának és a torziós szálak preparálásának problémáiról. *Magyar Geofizika* 13/3–4, 129–141
- Szabó Z. (2004): A gravitációs és földmágneses kutatások története Magyarországon. *Magyar Geofizika* 45(különszám), 3–21
- Szűcs E., Papp G., Benedek J. (2014): A study of different wavelength spectral components of the gravity field derived from various terrestrial data sets. *Acta Geodaetica et Geophysica* 49/3, 327–342
- Tóth Gy., Völgyesi L., Csapó G. (2004a): Determination of vertical gradients from torsion balance measurements. IAG International Symposium, Gravity, Geoid and Space Missions. Porto, Portugal August 30 – September 3, 2004
- Tóth Gy., Völgyesi L., Cerovsky I. (2004b): Modelling time variation of gravity gradients due to water level fluctuations. *Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology*, 69/2, 309–314

- Tóth Gy., Völgyesi L., Csapó G. (2005): Determination of vertical gradients from torsion balance measurements. In: *IAG Symposia Vol. 129, Gravity, Geoid and Space Missions*, C. Jekeli, L. Bastos, J. Fernandes (eds.), Springer, pp. 292–297
- Tóth Gy. (2007): Vertikális gravitációs gradiens meghatározás Eötvös-inga mérések hálózatában. *Geomatikai Közlemények X*, 29–36
- Tóth Gy. (2009): A HGTUB2007 új magyarországi kombinált kvázigeoid megoldás. *Geomatikai Közlemények XII*, 131–140
- Tóth Gy., Szűcs E. (2011): On the determination of a new combined EGM2008 based quasi-geoid model for Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 46/4, 417–430
- Tóth Gy., Égető Cs. (2010): A Mátyás-hegyi gravitációs és geodinamikai obszervatórium átfogó gravitációs modellezése., *Geomatikai Közlemények XIII/2*, 113–122
- Tóth Gy., Völgyesi L., Laky S. (2014): Reducing the Measurement Time of the Torsion Balance, *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*. 617 p. Berlin–Heidelberg, Springer-Verlag
- Tóth Gy., Földváry L. (2015a): Updated Hungarian gravity field solution based on 5th generation GOCE gravity field models. *Proceedings of the 5th GOCE User Workshop*, 25–28 November 2014, Paris, ESA SP-728, in press
- Tóth Gy., Földváry L. (2015b): Új magyarországi geoidmeghatározás az ötödik generációs GOCE nehézségi erőter modellek segítségével. *Geomatikai Közlemények (bírálat alatt)*
- Ultmann Z. (2013): Eötvös-inga mérések és geodéziai hasznosításuk. PhD értekezés, BME Ált.- és Felsőgeodézia Tanszék
- Völgyesi L. (1993) Interpolation of deflection of the vertical based on gravity gradients. *Periodica Polytechnica Civ. Eng.* 37/2, 137–166
- Völgyesi L. (1995) Test interpolation of deflection of the vertical in Hungary based on gravity gradients. *Periodica Polytechnica Civ. Eng.* 39/1, 37–75
- Völgyesi L. (2001): Local geoid determinations based on gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hung.* 36/2, 153–162
- Völgyesi L., Tóth Gy., Csapó G. (2004): Determination of gravity anomalies from torsion balance measurements. *Gravity, Geoid and Space Missions GGSM 2004*. IAG International Symposium Porto, Portugal. Jekeli C, Bastos L, Fernandes J. (eds.) Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York; Series: IAG Symposia, Vol. 129, 292–297
- Völgyesi L., Tóth Gy., Csapó G., Szabó Z. (2005): Az Eötvös-ingamérések geodéziai célú hasznosításának helyzete Magyarországon. *Geodézia és Kartográfia* 57/5, 3–12
- Völgyesi L. (2005) Deflections of the vertical and geoid heights from gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 40/2, 147–159
- Völgyesi L., Tóth Gy., Csapó G. (2007): Determination of gravity field from horizontal gradients of gravity. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 42/1, 107–117
- Völgyesi L. (2009): Reconstruction of a torsion balance, and the results of the test measurements, In: *Geodesy for Planet Earth*. Buenos Aires, Argentina, 2009.08.31–2009.09.04. Buenos Aires: 2009. p. 73. Paper Ps2-Mo45
- Völgyesi L., Égető Cs., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z. (2009a): Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-hegyi barlangban. *Geomatikai Közlemények XII*, 71–82
- Völgyesi L., Csapó G., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z. (2009b): Közel fél évszázados szünet után ismét Eötvös-inga mérések Magyarországon. *Geodézia és Kartográfia* 61/11, 3–12
- Völgyesi L., Laky S., Tóth Gy. (2010): Az Eötvös-inga mérési idejének csökkentési lehetőség., *Geomatikai Közlemények XIII/2*, 129–140

- Völgyesi L., Ultman Z. (2010): Nehézségi gradiensek linearitásvizsgálata a Mátyás-barlangban. *Geomatikai Közlemények* XIII/2, 123–128
- Völgyesi L. (2012a): A gravimetria mai jelentősége és helyzete Magyarországon. *Magyar Tudomány* 173/6, 706–723
- Völgyesi L. (2012b): Az Eötvös-inga mérések alkalmazása és jelentősége a geodéziában. *Geomatikai Közlemények* XV, 9–26
- Völgyesi L., Dobróka M., Ultmann Z. (2012): Determination of vertical gradients of gravity by series expansion based inversion. *Acta Geodaetica et Geoph. Hung.* 47/2, 233–244, DOI: 10.1556/AGeod.47.2012.2.11.
- Völgyesi L., Ultmann Z. (2012): Reconstruction of a torsion balance, and the results of the test measurements. *IAG Symposia*, Vol. 136, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-20337-4, pp. 281–290
- Völgyesi L. (2014): Renaissance of the torsion balance measurements. The 3rd International Gravity field Service General Assembly (IGFS 2014), Shanghai
- Völgyesi L., Ultmann Z. (2014): High-resolution measurements of non-linear spatial distribution of gravity gradients in Hungary, *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*. 617 p. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag
- Völgyesi L., Csontos A. (2014a): A földmágnesség jeletősége a geodéziában és a navigációban. *Geodézia és Kartográfia* 66/5–6, 4–9
- Völgyesi L., Csontos A. (2014b): A mágneses északi irány meghatározása geodéziai és navigációs célokra. *Geodézia és Kartográfia* 66/7–8, 4–7

## Agocs-díj 2015

A díjat alapító Dr. William B. Agocs professzor szándéka szerint az Eötvös Loránd Tudományegyetem geofizika szakán megvédett, kiemelkedő színvonalú MSc-, illetve PhD-

dolgozatot lehet jutalmazni. Az Agocs-díj kuratóriuma három MSc dolgozatot talált jutalmazásra érdemesnek 2015-ben. A díjazott dolgozatok:

*Koma Zsófia Viktória:* „A Balaton klorofill-a eloszlásának folyamatos monitorozása MODIS adatok alapján” című MSc-dolgozata

Témavezetők: *Dr. Zlinszky András* tud. munkatárs, *Dr. Kern Anikó* tud. munkatárs, *Stephanie Palmer* PhD

*Németh Viktor:* „Comparison of PreStack Time and Depth Migration” című MSc-dolgozata

Témavezetők: *Kádi Zoltán* tud. munkatárs, *Dr. Horváth Ferenc* professor emeritus

*Szöts Gergely Kartal:* „Akusztikus modellek közetfizikai vizsgálata” című MSc-dolgozata

Témavezetők: *Dr. Balázs László* egyet. adjunktus

A díjakat *Dr. Mezey Barna* professzor, az ELTE rektor adta át ünnepélyes körülmények között a rektori tanács-teremben, 2015. szeptember 14-én. A díjátadáson jelen voltak: *Dr. Scheuer Gyula*, az ELTE kancellárja, *Dr. Sza-*

*lay Péter* egyetemi tanár rektorhelyettes, *Dr. Surján Péter* professzor a természettudományi kar dékánja, és a kuratórium tagjai. A díj ünnepélyes átadását rövid fogadás követte.

*Kis Károly*



Koma Zsófia Viktória átveszi az Agocs-díjat Dr. Mezey Barna professzortól az ELTE rektorától



Németh Viktor átveszi az Agocs-díjat Dr. Mezey Barna professzortól az ELTE rektorától



Szöts Gergely Kartal átveszi az Agocs-díjat Dr. Mezey Barna professzortól az ELTE rektorától

# Hova tegyük a hulladékot?

## Sajtóbeszélgetés Bodán radioaktív hulladékról, agyagkőről, pénzről

A radioaktív hulladékok magyarországi tárolásáért felelős cég, a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Non-profit Kft. (RHK Kft.) ügyvezető igazgatója, dr. Kereki Ferenc vezetésével sajtóbeszélgetésre került sor Bodán, a faluházban, aki Kovács Győző polgármesterrel és Honti Gabriellával, az RHK Kft. kommunikációs vezetőjével együtt köszöntötte a résztvevőket.

Kovács Győző (25 éve a település polgármestere), aki egyúttal a Nyugat-mecseki Társadalmi Információs és Területfejlesztési Önkormányzati Társulás elnöke is, elmondta: a térségben folyó munkákkal kapcsolatban nem örömről, hanem felelősségteljes gondolkodásról van szó. A környező kilenc település nem csak a támogatások miatt vesz részt a programban. A két évente tartott közvélemény-kutatásokból kitűnik, hogy az érintett környék lakossága stabilan, 70% körüli arányban támogatná a beruházást.

Hogy a Nyugat-Mecsekben folyó kutatásokat elhelyezhessük a hazai radioaktív hulladék-gazdálkodás folyamatában, először tekintsük át röviden a radioaktív hulladékok tárolásának történetét.

A radioaktív hulladékok az izotóptechnika hazai alkalmazásával egyidejűleg jelentek meg. Ezeket kezdetben az alkalmazásban élen járó Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) területén tárolták. 1960-ra készült el a solymári kísérleti izotóptemető. A létesítményt az Országos Atomenergia Bizottságtól (OAB) a Budapest Fővárosi Közegészségügyi-Járványügyi Állomás (KÖJÁL) vette át és üzemeltette 1976-ig. A főváros közelsége és terjeszkedése, illetve a talaj vízzáró tulajdonságának elégtelensége miatt az OAB beruházásában Püspökszilágy és Kismémedi határában épült az új létesítmény, a Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló (RHFT). Ezt követően a solymári tárolót felszámolták.

A Paksi Atomerőmű első reaktorának üzembe lépése (1982) megsokszorozta az éves szinten keletkező kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék mennyiségét. A Paksi Atomerőmű műszaki tervében leírt koncepció szerint az erőmű üzemidejére a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék ideiglenes tárolását az erőmű segédépületében irányozták elő. Természetes elképzelésként adódott, hogy a Paksi Atomerőmű üzemeltetése és lebontása következtében keletkező hulladékot az RHFT-ben lenne célszerű véglegesen elhelyezni, hiszen itt működött az ország egyetlen, kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék elhelyezésére kijelölt létesítménye. Ennek keretében 1983 és 1996 között ide szállították az atomerőművi eredetű kis aktivitású szilárd hulladékot. Jelentős további bővítésre lett volna azonban szükség, de ez a telephely adottságai miatt nem volt lehetséges.

Ezért indult útjára 1993-tól a Tárcaközi Célprojekt (később Nemzeti Projekt), melynek egyik célkitűzése az atom-

erőművi eredetű kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék végleges elhelyezésének megoldása lett. Ennek keretében megkezdődött a telephely-kiválasztás előkészítése. Szakirodalmi adatok alapján az ország teljes területét áttekintették, majd az ígéretes térségekben – ahol azt a lakosság is támogatta – előzetes helyszíni kutatásokat végeztek a felszíni és felszín alatti elhelyezésre alkalmas földtani objektumok azonosítása érdekében. 1996-ban a földtani, műszaki biztonsági és gazdasági vizsgálatok záródokumentuma Bábaapáti külterületén, Üvegghuta térségében javasolt további vizsgálatokat a felszín alatti, gránitban történő elhelyezésre. A részletesebb kutatások 1997-ben kezdődtek meg. Szakmai és politikai viták után az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) kezdeményezésére a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) szakértői is felülvizsgálták a program keretében elvégzett tevékenységeket, és az addigi eredményekkel egyetértve a kutatások folytatását javasolták. A Magyar Geológiai Szolgálat szintén szakvéleményezte az elvégzett kutatásokat, és azokkal egyetértett. A kutatási eredményekre támaszkodó biztonsági elemzések igazolták, hogy a területen a tároló biztonságosan üzemeltethető.

A kutatásokat lezáró jelentés alapján 2004-ben elkészült a föld alatti kutatások 2007-ig érvényes terve, amelyet a Magyar Geológiai Szolgálat Dél-Dunántúli Területi Hivatala véleményezett, majd jóváhagyott. A föld alatti kutatási munkák 2005 februárjában a lejtaknák mélyítésével megkezdődtek. Ugyanebben az évben Bábaapátiban véleménynyilvánító népszavazást tartottak. 75%-os részvétellel a szavazók 90,7%-a egyetértett azzal, hogy Bábaapátiban kis és közepes aktivitású hulladéktároló épüljön, novemberben pedig az Országgyűlés előzetes, elvi hozzájárulást adott a földtanilag már korábban alkalmasnak minősített területen kis és közepes aktivitású hulladéktároló létesítését előkészítő tevékenység megkezdéséhez. 2008-ra elkészültek a Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló (NRHT) felszíni létesítményei. 2012-re kihajtották az első két felszín alatti tárolókamrát. Az első kamra ünnepélyes átadására és az első vasbeton konténer végleges elhelyezésére 2012. december 5-én került sor. Ezzel megkezdődött az atomerőművi eredetű kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezése.

A paksi atomerőmű Műszaki Tervének elfogadásakor érvényes előírás 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 vizszaszállítási feltételeket a Szovjetunió egyoldalúan módosította. A pihentetési időt öt évre emelték, és a visszaszállítás fogadásáért egyre növekvő árat kértek. Az egyre szaporodó problémák hatására a paksi atomerőmű szakemberei vizs-



gálni kezdték a kiégett kazetták tárolásával, feldolgozásával és elhelyezésével kapcsolatos alternatív lehetőségeket, majd egy moduláris, kamrás kialakítású száraz tároló létesítmény mellett döntöttek. 1992 szeptemberében a paksi atomerőmű szerződést kötött az angol GEC Alsthommal a létesítmény megépítésére. Ennek a konstrukciónak az egyik előnye, hogy a kiégett kazetták hűtését természetes kéményhatás biztosítja, valamint a tároló moduláris kialakítása következtében az igények szerint bővíthető. A Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója (KKÁT) első három kamrából álló modulja és a kiszolgáló épület 1997-re épült meg. A tároló földfelszíni épület, amelyben a fűtőanyag-kazettákat egyenként, függőleges helyzetű, vastag falú, hermetikusan zárt acél tárolócsövekben helyezik el. A tárolócsövek betonfalakkal körülvett kamrákban sorakoznak, függőleges helyzetben. A tárolócsövek körüli, majdnem 2 m vastag vasbeton kamra megfelelő árnyékolást biztosít a radioaktív sugárzás ellen. A tárolás száraz körülmények között történik, a termelődő maradék hő pedig a levegő természetes huzathatásán alapuló hűtési rendszer szállítja el. A szűrt hűtőlevegő a tárolócsövek között áramlik, ezért a kazettákkal közvetlenül nem érintkezhet. A tárolócsövekben semleges gázkörnyezetet (nitrogént) biztosítanak, amelynek a nyomását folyamatosan ellenőrzik.

A Paksi Atomerőmű fűtőanyaga urán-dioxid, amelyből egy reaktorban 42 tonnányi mennyiséget helyeznek el. Az elhasználódás után a nukleáris fűtőanyag-kötegeket áthelyezik a reaktor melletti pihentető medencébe, ahol víz alatt tárolják azokat minimum 3 évig. Évente blokkonként körülbelül 100 db kiégett fűtőelem-kazetta keletkezik. A pihentetési időszak leteltével a kazettákat vízzel töltött szállítókonténerbe helyezik. A konténer külső felületének dekontaminálását követően, azt vasúti kocsin szállítják át a KKÁT-ba.

Látható, hogy a radioaktív hulladékok tárolása Magyarországon rendben és biztonságosan, a NAÜ megelégedésére történik. De hátravan még a nagy aktivitású hulladékok elhelyezésének végleges megoldása. Erről hallhattunk két érdekes előadást.

Az első előadó Nős Bálint, az RHK Kft. stratégiai és műszaki igazgatója volt, előadásának címe: Radioaktív hulladék és kiégett üzemanyag kezelés keretei.

A témával kapcsolatos valamennyi feladatot az 1996-os Atomtörvény szabályozza. Ezek: a radioaktív hulladékok végleges elhelyezése; a kiégett üzemanyag átmeneti tárolása; a nukleárisüzemanyag-ciklus lezárása; a nukleáris létesítmények leszerelése; javaslat készítése a fenti tevékenységekre vonatkozó nemzeti politikára és nemzeti programra. Mindeme feladatok végrehajtója az RHK Kft. A feladatok finanszírozására az Atomtörvény előírásai szerint létrejött a Központi Nukleáris Pénzügyi Alap (KNPA).

Alapelv, hogy a radioaktív hulladék-kezelés költségeit annak kell megfizetnie, akinél a hulladék keletkezett, terheit annak a generációnak kell viselnie, aki a termelt villamos energiát használta.

Ez az alapelv érvényesül, mert a Paksi Atomerőmű az üzemideje végéig befizeti a program végrehajtásához szük-

séges fedezetet. Ezek a költségek beépülnek a villamos energia árába. Az RHK Kft. évente elkészíti a KNPA-ból finanszírozott tevékenységek közép- és hosszú távú tervét, amely a feladatok megvalósításának időütemezése mellett tartalmazza azok költségbecslését is. A KNPA-ban nyilvántartott pénz értékállóságát az Atomtörvény előírásai szerint a jegybanki alapkamattal megegyező kamatozással biztosítják. És mivel a jegybanki alapkamatnak van reálkamat-tartalma, ezért ez infláció feletti hozamot biztosít. Mindez azt jelenti, hogy a KNPA állománya és hozama, valamint a Paksi Atomerőmű jövőben esedékes befizetései teljes mértékben fedezetet biztosítanak a feladatok végrehajtására.

A KNPA-t tölti a kamatszolgálat 2084-ig (pl. 2015-ben 5,7 Mrd Ft) és 2037-ig a PA befizetései (pl. 2015-ben 21,3 Mrd Ft), valamint fogyasztják az abból történő kifizetések, azaz minden olyan kiadás, amely az RHK működésének, valamint különböző egységeinek működtetésére szolgál (pl. 2015-ben 15,5 Mrd Ft). 2084-re, amikor befejeződik a leszerelési-betárolási folyamat, a KNPA elfogy.

A sajtóbeszélgetés következő előadója Molnár Péter, az RHK Kft. kutatási osztályvezetője volt, aki az e témában folyó munkákról tájékoztatót. A 70/2011. EU irányelv kimondja, hogy „Műszaki szempontból széles körben elfogadott, hogy a nagy aktivitású hulladékok és a hulladéknak minősülő kiégett fűtőelemek kezelésének végpontjaként a mélységi geológiai elhelyezés jelenleg a legbiztonságosabb és legfenntarthatóbb megoldás”. Kimondja továbbá azt is, hogy a radioaktív hulladékot abban a tagállamban kell véglegesen elhelyezni, amelyikben az keletkezett, kivéve, ha a tagállam a 2006/117/Euratom rendeletet kielégítő egyezményt kötött egy másik állammal.

A probléma megoldása: mélységi geológiai tároló. A tároló biztonságát több százézer (!) év időtartamra kell garantálni, igazolni. Azért mélységi, mert a tárolót több 100 m mélyen, a föld belsejében alakítják ki, amely védett a felszíni hatásoktól, folyamatoktól. És azért geológiai, mert nem az ember alkotta műszaki létesítmények, hanem a stabil földtani környezet garantálja a hosszú távú biztonságot.

Európában a finn, svéd és francia kutatások vannak a leginkább előrehaladott állapotban: ezekben az országokban már 2022 és 2028 között megkezdődhet a nagy aktivitású radioaktív hulladékok végleges betárolása.

Magyarországon az 1990-es években kezdődtek el a kutatások, hogy ilyen helyet találjanak. A korábbi országos felmérésekből is ismert volt, hogy a Nyugat-Mecsekben található agyagkő (Bodai Agyagkő Formáció, BAF) alkalmas lehet ilyen tároló kialakítására. E kőzetnek világviszonylatban is ritka, kiváló vízzáró tulajdonságai vannak, de szintén fontos a térség minimális földrengés-veszélyeztetettsége is.

Az 1993-ban megindított Nemzeti Projekt keretében folyó kutatások első szakasza 1998-ban befejeződött. A zárójelentés szerint nem merült fel olyan körülmény, amely a BAF-ban történő nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezését kizárná. A zárójelentés hatására előterjesztés készült egy föld alatti kutatóbázis létesítésére, a BAF minősí-

tésére és további kutatására. Az OAB 1999. áprilisi ülésén tárgyalták az előterjesztést. A döntést ezzel kapcsolatban a gazdasági miniszter hozta meg 1999 nyarán, elvetve 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 program alapján 2003-ban vizsgálatok kezdődtek a 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 elkészült a nagy aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére vonatkozó, 2008-ban a kutatás hosszú távú programjáról szóló koncepcióterv. A Pécsi Bányakapitányság 2013-ban fogadta el az újabb kutatások tervét, és ekkor indult újult erővel a felszíni kutatás. A feladat rendkívül sokrétű. Az első a telephely kiválasztásának és jellemzésének szakaszolt, fázisokra tagolt végrehajtása. Ezt követi a befogadó kőzet alkalmasságának igazolása felszín alatti kutatólaboratóriumban, végezetül az üzemviteli és a hosszú távú biztonság igazolása biztonsági értékelés alapján, a lehetséges események, folyamatok, fejlődéstörténeti forgatókönyvek számba vétele. Csak ezek után kerülhet sor, több évtizedes előkészítés után, a mélységi tároló megépítésére és üzembe helyezésére.

A jelenlegi kutatási szakasz 2017-ig tart. A feladat a BAF térbeli elhelyezkedésének pontos meghatározása, és a kőzet jellemzése vízzáróság, szilárdság, hővezetés, repedezettség stb. alapján a felszín alatti vízáramlási rendszer vizsgálata, a hosszú távú földtani stabilitás értékelése.

Amit a BAF-ról tudunk: 250–260 millió éve sós iszaplapályon agyagos, finomszemű üledékből képződött kőzet, melynek vastagsága 200–1200 m. Több mint 150 km<sup>2</sup>-en ismert, 0–2,5 km mélységben (néhány helyen, így Bodán is felszíni kibúvása van). Jellegzetes vörösbarna színű, igen kis porozitású, kiváló vízzáró képességű kőzet. (Hasonló képződési folyamatot láthatunk ma is az USA UTAH államában, a Great Salt Lake területén.)

A leendő mélységi tárolót 500–900 m közötti mélységben kell kialakítani. Jelenleg 87 km<sup>2</sup> terület vizsgálatáról van szó, ahol 2017-ig 12 mélyfúrást (400–1600 m) és 2 sekélyfúrást (50–100 m) kell lemélyíteni összesen 11360 m hosszban, készül egy 800–1200 m hosszú kutatóárok, 21,5 km szeizmikus szelvény, valamint 500–1600 m között kutatófúrás magmintavétellel. A vizsgálati módszerekben mélyfúrás-geofizikai mérések, akusztikus lyukfáltévé, nagy érzékenységgű áramlásmérés, pakkeres hidraulikai mérések (vízvezető képesség, víznyomás, vízmintavétel), kőzetmechanika (hidrorepesztés), szeizmikus mérések (VSP) szerepelnek.

2014-ben két fúrás készült el. A BAF-2 fúrás mélysége 913,8 m. A fúrás végig a bodai agyagkőben haladt. A képződmény a vártnál kissé vastagabb (>1000 m), felső részén agyagosabb, alul finomhomokos betelepülések vannak, a rétegek változó dőlésűek. A kőzet kissé gyűrt, a felső 150–200 m erőbben repedezett, mállott. Igen kedvező vízföldtani jellemzői vannak. Zárt, igen kis porozitású kőzet (1–3%). A BAF-1, 1A fúrás mélysége 474,6 m, a BAF-ot még nem érte el. (Fontos, hogy valamennyi fúrásra a vizsgálandó terület szélein kerül sor, hogy a negyedmilliárd éves kőzet zártságát meg ne bontsák.)

A jelenleg kijelölt terület 10 km<sup>2</sup>-re történő szűkítésére a jelenlegi kutatási fázis lezárása után, 2018-ban kerül sor. Ezen belül fogják aztán kijelölni a tároló végleges helyét. 2030-tól kerül sor a föld alatti kutatólaboratórium (FKL) megépítésére. Az itt szerzett sokéves információ alapján 2055–2065 között épül meg a tároló, és elkezdődik a lebontásra kerülő erőmű blokkjainak és a KKÁT-ban tárolt kiegészítő üzemanyag-kazettáknak a végleges elhelyezése.

A tájékoztatások elhangzása után kérdéseket lehetett intézni az előadókhoz. Jelen sorok írója a KNPA-val kapcsolatban kérdezte: mi a garancia arra, hogy az Alapban található, igen tekintélyes mennyiségű pénz biztosan a kitűzött célokra lesz fordítva, nem fordulhat-e elő az, hogy a hosszú évtizedek alatt egy kormány esetleg úgy dönt, hogy erre a pénzre (átmenetileg) valahol másutt van szükség? Kereki Ferenc válaszából megtudhattuk, hogy a jogszabályi háttér stabil, és aggodalomra nincs ok.

Befejezésül a résztvevők megtekintették BAF-2 fúrás helyszínét és a Bodai Információs Parkot.

*Tóth Lajos*

# Programajánló

## A Magyar Geofizikusok Egyesületének és a Földtudományi Civil Szervezetek Közössége tagszervezeteinek közös rendezvénysorozata

A Magyar Geofizikusok Egyesülete az elmúlt évek rendezvényeinek folytatásaként új előadássorozatot hirdet ez év második felétől kezdődően. Az előadások keretében keressük azokat a témákat, amelyek kapcsolatot jelenthetnek Egyesületünk és a Földtudományi Civil Szervezetek Közösségében (FöCiK) társult szervezetek között. Ezért minden egyes rendezvény társrendezőjének felkérjük a FöCiK más-más tagszervezetét. Bízunk abban, hogy ezek a rendezvények jól fogják szolgálni a társult szervezetek közötti szakmai és emberi kapcsolatok továbbépítését.

A rendezvények nyilvánosak, de különösen várjuk a meghirdetett témakör iránt érdeklődő FöCiK tagokat.

*Helyszín:* a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet díszterme (Budapest, Stefánia út 14).

*Tervezett időpontok:* a hónap harmadik szerdája, 14 óra.

Az előadókat és az előadások címét tartalmazó meghívókat az adott rendezvényt három héttel megelőző időpontig elektronikus úton postázzuk a társult szervezetek titkárságára. A titkárságok gondoskodnak tagjaik értesítéséről.

### 2015. II. félév programja

#### 2015. szeptember 16.

*Rendező:* Magyar Geofizikusok Egyesülete és Magyarhoni Földtani Társulat

*Téma:* Geológus-geofizikus kutatócsoportok a bauxitkutatásban és a szénhez kötött metán kutatásában

#### 2015. október 21.

*Rendező:* Magyar Geofizikusok Egyesülete és Magyar Földrajzi Társaság

*Téma:* Áramlások a földköpenyben, vulkánok, hegyek

#### 2015. november 18.

*Rendező:* Magyar Geofizikusok Egyesülete és Magyar Földmérési, Térképészeti és Távérzékelési Társaság

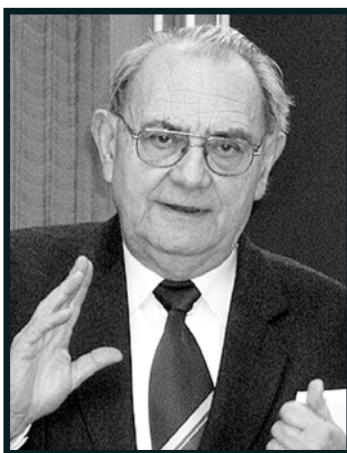
*Téma:* Földi erőterek, földi vonatkoztatási rendszerek

A megkezdett sorozat folytatását tervezzük.

*Horváth Zsolt*  
Magyar Geofizikusok Egyesülete  
Elnök

**Wallner Ákos,**  
**a Magyar Geofizikusok Egyesületének alapító tagja,**  
**az MTA Geodéziai és Geofizikai Intézetének volt munkatársa,**  
**a Kitaibel Asztaltársaság aktív tagja, okleveles bányamérnök**  
**1929–2015**

Wallner Ákos 1929. november 11-én született Veszprémben. Soproni lakos 1943-ban lett, amikor édesapját, dr. Wallner Ernőt 1943-ban ide nevezték ki iskolaigazgatónak. Az Evangélikus Líceumban tett érettségi vizsgája után 1948 és 1952 között Sopronban végezte egyetemi tanulmányait. Alapításától munkatársa lett a jelenlegi Geodéziai és Geofizikai Intézetnek és előd intézményeinek. Fő kutatási területe a földmágneses tér területi és időbeli változásainak vizsgálata volt. Az 1950-es évek közepén fontos szerepet vállalt a Kínában működő magyar komplex geofizikai kutatócsoport munkájában. Kimagasló érdemeket szerzett a Nagycenki Geofizikai Observatórium létesítése terén, ahol



**Wallner Ákos**  
**1929–2015**

hosszú évekig ő végezte a földmágneses tér-komponensek abszolút meghatározását. Érdemei elismeréseként 1991-ben a Nemzetközi Földmágnességi és Aeronómiai Asszociáció (IAGA) érdemérmével tüntették ki.

Ákossal kedves, kapcsolatteremtő és mindenkor segítőkész kolléga távozott közülünk. Hiányozni fog nagyon mindnyájunknak.

Emlékét megőrizzük.

Sopron, 2015. június 9.

*Varga Péter*

(A megemlékezést az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet honlapjáról vettük át.)

# Berényi István

## 1950–2015

Szomorú kötelességünknek teszünk eleget azzal, hogy a Geoinform Kft. és a volt kollégák nevében búcsúztatjuk Berényi István munkatársunkat.

Az olajiparban töltött, közel 40 éves felbecsülhetetlen értékű munkásságával mind szakmai, mind pedig emberi vonatkozásban örök értékű példát hagyott számunkra.

István 1975-ben végzett villamos mérnökként és ekkor került az olajiparba.

- Munkája során volt észlelő, és műszerész a Nagyalföldi Kutató és Feltáró Üzemnél, 1975–78 között,
- dolgozott a geofizikai üzemben üzemvezető-helyettesként, üzemi főmérnökként, majd üzemvezetőként a Kőolajkutató Vállalatnál a nyolcvanas években,
- 1993-tól pedig társaságunk, a Geoinform Kft. egyik alapítójaként, a 90-es években ő volt a szolnoki geofizikai üzem vezetője.

2003-ban munkavédelmi szakmérnöki képesítést szerzett és ez évtől töltötte be a Geoinform Kft. egészségvédelmi, biztonságvédelmi és környezetvédelmi vezetői tisztségét, egészen a betegsége kezdetéig. Ebben az időszakban alakult ki a Geoinform Kft. EBK irányítási rendszere, amelyben



**Berényi István**  
1950–2015

István alkotó munkája felbecsülhetetlen és meghatározó volt. Az új rendszer bevezetésével nagyszerű eredmények születtek, kétszer is elnyerte társaságunk a legjobb EBK teljesítményt nyújtó szerviz cég címet a MOL csoporton belül.

2012-től, amikor újabb változások jöttek a cég életében, István sokat aggódott a Geoinform Kft. jövőjéért, és azért, hogy biztos, jó kezekbe adhassa át, amit felépített.

A Magyar Geofizikusok Egyesületének munkába állása, 1975 óta tagja volt. Mind egyénileg, mint beosztásánál fogva egész pályafutása alatt aktívan támogatta az Egyesület munkáját és törekvéseit.

Kedves István! Köszönjük az örökséget! Ígérjük, hogy nemcsak megőrizzük, de méltó módon továbbvisszük és fejlesztjük is, amit ránk hagyta!

És végül, a bányász társadalom hagyománya szerint szeretnék búcsúzni szeretett és tisztelt kollégánktól:

„Ha az, ki elment közülünk,  
Eszedbe jut megint,  
Köszönts rá egy »Jó szerencsét!«  
Bányász szokás szerint.”

*Pugner Sándor*

# Gerzson István

## 1933–2015

Gerzson István 1933. március 2-án született a Pécs melletti Hirden. Sok gyermekes, értelmiségi családban nőtt fel. Pécsen érettségizett 1951-ben a Nagy Lajos Gimnáziumban, majd a Soproni Egyetem hallgatója volt 1951–56-ig. Egyetemi tanulmányai során földmérnöki alapképesítés mellett geofizikus mérnöki diplomát szerzett, amely tanulmányokhoz geológiai és hidrogeológiai szaktárgyak is tartoztak.

Végzés után a teljes évfolyamot az akkoriban alapított Pécsi Uránbánya Vállalathoz (később a neve a közismert Mecseki Ércbányászati Vállalatra változott) irányították, ebben az időben nemigen lehetett válogatni a munkahelyek között. István majdnem az egész aktív pályafutását a MÉV Kutató-Mélyfúró Üzeménél töltötte, ahol a kezdeti, a Mecsek térségében végzett kutatások után a Felszíni Geofizikai részleget irányította. Az üzem fő tevékenysége elsősorban a hazai uránkutatás volt, amelynek során az egész országban végzett, illetve irányított ilyen jellegű munkákat. Első önálló munkája a soproni uránkutató csoport vezetése volt (találtak ugyan ércesedésre utaló nyomokat, de – valljuk be: szerencsére – sem a mennyiség, sem a minőség nem volt a bányanyitáshoz elegendő). A radioaktív módszerek mellett geoelektromos, földmágneses, geokémiai és fúróluk-szelvényezési módszerek alkalmazásával és értelmezésével is foglalkozott. A helyszíni terepi kutatáson túl légi geofizikai és egyéb bonyolult körülmények közötti (bányavágatok, barlangok stb.) méréseket is végzett. A geofizikai módszerekkel gyakran együtt jártak földtani és hidrogeológiai munkák is. Egy ideig sugárvédelmi szakterületen is tevékenykedett, ennek megfelelő izotóptechnikai szakvizsgálással is rendelkezett.

Tudományos érdeklődésének és tanulni vágyásának köszönhetően 1972-ben nyolc hónapos franciaországi ösztöndíjat nyert el, ahol megismerkedhetett az akkor világszínvonalú francia atomiparral és megtanulhatta a francia nyelvet. Sokáig szívesen emlegette ezeket a hónapokat, ahol a világ különböző tájairól érkezett kollégákkal ismerkedhetett meg, cserélhetett tapasztalatot. Többükkel utána még évekig kapcsolatban maradt.

A Felszíni Geofizikán akkoriban nagy volt a jövés-menés, több, nagyobb létszámú kutatócsoport dolgozott szerte az országban, gyakran 40–60 munkatárs irányításáról kellett gondoskodni, a kutatások eredményeit értékelni. István nagy türelemmel és kitartással végezte feladatát, tanári habitusának megfelelően sokat foglalkozott az új munkatársak (pl. e sorok írója) betanításával, a kalandos évtizedek alatt nagy volt a fluktuáció. Ennek a szerteágazó munkának rengeteg (ma már

szabadon elérhető) lenyomata keletkezett a MÉV egykor „szigorúan titkos” irattárában, kutatási jelentések formájában; az eredmények publikálásáról az „átkosban” szó sem lehetett. Ma is tanítani lehetne (sőt: kellene) azt a precíz igényességet, ahogy az akkori szakemberek – köztük István – a szakmai jelentéseiket összeállították.

A mindennapi „rutin” kutatások mellett volt ideje, energiája tudományos szintű módszertani kutatásokat is rendszeresen végezni, munkatársaival közösen egy forradalmian újszerű uránkutató módszert, az úgynevezett „komplex mélységi radiometriai kutatómódszert” (KMRK) dolgozták ki, ami a hazai eredményes alkalmazás mellett jelentős nemzetközi érdeklődést is kiváltott. Ekkor már a 80-as éveket írjuk, a titkosítás kezdett felpuhulni, metodikai eredményeket már lehetett publikálni.

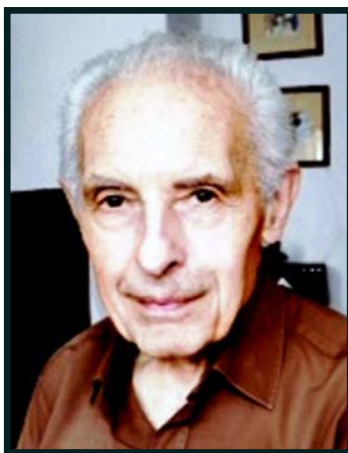
Az MGE-nek 1957 óta tagja, a Mecseki Csoport alapítója, nyugdíjazásáig „örökös” titkára. Nagy egyesületi élt folyt akkoriban

a Mecsek alján, se szeri se száma a szakmai rendezvényeknek, baráti összejöveteleknek, amelyeknek István fáradhatatlan szervezője, „motorja” volt. Az Egyesület országos rendezvényeinek szervezésében is aktívan részt vállalt, munkáját Renner-díjjal ismerték el. István egy sor szakcikk írója és egy radiometriai tankönyv társszerzője volt. Számos külföldi kongresszuson vett részt (Leipzig, Gdansk, Lyon, Moszkva, Belgrád, Torna), beszélt a francia, német és orosz nyelveket.

Amikor az általa irányított kutatások már majdnem célba értek (pl. uránércesedés kutatása Bátaszék térségében már a sűrítő fúrások szakaszában tartott), az élet közbeszólt: az urán ára leesett, a bányászat drága lett, az állam nem finanszírozhatta tovább sem a bányászatot, sem a kutatást. A hazai uránipar sorsa megpecsételődött, a MÉV feladata egyre inkább a bányászat által károsított környezet helyreállítása lett. A '90-es évek eleji nagy leépítések alkalmával a középkorú szakembereket, köztük Istvánt is méltatlanul korán nyugdíjazták. Persze ő nyugdíjasként is rendületlenül dolgozott tovább, legfontosabb munkája az egykori MÉV irattár rendbetétele, a széthordott dokumentumok „vissza-vadászata” volt. Elkészítette a több évtizedes hazai uránkutatók szakmai összefoglalását, ami máig biztos forrásul szolgál a témában kutakodóknak. Élete szinte utolsó pillanatáig dolgozott, eltávozta váratlanul következett be; előtte pár héttel még vidáman beszélgetve mentünk együtt a buszmegállótól az egykori kővágószőlősi bányüzemben lévő munkahelyeinkre.

István, nyugodjál békében, emlékedet megőrizzük.

Várhegyi András



Gerzson István  
1933–2015



# Mészáros József

## 1944–2015

Mészáros Jóska a német megszállás napján pedagógus családban született Kárpátaljai Bustyaházán. A háborús események miatt a család viszontagságok között települt át Magyarországra, Kistarcsára. A tehetséges fiú érettségi után a Műszaki Egyetem gyengeáramú szakán szerezte diplomáját. Pályafutását meghatározta, hogy bátyja a Geofizikai Intézetben dolgozott, így ő is követte. Akkor már Cini húga is ott dolgozott. A Szeizmikus Főosztályon Sédy Lóránddal együtt alapozták meg a hordozható refrakciós berendezések (Pionir) sikeres családfáját. Jóska konstrukciós tehetsége, korszerű ismeretei, valamint gyors problémamegoldó képessége folytán elismerést szerzett az intézetben. A geofizikai mérések területén is megszerezte a szükséges ismereteket. A mongol expedícióban már komplex hardver–szoftver ismeretei révén ő volt az egyszemélyes szeizmikus.

Az igazi, szakembert próbáló feladat azonban a 80-as években várt rá. A rohamosan bővülő műszergyártási feladatok túlfeszítették a kutatóintézeti kereteket, amit az intézet leányvállalat alapításával gondolt megoldani. Az igazgató Mészáros József lett.



Mészáros József  
1944–2015

Fő gyártmányuk a széles papírtekerceseken is dolgozó színes plotter (COROLLPRESS), az egyetlen ilyen a szocialista országokban. Majd követte egy sor más műszer pl. rádiófrekvenciás berendezések, rázásálló, hajókra szerelhető eszközök stb. Itt mutatkozott meg új oldala Jóskának „a gyár nélküli műszergyártás”. Kiváló kooperációs képességeivel tucatnyi kisvállalkozást szervezett a leányvállalat mellé, köztük, akár vállalkozó szellemű tsz-üzemágakat is. Erre gondoltunk a temetésén a zsúfolásig megtelt nagytemplomban, hogy mennyien szerették, becsülték és kísérték el utolsó útjára.

Mindig realista volt. Amikor néhány évvel a rendszerváltás után kapacitáltuk újrakezdésre, elmagyarázta, hogy a *high-tech*ben nincs megállás, többéves kiesés nehezen pótolható így elzárkózott a kezdeményezéstől. Kedves Jozsó! De szívesen vitatkoznánk veled ma is, de a sors és súlyos betegséged közbeszólt. Szép volt a Veled töltött szakmai múlt. Marad a búcsú: Nyugodj békében!

Müller Pál

Jozsó öcsém elvesztése nagyon megrendített, annak ellenére, hogy az utolsó hetekben testvéreimmel együtt éreztük, hogy komoly baj van. Nagy úrt hagyott maga után, hiszen testvéreként szinte végig követhettem az életét. Egy tartalmas, gazdag élet végére került pont.

Örülök, hogy hatásomra ő is a Geofizikai Intézetet választotta, amely döntően meghatározta további életét. Feleségét, Magdit az Intézetben ismerte meg, és hamarosan bekövetkezett a frigy. Rákospalotai lakásuk a szülői házban igazi baráti és családi találkozók színhelye volt. Magam is sokszor megfordultam ott. Igazi, örömteli események voltak gyermekeik – Lóri és Márta – megszületése. A rákospalotai évtizedek alatt kezdte öcsém érlelni magában a gondolatot, miszerint nyugdíjas éveit Ábrahámhegyen szeretné tölteni, ahol a 80-as években egy csodaszép nyaralót építettek. A gondolat, de inkább a dédelgetett álom be is következett, amikor nyugdíjba vonulása után, egy kis televíziós üzleti kitérő után Magdival leköltöztek Ábrahámhegyre. A hangulatos Balaton-felvidéki környezet és a ház körüli hatal-

mas birtok, úgy gondolom, öcsémet nagy meglepetéssel és örömmel töltötte el. Rokonok, barátok egymásnak adták a kilincset. A birtokkal és a házzal kapcsolatos teendők, kirándulások, strandolás, rokon látogatások tették színessé öcsém nyugdíjas éveit. A nyaralón mindig alakítottak, újítottak valamit. Öcsém ki nem fogyott az újabb és újabb ötletekből. Fűrt, faragott, mindig csinált valamit kreatív módon.

Teltek-múltak az évek, és egyszer csak elkezdtek sorra megjelenni az unokák. Sokszor töltötte be gyerekzsivaj az Ábrahámhegyi ház falait. Jozsó öcsém nagyapaként sok-sok örömet szerzett az unokáinak, és azt gondolom, hogy az öt unoka is mindig szeretettel fog emlékezni az Ábrahámhegyi Nagyapára.

Kedves Jozsó, nagyon nehéz búcsúzni, ezer és ezer szál kötött össze bennünket. Amíg az eszemet tudom, emlékezni fogok Rád.

Isten nyugosztaljon békében!

Mészáros Ferenc

# Tirkala Ferenc

## 1932–2015

Tirkala Ferenc 1932-ben született Hejőkeresztúron. Középiskoláit Miskolcon végezte, itt is érettségizett. Egyetemi tanulmányait a Miskolci Nehézipari Egyetemen kezdte, de mint geofizika szakos hallgatót átirányították Sopronba, mivel akkor még ott működött a geofizikai tanszék.

Diplomája megvédése után 1956-ban szinte az egész évfolyammal együtt került a Mecseki Ércbányászati Vállalathoz (akkori nevén Bauxitkutató Vállalathoz).

Szakmai pályafutását meghatározta, hogy 1957-ben ő vette át a bakonyi bányauzem geofizikai irányítását. Ettől kezdve rendkívüli odaadással és alapos-sággal dolgozta be magát a radiometrikus ércminősítés és prognosztizálás szakterületébe és ezen a területen a vállalat meghatározó szaktekintélye lett. Jelentős szerepet vállalt az Operátorok Kézikönyve elkészítésében, amely elősegítette a vállalati geofizikus operátorok képzését. Korán felismerte a bányabeli radiometrikus adatok számítógépes feldolgozásának hasznosságát a termelés-tervezésben és munkája úttörő volt ezen a területen. Meghívott szakértőként részese volt a szlovéniai uránbányászat megindításának is.

Geofizikusként sem idegenkedett munkaszervezési elvek kidolgozásától és gazdasági elemzések elvégzésétől. Ennek jelentős szerepe volt abban, hogy 1973-ban váltás következett be pályafutásában: bányászati, föld alatti tevékenységről, vállalati érdekből uránkutatásra váltott, ő lett a Kutató-Mélyfúró Üzem üzemvezetője majd igazgatója.

Üzemvezetőként mindig támogatta a mások tapasztalatainak megismerését és hasznosítását. Azt vallotta, hogy „ha a jót már kitalálták, akkor azt nem kell újból kitalálni, csak legfeljebb továbbfejleszteni”.

Az általa irányított üzemhez kerülő fiatal műszakiakat felkarolta, segítette, de mindig elvárta tőlük a komoly teljesítményt is.

Büszke volt arra, hogy sikereit saját erejéből érte el. Munkáját a Munka Érdemrend Ezüst Fokozatával ismerték el.

A 80-as években fokozatosan jelentkezett későbbi súlyos betegsége, így 1989 decemberében nyugdíjazását kérte. Tevékeny életvitelét nyugdíjasként is folytatta. Szülőfaluja történetének irodalmazásába kezdett, és megírta Hejőkeresztúr helytörténetét. Kinyomozta, hogy a Rákóczi szabadságharc időszakában indult átrendezéshez köthető a görögkeleti ruszinok megjelenése Hejőkeresztúron. Faluja ezzel a helytörténeti összeállításával pályadíjat is nyert.

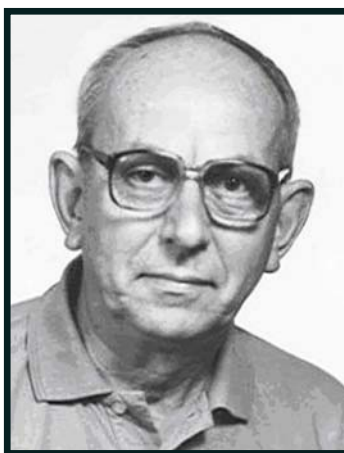
díjat is nyert.

A Pécsi Görög Katolikus Egyházközségnek annak 1974. évi megalakulásától kezdve egészen élete végéig aktív tagja volt.

Mozgalmas élete az utóbbi években nehezen birkózott a súlyosbodó kórral, és június 7-én eltávozott közülünk.

Nyugodj békében!

*Müller Pál, Nagy Zoltán*



**Tirkala Ferenc**  
1932–2015

## Rendezvéynaptár

2015. október		
okt. 5–8.	A Balkán Geofizikai Társulat 8. kongresszusa (www.eage.org)	Chania, Kréta, Görögország
okt. 13–15.	3. Fenntartható Földtudományi Konferencia (www.eage.org)	Celle, Németország
okt. 18–23.	SEG – évi közgyűlés és műszerkiállítás (www.seg.org)	New Orleans, USA
okt. 21. 14.00 h	„Földtudományi határterületek 2015/2” Az MGE és a Magyar Földrajzi Társaság közös előadói ülése. <i>Előadók:</i> Galsa Attila (köpenyáramlások), Karátson Dávid (vulkánok), Szabó Zoltán (Eötvös a csúcsokon)	Budapest, MBFH Konferenciaterem (Columbus utca)
2015. november		
nov. 7–8.	Földtudományos Forgató (a földtudományok bemutatkozása a nagyközönségnek, kicsiknek és nagyoknak)	Budapest, Magyar Természettudományi Múzeum
nov. 18. 14.00 h	„Földtudományi határterületek 2015/3” Az MGE és a Magyar Földmérési, Térképészeti és Távérzékelési Társaság közös előadói ülése. <i>Téma:</i> Földi erők, földi vonatkoztatási rendszerek	Budapest, MFGI díszterem (Stefánia út)
nov. 24–26.	3. nemzetközi konferencia a geoelektromos monitorozásról (opac.geologie.ac.at)	Bécs, Ausztria
2016. március		
márc. 14–17.	Az SPWLA 56. évi szimpóziuma (https://spwla.org)	Long Beach, Kalifornia, USA
2016. április		
ápr. 17–22.	EGU General Assembly 2016 (www.egu2016.eu)	Bécs, Ausztria
2016. május		
máj. 30– jún. 2.	78. EAGE kongresszus és műszerkiállítás (www.eage.org)	Bécs, Ausztria
2016. szeptember		
szept. 4–8.	21. Near Surface Geoscience 2016 (21. konferencia) (www.eage.org)	Barcelona, Spanyolország

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

Kakas Kristóf

## USA, OKLAHOMA, 1975 40 éve hoztuk az első szeizmikus vibrátorokat



Az ELGI „úttörő” csapata a G. Failing Co.-nál (Enid, Oklahoma) a vibrátorok gyártását tanulmányozza (illetve inkább csodálja, *balról*: Bodoky Tamás, Erőss Sándor, Czifra Ferenc, M. Kvas, a cég főmérnöke, Német Géza)



Kész az első Birdwagen hordozójármű – még nincsen rajta a vibrátor (Industrial Vehicles Co., Tulsa, Oklahoma, *balról*: Bodoky Tamás, mellette pipával az IVI főmérnöke, Jay Bird, a cég mérnöke, Erőss Sándor, Czifra Ferenc, Németh Géza)

MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

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

E-mail: [postmaster@mageof.t-online.hu](mailto:postmaster@mageof.t-online.hu); Honlap: [www.mageof.hu](http://www.mageof.hu)

