

A magnetotellurikus kutatómódszer alkalmazása és fejlesztése a Pannon-medence mélyszerkezetkutatása céljából

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

Rubóczki Tibor

OKLEVELES GEOFIZIKUS

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola
Földtan-Geofizika Program

Doktori Iskola Vezetője:

Prof. Timár Gábor, DSc

Doktori Iskola Programvezetője:

Prof. Pálffy József, DSc



Témavezető:

Wesztergom Viktor László, CSc

HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

Konzulensek:

Galsa Attila, PhD

*Egyetemi docens, Geofizikai és
Űrtudományi Tanszék, Eötvös Loránd
Tudományegyetem, Budapest*

Novák Attila, PhD

*Tudományos munkatárs, HUN-REN
Földfizikai és Űrtudományi
Kutatóintézet, Sopron*

HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

2025

Bevezetés és a kutatási célok megjelölése

A magnetotellurika (MT) az elektromágneses diffúzió elvén alapuló geofizikai kutatómódszer, amelyet a teljes litoszférát átfogó földtani kutatásokhoz fejlesztettek ki, alkalmazzák ipari nyersanyagkutatáshoz és tudományos célú mélyszerkezeti vizsgálatokhoz egyaránt (pl. Berdichevsky & Dimitriev 2008, Chave & Jones 2012, Everett & Chave 2019, Simpson & Bahr 2005, Weaver 1994). Doktori kutatásaim során az MT elméletének fejlesztésével és a Kárpát-Pannon régióban zajló litoszféreléptékű MT vizsgálatokkal foglalkoztam (pl. Ádám & Wesztergom 2001). Ez idő alatt, részt vettem többek között a Pannon LitH₂scope Lendület kutatócsoport munkájában (Kovács et al. 2021), melynek során előállítottam a Pannon-medence új, ún. elektromos litoszféra-asztenoszféra (eLAB) mélységtérképét. Ezenfelül az MT válaszfüggvényekből elkészítettem a Pannon-medence geoelektromos szerkezeti térképét (Rubóczki et al. 2024a). Az MT módszer fizikájának vizsgálatához felépítettem egy végeselemes 3D MT numerikus modellt, amely lehetővé tette a felszín alatt az elektromágneses terek vizsgálatát. Az MT modell alkalmas tetszőleges fajlagos ellenállású kőzetoszlop modellek esetén az MT szondázási görbék számítására, így a priori geológiai és geokémiai paraméterek tesztelésére, s ezáltal a valós MT mérésekkel történő összevetésre (Rubóczki et al. 2024a, 2024b). Továbbá részt vettem több kisebb, regionális MT adatfeldolgozásban és azok értelmezésében. A Topo-Transylvania program keretében (Matenco et al. 2018) az Erdélyi-medence litoszféra vastagságát határoztuk meg a korábbi földtani eredmények tükrében (Novák et al. 2024), illetve egy nemrégiben végbement MT mérésorozat munkálatait irányítottam 2024. nyarán a Nógrád-Gömör vulkáni területen (Patkó et al. 2021, Rubóczki et al. 2025). A doktori dolgozat célkitűzése a Pannon-medencében elért új litoszféreléptékű geofizikai eredmények összefoglalásán túl, egy olyan elméleti és gyakorlati tudásanyag összefogása, amely a korszerű MT kutatások elvégzéséhez szükséges.

A doktori dolgozat összefoglalása

A dolgozat 1. és 2. fejezete az MT korszerű elméletbe nyújt betekintést, kezdve az MT működésének leírásával, majd folytatva a módszer EM forrásaival, a rögzített idősorok feldolgozásának technikájával és a Föld belsejére jellemző fajlagos elektromos ellenállás viszonyokkal. A 2. fejezet az MT fizikai alapjairól szól, annak diffúziós jellegéről, az alkalmazott közelítések jelentéséről.

Ezután az 1D MT modellalkotás folyamatát mutatom be, illetve a bonyolultabb 2D és 3D MT modellek felállításához szükséges alapelveket. Végül az MT válaszfüggvény lehetséges torzulásaival és tulajdonságaival is foglalkozom. A dolgozat 3. fejezete az MT módszer néhány gyakorlati vonatkozását ismerteti, mint az MT méréstervezést, az idősorok feldolgozását, illetve az MT modellezés és az inverzió során hasznos gyakorlati ismereteket. A fejezetet az MT felbontás jelentésének kérdéskörével zárom, melynek becslése korántsem magától értetődő.

A kutatási eredményeket a dolgozat 4. fejezete foglalja össze, közöttük kiemelt jelentőségű a Pannon LitH₂Oscope MT állomáshálózat eredményeit bemutató 4.1. fejezet (Rubóczki et al. 2024). Ez a kutatás az elmúlt évtizedek egyik legtöbb, összesen 40 db hosszúperiódusú MT mérésből álló adatrendszerén alapszik, amely közel egyenletesen fedi le a Pannon-medence magyarországi részét, ezzel lehetővé téve a litoszféraléptékű fajlagos ellenálláseloszlás vizsgálatát. A projekt keretében meghatározásra került a Pannon-medence elektromos litoszféra-asztenoszféra (eLAB) mélységtérképe. Az eLAB mélysége az Alföldön a legsekélyebb, 60–100 km közötti, a Dunántúli- és Északi-középhegységben 100 km körül található, míg a Dél-Dunántúli régióban ezt meghaladó 100 km eLAB mélységek voltak jellemzők. A legfrissebb elérhető S-vevőfüggvényen alapuló szeizmológiai LAB becsléssel (sLABrf) összevetve, kontúrjaik szerkezete hasonló mintázatot mutatott, azonban a mélységértékek eltérése az egyes régiókban a több 10 km különbséget is elérte. A két LAB becslés igen hasonló volt az Alföldön (50–60 km), jellemzően néhány km eltérés volt. A Pannon-medencében az sLABrf kisebb változékonyságot mutatott a mélységgel, maximális mélysége nem haladta meg a 90 km-t még a dél-dunántúli régióban sem, ezzel szemben az eLAB becslés ezen a területen jóval nagyobb, 100 km mélységet adott. Az eLAB és sLABrf mélységek közötti eltérés átlagos nagysága 10–40 km, mely nem kirívó a fanerozoikumi Európában. A kétféle LAB becslés összevetése, azt a feltevést erősíti, miszerint ez az átmenet sokkal inkább egy folytonos határréteg, mintsem egy éles változás, így különböző geofizikai módszerek eltérő LAB becslést adhatnak.

A Pannon LitH₂Oscope MT adatrendszert felhasználtam, néhány kiválasztott területre vonatkozó elméleti kőzetoszlop modellel történő összevetés készítéséhez. Ehhez a modell ellenállásprofilból számított és a valós MT mérések szondázási görbéit hasonlítottam össze. Ez alapján a teljesen száraz litoszféra amelyben nem található sem szerkezeti hidroxil, sem olvadék – valószínűtlen. A modell paraméterteszt eredményei arra engednek következtetni, hogy bizonyos fokú, $\sim 1 \text{ wt}\%$

fluidumtartalom, valószínű. A fluidum összetevőire egyaránt igaz, hogy azok csökkentik a kőzet fajlagos ellenállását, így azok hatása az MT mérés és a modellezés alapján nem különíthető el. Az MT válaszfüggvényeket ezenfelül a Pannon-medence geoelektromos szerkezeti térképének megalkotásához is használtam, ezen az indukciós nyilak az alacsony fajlagos ellenállású térrészeket jelölik, míg a fázistenzor a geoelektromos szerkezet csapásirányáról és dimenziójáról ad információt. Sekély mélységnél ezek a vastag üledékes medenceterületek felé mutattak, mint a Makói-árok, a Békési-medence és a Zala-medence. Nagyobb mélységekben az indukciós nyilak és fázis tenzorok a Közép-Magyarországi nyírózónát rajzolják ki, míg az eLAB mélysége felé közeledve É–ÉNy irányba forduló szerkezeti irányt mutatnak, melynek magyarázata korántsem egyértelmű. Egyfelől lehetséges a regionális alacsony fajlagos ellenállású régiók hatása, mint a Nógrád-Gömör és Közép-Szlovákiai vulkáni területek vagy a Pienniny-Klippen öv, másfelől a köpenylitoszférában és az asztenoszférában megjelenő anizotrópia szintén egy lehetséges magyarázat (Rubóczki et al. 2024a).

A 4.2. fejezetben bemutatott, általam fejlesztett végeselemes 3D MT numerikus modell különlegessége – más hasonló modellekhez képest, az alkalmazásokon túl, hogy az MT módszert érintő elméleti kérdések vizsgálatát is lehetővé teszi. Modellezhető általa, tetszőleges alakú ellenállás inhomogenitás, függvény szerint változó ellenállás-mélység profil, megadható benne egy ható ellenállás anizotrópiája, sőt a mágneses permeabilitás hatásának figyelembevétele is lehetséges. A 3D MT modell egyetlen hiányossága, hogy jelen formájában nem képes inverziós alkalmazásokra. A modell felállítása során megválasztottam és teszteltem, az alkalmazott EM fizikai egyenleteket, peremfeltételeket, a lineáris egyenletrendszer megoldásának módjait, valamint a modell diszkretizálását is. Ezt követően verifikáltam a 3D MT modell működését egy háromréteges alapmodell által. A szimulációval létrehozott szondázási görbék numerikus megoldásának relatív eltérései az analitikus megoldással való összevetés során 0,1% alatt maradtak, a teljes periódusidő tartományában.

A 3D MT modell vizsgálati lehetőségeit a háromréteges alapmodellbe ágyazva, egy csapásirányban anizotróp, alacsony fajlagos ellenállással rendelkező téglatest ható (nyírózónamodell) példáján keresztül mutattam be. A példa kiválasztása kötődik a Pannon LitH₂Oscope MT állomáshálózat geoelektromos szerkezeti ábráján kimutatott Közép-Magyarországi nyírózóna észleléshez. A modellezés során illusztráltam az ellenállás-anomália csapásirányában a mágneses

tér, az indukált áramok, valamint a Poynting-vektor és a Joule-hő térbeli viselkedését. A modell ezenfelül szintetikus MT mérések sorozatát is tartalmazta, amelyek a csapásirányra merőleges irányból közelítették meg az anizotrópiával rendelkező nyírózónát. Fő tanulságuk: ha az ellenállás-anomália közvetlen kapcsolatban áll egy másik alacsony fajlagos ellenállású réteggel, a szondázási görbékre gyakorolt hatás lényegesen nagyobb, ez a tapasztalat a Pannon-medencében is számos esetben igazolást nyert.

A 4.3. fejezet az Erdélyi-medencében 2018-ban végzett Topo-Transilvania MT mérések feldolgozását tartalmazza (Novák et al. 2024). Ebben szelvény mentén 8 db MT állomás, eLAB meghatározását készítettük el, amely K–Ny irányban szeli át az Erdélyi-medencét, a Pannon-medencétől, a Kárpátkanyar térségéig. Az inverziós eredmények az Erdélyi-medence irányába egyre mélyülő eLAB becslést valószínűsítettek, melynek maximuma 120 km volt a Kárpátok felé közelítve, ám a Kárpátkanyar térségében az eLAB becslés 90 km mélységig csökkent. A kivékonyodás oka, feltehetően a Csomád vulkáni terület és a Vráncsa-zóna, mint máig aktív lemezszegélyhez való közeledésben keresendő. A geoelektromos szerkezeti vizsgálat, az Erdélyi-medence területén a Dragos-Voda – Bogdan-Voda törésrendszer irányát jelölte, míg a Keleti Kárpátokhoz közeledvén, a szerkezetet jelző mennyiségek orientációja is K – DK-i irányra váltott. Ezek a tapasztalatok igen hasonlóak voltak a Pannon-medencében megfigyelt MT válaszfüggvény viselkedéshez. Ezentúl a fejezet tartalmaz egy, a korábbi földtani eredmények alapján becsült LAB mélységekre vonatkozó összevetést is. Ezt alapul véve megállapítható, hogy a geotermikus és szeizmológiai LAB meghatározások mélyebbek az új eLAB becsléseknél, addig a korábbi eLAB értékek igen hasonlóak az általunk készített új eLAB becslésekhez.

A dolgozat utolsó 4.4.-es fejezete a Nógrád-Gömör vulkáni területen általam vezetett, jelenleg is folyamatban levő MT kutatás terepmunkájának tervezésébe és kivitelezésébe nyújt betekintést (Rubóczki et al. 2025). Ebben a méréstervezés fő szempontjait ismertetem egy valós példán keresztül, figyelembe véve a geológiai célt, ami egy regionális kiterjedésű, a litoszféra mélységét elérő 3D MT feldolgozásra alkalmas új adatrendszer előállítása volt.

Tézisek

A doktori dolgozatomban bemutatott új tudományos eredmények a Rubóczki et al. (2024a, 2024b, 2025) és Novák et al. (2024) publikációkban jelentek meg, ezek mindegyike több szerző együttes munkájának gyümölcse, szerzőtársaim útmutatása és hathatós szakmai támogatása nélkül ezek a cikkek nem valósulhattak volna meg. Az általam végzett munkához kapcsolódó eredményeket összefoglaló téziseim az alábbiakban olvashatók.

I. Új eLAB térképek készítése a Pannon-medencében

Elkészítettem a Pannon-medence új elektromos litoszféra-asztenoszféra határ (eLAB) mélységtérképét a LitH₂Oscope MT állomáshálózat és a korábbi archív, egyben jó minőségű hosszúperiódusú MT mérések bevonásával. Az MT állomások adatfeldolgozása azonos számú réteget tartalmazó, 1D inverziós eljáráson alapult. Az eLAB mélységét az 1D inverziós modell legalsó, alacsony-ellenállású rétegének tetejeként azonosítottam az egyes MT állomásokon. Ezen mélységeket felhasználva, térbeli interpolációval állítottam elő a Pannon-medence eLAB mélységtérképét. A vizsgálat során létrehozott új MT adatrendszer homogén térbeli eloszlása és a feldolgozás során alkalmazott egységes módszertan jelentősen növelte az eLAB mélységtérkép megbízhatóságát a korábbi eLAB meghatározásokhoz képest. A Pannon-medence litoszféravastagsága az Alföldön a legvékonyabb, 60–100 km és egyben a legmegbízhatóbb, a Dél-Dunántúlon az eLAB biztosan meghaladja a 100 km mélységet, míg a Dunántúli- és Északi-középhegységben 100 km körüli mélységre tehető.

II. A Pannon-medence első geoelektromos szerkezeti térképének elkészítése

A LitH₂Oscope MT állomáshálózat adatrendszere alapján, a válaszfüggvényből számított fáziszenzor-ellipszisek és indukciós vektorok együttes ábrázolásával készítettem el a Pannon-medence geoelektromos szerkezeti térképét. Ezek a szerkezeti csapásirányokat és a jó elektromos vezetőképességgel rendelkező térrészek irányát jelzik a Pannon-medencében. Rövid periódusokon (100 s) ezek az ismert vastag üledékes medencék irányába mutatnak, mint a Makói-árok, Békési- és Zala-medence. 1000 s periódusidő körül, a Pannon-medence legjelentősebb szerkezeti eleme a Közép-Magyarországi-nyírózóna is kirajzolódik, bizonyítva, hogy a geológiai szerkezet elektromos vezetőképessége nagyobb környezeténél. A leghosszabb periódusokon egy északi irányú térrész

rajzolódik ki, mely valószínűleg regionálisan jól vezető zónák (pl. egykori vulkáni területek) vagy az LAB mélységváltozásának következménye.

III. Geokémiai eredmények és MT mérések összevetési módszerének kidolgozása

Kidolgoztam egy módszert a geokémia által egy adott területre számított 1D kőzetoszlop ellenállásmodell és az ott készült terepi MT mérés összehasonlítására. Ennek során 1D MT modellt készítettem, beépítve abba a kőzetoszlop ellenállás-mélységeloszlását a Conrad-felület feltételezett mélységétől kezdődően, mivel ez a geokémiai kőzetoszlopmodellek kezdeti mélysége. A felszín és a Conrad-felület közötti térrész kitöltéséhez pedig felhasználtam a valós MT szondázás inverziós modelljét úgy, hogy annak egy réteghatárát rögzítettem a geokémiai számításon alapuló modell felső határának mélységéhez. Így egy olyan ellenállás-mélység modell adódik, amely a felszíntől kezdődik, tartalmazza a terepi MT mérés inverziós modelljének egy részét, mégis a közeg geokémiai paramétereinek hatását is figyelembe veszi. A módszert a Pannon LitH₂Oscope MT állomáshálózat 3 mérése esetében is alkalmaztam lokális geológiai vizsgálat céljából.

IV. A kőzetek fajlagos ellenállását befolyásoló geokémiai tényezők a Pannon-medencében

A terepi MT mérések és a geokémiai kőzetoszlopok azonos területre vonatkozó összevetésével kimutattam, hogy a litoszféra fajlagos ellenállását, a hőmérsékleten túl, elsődlegesen a fluidum mennyisége befolyásolja. Vizsgálataim alapján a Pannon-medence köpenylitoszférájában, valamint az asztenoszférában 0,5–1 térfogatszázalék fluidum jelenléte valószínűsíthető. Eredményeim kizárják a teljesen száraz, vagyis szerkezeti-hidroxil és olvadékmentes kőzetmodellek lehetőségét. Az MT mérésekkel ugyanakkor, nem lehetséges az egyes fluidumtípusok egymástól való elkülönítése, mivel ezek mind a vezetőképesség növekedésének irányába hatnak. A kőzetoszlop ellenállás-mélység profilok azt jelzik, hogy az eLAB nem egy hirtelen, hanem folyamatosan, több (tíz) kilométeres tartományban monoton csökkenő ellenállástrenddel jellemezhető.

V. 3D MT numerikus modellkörnyezet megalkotása

Létrehoztam egy 3D MT mérések frekvenciatartományú szimulációjára alkalmas modellkörnyezetet a COMSOL Multiphysics végeses elemes szoftverben. A 3D MT modell olyan rugalmas paraméterezést

tesz lehetővé, mint a közeg fajlagos ellenállásának anizotróp módon történő definiálása, közel tetszőleges felbontású 3D ellenállás- és mágneses permeabilitás eloszlás megadása, sőt EM forrásjelenségek is tesztelhetők benne, melyekre a legtöbb 3D MT modell nem képes. A modell készítése során megvalósítottam a 3D MT modell verifikációját, tanulmányoztam a peremfeltételek kérdését, valamint több szorosan összefüggő beállítást, mint a végeselemes felbontás, a közeg fajlagos ellenállása és a szimuláció periódusidő tartománya közötti egymásrahatást. Az általam fejlesztett 3D MT modellkörnyezet az MT mérések elméletéhez köthető kérdések tudományos vizsgálatához kínál egy hatékony eszközt.

VI. Nyírózóna vizsgálata a 3D MT modellben

A 3D MT modell lehetőségeit, egy háromréteges alapmodellbe ágyazott, csapásirányban anizotróp, környezetéhez képest alacsony fajlagos ellenállású anomália ($10\ \Omega\text{m}$) révén teszteltem. A vizsgálat földtani jelentőségét a Pannon-medence geoelektromos szerkezeti térképén látott Közép-Magyarországi-nyírózóna adta. Az elektromágneses (EM) tér nyírózóna csapásirányában készített ábrázolásai rámutattak, hogy az alacsony ellenállású térrész környezetében az EM tér jellemzői erősen torzulhatnak. A modellben található alacsony ellenállású térrészek közötti közvetlen kapcsolódás és azok MT mérésektől való távolsága erősen befolyásolta a szintetikus MT szondázások görbéit. Az ellenállás-anomália jellemzően a statikus-eltoláshoz hasonló torzulásokat eredményezett. A vizsgálat egyúttal átfogóan demonstrálta a fejlesztett 3D MT modell képességeit és az abban rejlő modellezési lehetőségeket.

VII. Az eLAB mélysége az Erdélyi-medencében

A Topo-Transylvania MT adatrendszer feldolgozása és értelmezése során meghatároztuk az Erdélyi-medence eLAB mélységét, összesen 8 db mérési helyen. Az 1D MT feldolgozás eredményei azt mutatták, hogy az eLAB mélysége az Alföld délkeleti részén $\sim 60\text{ km}$, ami az Erdélyi-medence felé folyamatosan $\sim 120\text{ km}$ -ig nő, majd a Kárpátkanyar felé gyorsan csökken, elérve a $\sim 90\text{ km}$ -t a Csomád térségében. Ennek háttérében a Kárpátok irányában a litoszféra vastagságának várható növekedése és a Kárpátkanyar térségének komplex geológiai szerkezete áll. Ezen eLAB meghatározások konzisztensek voltak a korábbi, Erdélyi-medencére vonatkozó LAB becslésekkel

(például archív MT adatok vagy szeizmikus anizotrópia alapján). A geotermikus és a szeizmológiai LAB meghatározások, jellemzően több 10 km-el vastagabb becslést adtak, ám ez korántsem szokatlan a fanerozoikumi Európai platformon. A konzisztens, új eLAB meghatározás bizonyítja a Topo-Transylvania MT adatrendszer és az alkalmazott 1D szemlélet megbízhatóságát.

Hivatkozások

Ádám A. & Weszttergom V. (2001): An attempt to map the depth of the electrical asthenosphere by deep magnetotelluric measurements in the Pannonian Basin (Hungary). *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 44:167–1992.

Berdichevsky M.N. & Dimitriev V.I. (2008): *Models and Methods of Magnetotellurics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77814-1>

Chave A.D. & Jones A.G. (2012): *The Magnetotelluric Method*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>

Everett M.E. & Chave A.D. (2019): On the physical principles underlying electromagnetic induction. *Geophysics*, 84(5), W21–W32. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0232.1>

Kovács I.J., Liptai N., Koptev A., Cloetingh S., Lange T.P., Maţenco L., Szakács A., Radulian M., Berkesi M., Patkó L., Molnár G., Novák A., Weszttergom V., Szabó C., Fancsik T. (2021): The ‘pargasosphere’ hypothesis: Looking at global plate tectonics from a new perspective. *Global and Planetary Change*, 204, 103547. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103547>

Matenco L. (2018): Topo-Transylvania: a multidisciplinary Earth science initiative in Central Europe to tackle local and global challenges. *Acta Geodaetica et Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0234-z>, 2018.

Patkó L., Novák A., Klébesz R., Liptai N., Lange T.P., Molnár G., Csontos L., Weszttergom V., Kovács I.J., Szabó Cs. (2021): Effect of metasomatism on the electrical resistivity of the lithospheric mantle – An integrated research using magnetotelluric sounding and xenoliths beneath the Nógrád-Gömör Volcanic Field. *Global and Planetary Change*, 197, 103389. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103389>

Simpson F. & Bahr K. (2005): *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095>

Weaver J.T. (1994): *Mathematical Methods for Geo-Electromagnetic Induction* (1st ed.). Research Studies Press Ltd.

A dolgozat eredményei az alábbi folyóiratcikkeken alapulnak

Novák A., Rubóczki T., Wesztargom V., Radulian M., Szakács A., Molnár C., Kovács I.J. (2024): Lithospheric scale cross-section through the Transylvanian Basin: A joint geophysical and geological survey. *Geologica Carpathica*, 75(3). <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.2024.11>

Rubóczki T., Novák A., Liptai N., Porkoláb K., Molnár C., Galsa A., Molnár G., Wesztargom V., Kovács I.J. (2024a): The Pannon LitH₂Oscope magnetotelluric array in the Pannonian Basin. *Acta Geodaetica et Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00434-1>

Rubóczki T., Galsa A., Novák A., Prácser E. (2024b): 3D Magnetotellurikus numerikus modell fejlesztése. *Magyar Geofizika*.

Rubóczki T., Kővágó Á., Molnár C., Vozár J., Patkó L. (2025): Magnetotelluric field campaign in the Nógrád-Gömör Volcanic Field (Northern Pannonian Basin). *Geophysical Observatory Reports*.