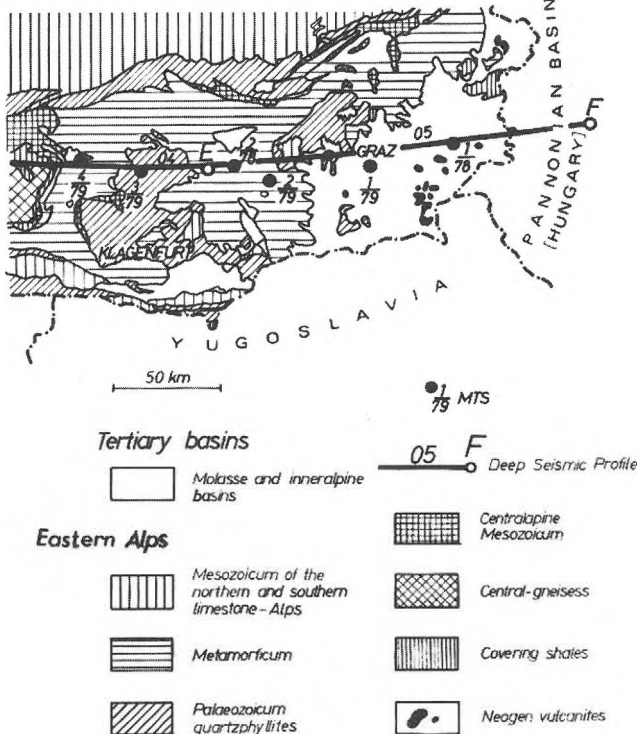


A Keleti-Alpokban végzett magnetotellurikus mérések története

ÁDÁM ANTAL, VERŐ JÓZSEF

Bevezetés

1977-ben az Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizika Tanszékének, személyesen STEGENA Lajos professzornak a kezdeményezésére az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetében találkoztunk a Bécsi Egyetem Geofizikai Intézetének vezetőjével, Rudolf GUTDEUTSCH professzorral. A kötetlen megbeszélés célja a két intézmény közötti együttműködés formáinak kialakítása volt. Itt merült fel többek között annak a gondolata, hogy a bécsi kollégák szeizmikus és szeizmológiai vizsgálatainak kiegészítésére célszerű lenne elektromágneses mélyszondázásokat végezni a Keleti-Alpok területén. Mindaddig magnetotellurikus (MT) méréseket csak nagyon kevés esetben végeztek hegyvidéken, Ausztriában pedig a módszer ismeretlen volt. Ezért a mérések módszereit is ki kellett alakítani. Megállapodás született, hogy a következő évben végzendő mérések előkészítésére még az 1977-es év folyamán az osztrák és a magyar fél közös terepbejárást tart egy K–Ny irányú szelvény pontjainak kiválasztására. Ez a szelvény Ausztria déli határvidékén, az alpi kéregkutató szeizmikus hossz-szelvény mentén húzódott (1. ábra).



1. ábra. Magnetotellurikus szondázási pontok helye a Geologische Bundesanstalt földtani térképén és az Alpi Szeizmikus Kéregszelvény [ÁDÁM et al. 1981]

Fig. 1. Magnetotelluric sounding sites on the geological map of the Geologische Bundesanstalt with the Alpine Seismic Crustal Profile [ÁDÁM et al. 1981]

Magyar részről ÁDÁM Antal és WALLNER Ákos, osztrák részről Gerard DUMA (a Bundesanstalt für Meteorologie und Geodynamik kutatója) és részben Wolfgang SEIBERL vett részt a terepbejáráásban. Ennek során kapcsolatfelvétel történt a vizsgálatokban érdekelt leobeni egyetemen is, elsősorban Karl WEBER professzorral.

1. Hosszú periódusú MT mérések a Keleti-Alpokban

1a. MT mérések az alpi kéregkutató szeizmikus szelvény mentén

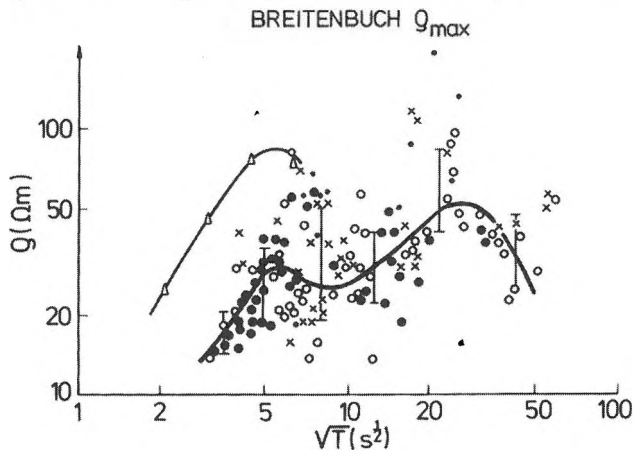
Az első mérésekre 1978-ban került sor, a csoport tagjai MÁRCZ Ferenc, MÁRCZ Győző és WALLNER Ákos voltak. A magyar csoportot elkísérte Gerard DUMA is, aki az egyes pontok helyét előkészítette, és szállásról is gondoskodott. A szállások általában hegyi parasztgazdaságokban voltak, sok helyen a falusi turizmusra akkoriban berendezkedő gazdáknál. A mérések alatt a költségeket kormányközi megállapodás alapján az osztrák fél fedezte, különböző, általában elég szerény keretben, úgyhogy az étellemezésről majdnem mindig hazuról magunkkal vitt konzervekkel gondoskodtunk. Két pontban történtek az első mérések: az egyik közel a magyar határhoz, a Grazi-medencében (Rehgraben, Burgenland), a másik Sankt Georgenben volt — az utóbbihoz a szállást Obdachban kapták. A méréshez négycsatornás galvanométeres analóg regisztrálóműszert, mágneses érzékelőként pedig a GGKI-ben kifejlesztett MTV-2 mágneses variométert használtuk. Az elektromos csatornákhöz nem polarizálódó elektródákról vettük a tellurikus feszültséget, a terepviszonyok megengedte terítési hossz (és irány) mellett, de általában 200 m volt a terítés hossza. Hamarosan kialakult a mérések időbeosztása is: egy-egy ponton nagyjából egy hétig maradtunk, reggel 5 vagy 6 órától mértünk déli 14-15 óráig „gyors”, percnként 20 mm-es papírsebességgel, ennek végén érzéketlenebb fokozatba kapcsolunk, a papírsebességet is 6 mm/percre csökkentettük, és a következő reggelig magára is hagyhattuk az állomást. Természetesen hálózati áramra vagy aggregátorokra volt szükségünk, ennek megfelelően benzint kellett biztosítanunk, esténként pedig az aznapi filmeket rögtön elő is hívtuk, így a pont minőségét folyamatosan ellenőriztük.

A mérések eredményesek voltak, meg lehetett határozni a szondázási görbéket, illetve ezek alapján az egydimenziós modelleket, amelyek mindkét pontban jól vezető réteget jeleztek a kéregben. A végleges értelmezés természetesen csak az egész szelvény mérése és feldolgozása után vált lehetségessé. Az osztrák és a magyar résztvevők következő soproni megbeszélésén erről a folytatásról megállapodás született, és 1979-re már négy újabb pont mérését irányozták elő az alpi hossz-szelvény mentén.

Az 1979. évi, most már négyhetes mérési időszakban

Breitenbuch, Oberpreitenegg, Lassnitz és Lasaberg pontokban történt mérés. Ezúttal ÁDÁM Antal, GAYER Ferenc, VERŐ József és WALLNER Ákos vett részt a mérésben.

Breitenbuch Stájerország keleti szélén, a Grazi-medence peremén fekszik. Ez a pont azért is emlékezetes, mert egyedülállóan furcsa zavarokat észleltünk, amelyet később egy ismeretlen zavarforrás közelterével sikerült azonosítanunk. A különös az volt, hogy ez a zavar csak az egyik komponenspárban jelentkezett, a másik komponenspárban nyoma sem volt (2. ábra) [ÁDÁM et al. 1986a].



2. ábra. Rhomax magnetotellurikus szondázási görbe a különböző súlyú (●=8, ○=4, ×=2, * =1) látszólagos fajlagos ellenállás értékekkel és a zajimpulzusokból számított látszólagos fajlagos ellenállás értékekkel (Δ) [ÁDÁM et al. 1980 nyomán]

Fig. 2. Rhomax magnetotelluric sounding curve at the Breitenbuch MT site with the apparent resistivities obtained from noise-impulses using the MT processing method. Δ: noise; ●, ○, ×, *: MT Rho values with weight 8, 4, 2 and 1, respectively [after ÁDÁM et al. 1980]

Az első valóban magashegységi pontunk Oberpreiteneggben, a Pack-hágónál volt, mintegy 1000 m-rel a tengerszint, és 500 méterrel a völgytalp felett. Ennek megfelelően a pontot csak egy meredek hegyoldal ellaposodó részén lehetett telepítenünk, ahol először a tehének villanypásztorát és a legelőhöz vezető utat kellett áttelepítenünk a gazda segítségével, ennek ellenére a topográfia hatását nem lehetett elhanyagolni. A lejtő menti komponensben az irodalmi példák alapján látszólagos jól vezető rétegeket vártunk. Ez a jelenség az ún. „edge-effect”. Hasonló jelenséget észlelték a Karakumban, a Kopet-dag hegység közelében.

Lassnitz a Metnitz–Strassburg–St. Veit törési zónában fekszik. Ennek közvetlen bizonyítéka volt az, hogy egy déln, éppen a műszer hitelesítése közben, a galvanométer erősen rezegni kezdett. A rádió szinte azonnal bementa, hogy egy enyhe helyi földrengés volt ebben az időpontban. Ez a pont addig még alig tapasztalt mértékben torzult elektromos térű, a két egymásra merőleges komponensben a látszólagos fajlagos ellenállás három nagyságrenddel különbözött a legkisebb mért periódusnál. Ez azt is jelentette, hogy a mérések feldolgozása rendkívül nehéz volt, az adatok elfogadásához szokásosan használt 0,9-es koherenciafeltétel helyett 0,6-os, máshol sehol sem alkalmazott feltételt kellett választanunk ahhoz, hogy egyáltalán adatokat kapjunk. Hasonló jelenséget csupán Soprontól keletre, a Kópházi törés közelében, a Kőhegy oldalában

tapasztaltunk. Erre az ausztriai törésvonalra jellemző a nagy hőáram (mintegy 100 mW/m²), amelyet a törésen keresztül felszínre lépő konvektív hőáramnak tulajdonítanak. A környéken egyébként ércbányák működtek, többek között arzéntermelés is folyt, a pletykák szerint felettébb sok mérgezőes halálesetet vonva maga után. A maximális impedancia iránya merőleges a törésnek a tektonikai térképen is ábrázolt irányára.

Lasaberg jóval nyugatabbra fekszik, az Alacsony-Tauern peremén, Tamsweg közelében. A szondázási görbék itt rendkívül meredeken, folyamatosan csökkenő látszólagos ellenállást jeleznek.

Amint látható, ennek a második sorozatnak a pontjai már nagyon erősen anizotrop és változatos szondázási görbéket adtak, esetenként a topográfiából adódó torzulásokkal terhelve. Ennek ellenére az 1. táblázat szerint majdnem mindegyik pontban 5,5–9 km között jól vezető képződmény jelentkezett, amelyet a Dunántúli Vezetőképességi Anómália értelmezésével egybevetve próbáltunk magyarázni, a kristályos kőzetek közé ékelődő grafitos palát feltételezve.

Állomás	Mélység (km)	
Rehgraben (1/78)	26 ± 6	162 ± 15
Breitenbuch (1/79)	9 ± 1	37 ± 2,5
Oberpreitenegg (2/29)	7,5 ± 0,6	35 ± 3,5
St. Georgen (2/78)	32 ± 8	
Lassnitz (3/79)	5,5 ± 1,2	
Lasaberg (4/79)	8,5 ± 1	

1. táblázat. A jólvezetőnek ρ_{\min} görbék alapján 1D modellel számított mélysége a mérések periódusstartományában

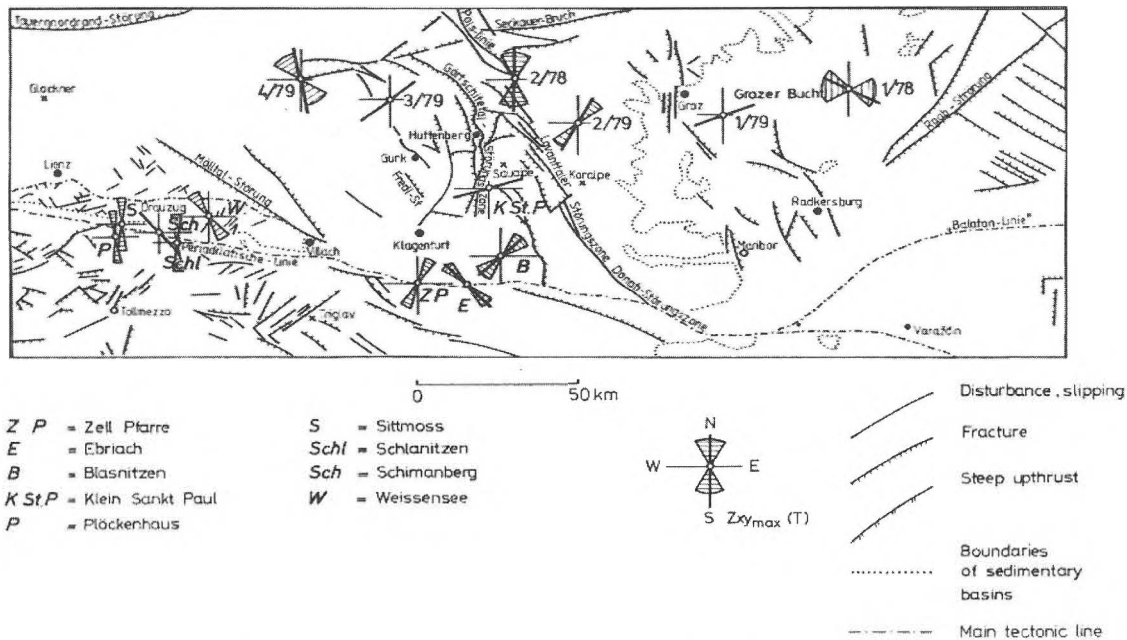
A két mérési sorozat eredményeiről 1980-ban egy összefoglaló magyarul [ÁDÁM et al. 1980], majd pedig egy angol nyelvű tanulmány jelent meg a Journal of Geophysicsben [ÁDÁM et al. 1981]. Az erre kapott számos hivatkozás jelzi, hogy a mérések a nemzetközi tudományos közösség érdeklődését is felkeltették.

1b. MT mérések a Periadriai vonal mentén

A következő mérésekre 1981-ben került sor ÁDÁM Antal, TÚRI János, VERŐ József és WALLNER Ákos részvételével. Két mérési pont ekkor a Periadriai-vonal (3. ábra) mentén, a Karavankák északi oldalán volt, közel a jugoszláv, ma szlovén határhoz, és házigazdáink között is többségben voltak a szlovének. A pontok a következők: Ebriach, Blasnitzen, Klein St. Paul (valamivel északabbra, már metamorf kőzeten), és egy pont az Északi-Mészkö-Alpokban kísérleti jelleggel: Gartenweg. A két első pont, Ebriach és Blasnitzen mészkőfennsíkban fekszik, néhány méteres laza lejtőüledékekkel fedve, topográfiaiailag a hegyoldal ellaposodó részén, ahol egy-egy parasztgazdaság még éppen elfért. Mindkét helyen a mérési hely körül is számos patak csörgedezett. Ebriach mellett egy mély hasadék nyúlik a Karavankákba, ezen hasadék mentén kerülhetett a felszínre az az ultrabázikus kőzettömeg, amelyet a mérések idején még fejtettek is. Erre még visszatérünk az AMT mérésekkel kapcsolatban. Az itteni szélsőérték-szondázási görbék ennek megfelelően ellentétes tendenciájúak, a maximum-görbe emelkedik, a minimum-görbe csökken. Az utóbbi határozottan utal valamilyen jól vezető képződmény előfordulására. Itt is és Blasnitzenben is 10–20 km közötti mélységben jelentkezik ez a jólvezető, és

0 km közötti mélységben jelentkezik ez a jólvezető, és még a távolabbi Klein St. Paulban is hasonló mélységben gyanítható. A maximális látszólagos fajlagos ellenálláshoz tartozó irány 45°-os szöget zár be a Periadriai vonal itteni szakaszával.

Klein St. Paulban az említett csökkenés már kevésbé határozott, ami arra utalhat, hogy ez a pont lényegesen távolabb van a szondázások eredményét meghatározó tektonikai zónától.



3. ábra. A magnetotellurikus impedancia maximális értékeinek (Z_{\max}) iránya és periódussal (T) való változása a Keleti-Alpokban TOLLMAN tektonikai térképén [ÁDÁM et al. 1986a]

Fig. 3. TOLLMAN's tectonic map of the Eastern Alps and the directions of maxima of the magnetotelluric impedances (Z_{\max}) together with their change as a function of the period (T) [ÁDÁM et al. 1986a]

A gartenwegi pont mérésére abból a megfontolásból került sor, hogy esetleg ki lehet mutatni az Északi-Mészkö-Alpok alatt a flis zónát, amelyre a feltevések szerint a mészkő rátalódott. Ez a mérés azonban nem érte el a kitűzött célt, egyrészt a rendkívül kedvezőtlen időjárás miatt — az egész mérés alatt szakadó eső okozott nehézségeket — másrészt elég nagy volt a zajszint, különösen az akkor éppen kicsi geomágneses tevékenységhez képest, de az is lehet, hogy a periódustartományunk nem fedte le a flis kimutatására alkalmas sávot. Még az is elképzelhető, hogy a flis ezen a helyen már kiemelődött.

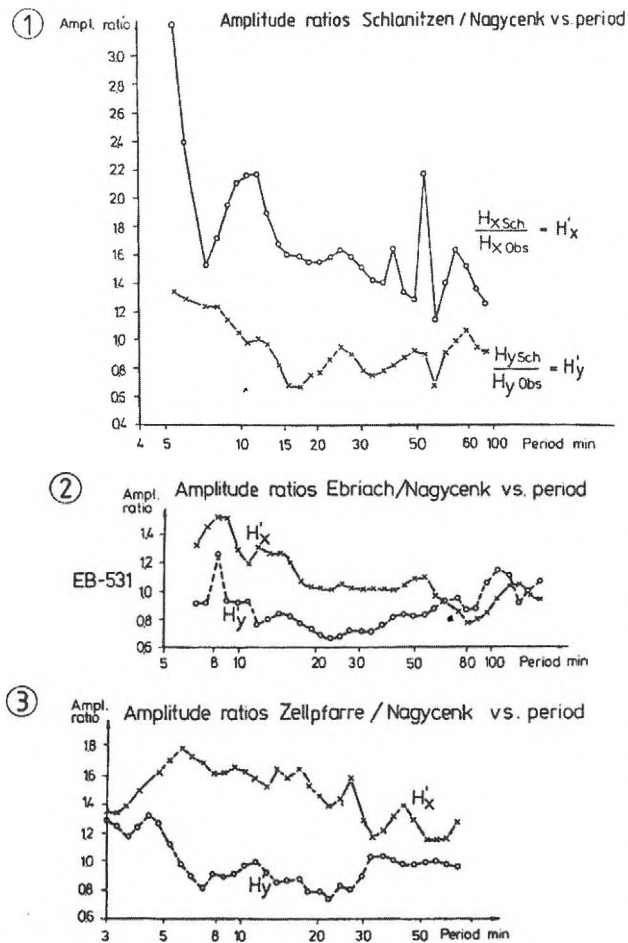
A három mérési sorozat eredményeit az osztrák és magyar résztvevők 1981-ben alaposan kiértékeltek. Arra megállapításra jutottunk, hogy a Periadriai vonal mentén kívánatos lenne még néhány mérést végezni, elsősorban annak nyugatabbi részén, a Gail-völgyi-Alpokban. Az utolsó hosszú periódusú MT mérésre 1983-ban került sor.

A megbeszélés alapján 1983-ban MÁRCZ Győző, VERŐ József és WALLNER Ákos (osztrák részről ez alkalommal Josef BERGER segítségével) végzett újabb méréseket. Pontjaik a következők voltak: Schlanitzen, Schimanberg, Sittmoos, Weissensee, Plöckenhaus és Zell Pfarre, közöttük néhány helyen rövidebb ideig tartó, kiegészítő jellegű mérés folyt csupán.

Schlanitzenben egy, a Periadriai vonalon fekvő pontban addig kipróbálatlan módszerű kísérleti mérésre is sor került GUTDEUTSCH professzor ötlete nyomán. Az ugyancsak meredek hegyoldal ellaposodó részén fekvő ponttól néhány km-re, de a völgy szemben fekvő északi oldalán, Schimanbergben ugyancsak végeztünk tellurikus mérést. Az egész

idő alatt ismét csak szakadó esőben elég nehéz volt elfogadható anyagot gyűjteni. Ennek ellenére kiderült, hogy a tektonikai vonal két oldalán annyira eltérnek egymástól a rövid periódusú változások, hogy egyeztetésük csak az időjelek alapján volt lehetséges. A Schimanberg pontot nem a néhány km-re fekvő Schlanitzen mágneses regisztrátumainak felhasználásával lehetett értékelni, hanem a mintegy 200 km-re fekvő Nagycenki Observatóriummal. Az így kapott szondázási görbék az egész periódussávban meredeken csökkenő tendenciát mutatnak (100 ohmm-ről néhány ohmm-re), evvel jelzik a Gail-völgyi-Alpokban lévő grafitos palák rendkívül jó vezetőképességét. Ezeket légi elektromágneses mérésekkel, valamint földtani térképezéssel is határozottan kimutatták K–Ny irányú telérek formájában (1. részletesebben a 2. fejezetben). Az is ehhez kapcsolódik, hogy a Keleti-Alpok legpusztítóbb földrengése 1346-ban 10-es intenzitással éppen ezen a területen volt, és akkor a Villach melletti Dobratsch leszakadt oldala eltorlaszolta a Gail folyót és 17 falut elpusztítottak a lezúduló hatalmas közettömegek. Emellett Villach környékén számos melegforrás is ismert (pl. Warmbad Villach). Ilyen mérvű torzulást egyetlen másik állomáson tapasztaltunk, az ugyancsak tektonikailag zavart, földrengéses területen fekvő Bakonybélben, a Dunántúli Vezetőképességi Anomália területén. Egyébként is ezekben a pontokban a néhány perces periódusú mágneses változások az észak-déli komponensben akár kétszeres nagyságúak is voltak a Nagycenki Observatórium megfelelő komponenséhez viszonyítva (4. ábra). Ilyen mérvű mágnesestorzulást csak a Himalájában észleltek, és egyértelmű, hogy oka a földi

áramok csatornázása a jól vezető képződmény kialakította csatornában.



4. ábra. A horizontális mágneses komponensek amplitúdói időbeli változásainak hányadosa a Nagycenk melletti obszervatóriumban mért megfelelő értékekre vonatkoztatva 3 kelet-alpi pontban

Fig. 4. Amplitude ratios of the time variations of the horizontal magnetic field components measured at three Alpine sites and referred to those in the Nagycenk observatory

Különleges tapasztalatokat gyűjtöttünk az olasz határon fekvő Plöckenhaus pontban is. Ez volt legmagasabb, 1500 m-es magasság körül fekvő pontunk. Olyan nagy volt a lélegektromos térből eredő elektromos zavar, hogy a mérés lehetetlenné vált, a műszerekből sok centiméteres szikrák pattantak ki a szinte állandó zivatarok és villám-kisülések következtében, egyszerűen nem volt kellőképpen nyugodt szakasz a regisztrátumokon.

Mulatságos eset történt Sitmoosban. Éppen egy hidegetörés alkalmával kezdtük felépíteni a pontot, de nem tudtuk befejezni, mert BERGER kolléga Villachba érkezett vonattal, onnan nekünk kellett kocsival hazavinnünk. Másnap reggel az egész éjjel szakadó eső, illetve reggel már havas eső a lakókocsi elősátrán vagy vödörnyi vizet hozott össze. BERGER ez alá az előtető alá állt, közben MÁRCZ Győző a sátor előtt cserélte át ruháját a terepire. BERGER barátunk ujjával megbökte a sátorlapot, erre annak egész tartalma Győző nyakába zúdult. Majdnem a kocsi tetejére ugrott, mehetett haza száraz ruháért.

Sitmoos szondázási görbéi ugyancsak jól jelzik a Periadriai vonalat, ellentétes tendenciával a két kom-

ponenspárban. Megjegyezzük, hasonló tendenciát észleltünk a Dunántúli Vezetőképességi Anomália déli kiékelődésénél a Balaton-felvidéken, pl. Zánka és Aszód pontban.

Weissensee Ausztria legmagasabban fekvő nagy tava mellett, a Drauzug dolomitján fekszik, viszonylag távol a Periadriai zónától, így ennek hatása már alig észlelhető a szondázási görbéken, amelyeknek anizotrópiája a látszólagos fajlagos ellenállásban mindössze egy nagyságrend. Az ellenállásértékek nagyok, 100–1000 ohmm közöttiek, a dolomitnak megfelelően.

Zell Pfarre az egyik legkülönlegesebb helyzetű pont volt, két, egymásra közel merőleges völgy találkozásánál, úgyhogy megközelítése csak egy rendkívül meredek úton volt lehetséges. Ez a pont jóval keletebbre, az előző pontok szelvényének végén fekszik, szintén a Periadriai vonal vezetőképesség-closzolásának hatása szabja meg a szondázási görbéket. Mindkét görbén megjelenik a csökkenő szakasz, jelezve a jólvezetőt.

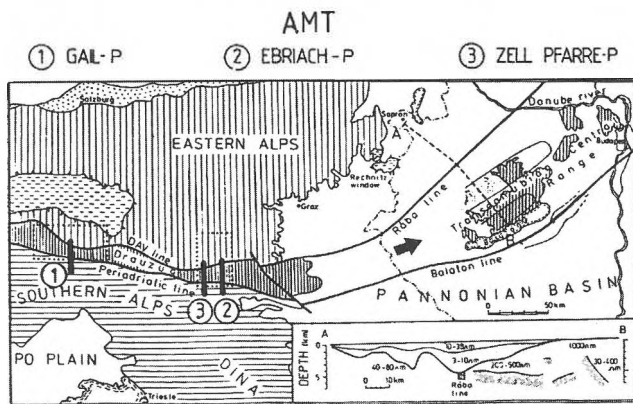
A Periadriai vonal mentén és környékén végzett mérések eredményeit ugyancsak a Journal of Geophysicsben [ÁDÁM et al. 1986b], illetve előzetesen a Magyar Geofizikában [ÁDÁM et al. 1984] foglaltuk össze. A cikk az osztrák és magyar résztvevők közös műve. Megállapítottuk, hogy a Periadriai vonal sajátos vezetőképesség-closzása, társulva a Gail-völgyi-Alpokban földtanilag is kimutatott paleozoós grafitos palák hatásával, valamennyi szóba jövő szondázási görbén csökkenő görbeágakat eredményezett. Ezek értelmezése egydimenziós MT modellezéssel történt. Amint az előzőekben már jeleztük, a jól vezető képződmény átlagos mélységére 10 és 20 km közötti értékeket kaptunk. A vonal mellett közvetlenül fekvő pontokban a maximum-görbék iránya közel merőleges a Periadriai vonalra, jelezve az abban történő áramcsatornázást K–Ny irányban. Erre a fentiekben az észak–déli mágneses komponens nagyságának jelentős növekedése révén már utaltunk (a normálisnak tekintett nagycenki adatokhoz képest).

2. AMT mérések a Keleti-Alpokban a Periadriai-vonal mentén

Közel egy évtizeden keresztül az Alpokban, a főként a Periadriai vonal mentén végzett magnetotellurikus mérések tapasztalata az volt, hogy a kéreg felső részén is jólvezető képződmények vannak, amelyeknek részletesebb kutatására az audio-magnetotellurikus (AMT) módszer alkalmazásnak látszik. A nyolcvanas évek közepére — finn együttműködésben — elkészült intézetünkben egy ötcsatornás real-time AMT műszer. Ez 4,1 Hz és 2300 Hz között 12 frekvencián mérni tudja a látszólagos fajlagos ellenállás és az impedancia fázisa szélső értékeit, valamint az indukciós vektor (tipper) reális és imaginárius komponensét valamennyi paraméternek az irányával együtt, tehát teljes értelmű MT adatfeldolgozást végez az EPROM-ba beégetett program segítségével.

E műszerrel 1986-ban kezdtük meg a kutatásainkat a Gail-völgyi-Alpokban (5. ábra, 1). Mivel ekkor még az AMT műszer digitális része nem működött kielégítően, a térváltozásokat 4,1, 7,3, 13, 23, 41 és 73 Hz-en regisztráltuk és a regisztrátumokat digitalizálás után a hagyományos magnetotellurikus programmal dolgoztuk fel. Tröpalachi bázissal egy közel É–D-i szelvény mentén mértünk a Gail folyó völgyéből kiindulva a Karni-Alpokon át az olasz

határig, majd a Gail-völgyi-Alpok déli szakaszán. Szelvényünk magában foglalta a hosszúperiódusú MT mérések két pontját, Schlanitzent és Schimanberget is. A mérési terület erősen tagolt. Az olasz határ közelében lévő 2. sz. pontunk 2000 m-es csúcsok között van. A Gail-völgyi-Alpok kristályos kőzetei K-Ny-i irányban elnyúlt grafitos kőzetlencséseket tartalmaznak, amelyek a felszínre is kibújnak, amint erre már utaltunk. Ezek felett mértük a legkisebb ellenállásértékeket ($\rho \approx 0,1 \Omega\text{m}$), és a legnagyobb anizotrópiát ($\rho_{\text{max}}/\rho_{\text{min}} \approx 100$). A szondázási görbék a Karni-Alpokban sokkal kiegyensúlyozottabbak voltak (pl. az 5-ös pontban), lényegesen kisebb anizotrópiával. 2D modellszámításunkkal a Karni-Alpokban elmélyülő jólvezető blokkokkal közelítettük meg a mérési adatokat, amelyek pontról pontra nagy változatosságot mutattak (6. ábra). A Magyar Geofizikában és a Physics of the Earth and Planetary Interiorban közölt, az első AMT mérésekről írt tanulmányainkban [ÁDÁM et al. 1988, 1990] nagy lelkesedéssel írtunk a grafitos palák (fekete palák) által okozott jólvezető anomáliákról, amelyek nagy hasonlóságot mutatnak a Dunántúli Vezetőképességi Anomália területén észleltekkkel. Így feltételeztük, hogy azok közös okra — paleozoós grafitos palákra — vezethetők vissza, amelyeknél a kis viszkozitású grafit a tektonikai zónákban akumulálódott. Csapásukat a Rhomin görbék jelölik ki.

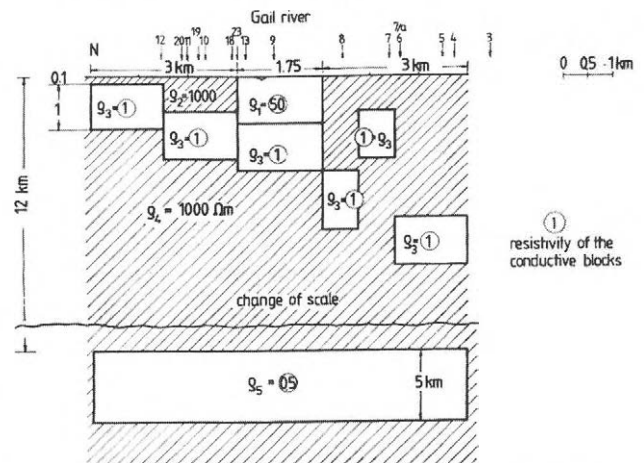


5. ábra. A Bakony–Drauzug Egység (BDV) tektonikai és földtani vázlata [HORVÁTH et al. (1987) után] az alpi audio-magnetotellurikus szelvényekkel és az ELGI dunántúli A–B (MK1) magnetotellurikus Rho szelvényével, amely az indukciós vektorok anomáliáit keresztezi [ÁDÁM et al. 1990]

Fig. 5. Tectonic and geological setting of the Bakony–Drauzug Unit (BDU) after HORVÁTH et al. [1987] with the AMT profiles and ELGI's magnetotelluric Rho section A–B (MK1) crossing the induction vector anomalies [ÁDÁM et al. 1990]

A következő AMT mérési sorozatra 1988-ban került sor Ebriach (lásd az MT mérések helyét) környékén a Karavankákban (l. az 5. ábrán 2-t). Ekkor már működött az AMT műszerünk digitális adatfeldolgozó része, azonban a zajszint a pontok jó részén a hegyekben annyira megnőtt, hogy csak regisztrálás után, skaláris feldolgozással tudtunk adatokat gyűjteni a látszólagos fajlagos ellenállás eloszlásáról. Így is sikerült a Karavankák változatos kőzeteinek fajlagos ellenállásáról jó áttekintést kapni. A mérési területünk közepén volt az Ebriach árok, a Periadriai vonal megfelelő szakasza. Ebben az árokban nagyellenállású intruzív (Eisenkappel gránit) és erupciós kőzetek (tonalit, diabáz) található. A paleozoós diabáz zöldpala sorozatot tört át,

amely a Karavankák északi láncát alkotja. Eisenkappel környéke ma is szeizmikusan aktív, tehát a Periadriai vonal mentén a tektonikai mozgás folytatódik.



6. ábra. A Gail-völgyben mért É–D-i AMT szelvény lépcsős geoelektromos modellje a kisellenállású grafitos blokkokkal és a mélyebb kéreganomáliával [ÁDÁM et al. 1990]

Fig. 6. Step-like 2D model for the graphitic blocks of low resistivity and deep crustal anomaly measured in a N–S profile in the Gail valley [ÁDÁM et al. 1990]

A Periadriai vonallal közel párhuzamos K-Ny-i irányban általában kisebb látszólagos fajlagos ellenállást mérünk, mint rá merőlegesen É–D-i irányban, míg az utóbbi, jelentős ellenállás-változással, jobban kijelölte az Ebriach árkot. A paleozoós kőzetek feltehetően itt is tartalmaznak grafitos palákat, mert az itt mért ellenállásértékek jóval kisebbek voltak, mint a mezozoós képződmények felett. Ennek ellenére, amint az az É–D-i mágneses térváltozások összehasonlításából is látszik — a Nagycenk melletti obszervatórium megfelelő adataira normálva — K-Ny-i irányú áramcsatornázás kisebb, mint a Gail-völgyi-Alpokban, ahol a grafitos palák szerepe egyértelműen kirajzolódott (4. ábra). A nagyobb ellenállásértékek a paleozoós képződmények felett északi irányúak, ami összefüggésbe hozható a területet mint áttolódásos zónát ért erőhatásokkal [ÁDÁM, DUMA 1990].

A Karavankák áttolódásos szerkezetét a gravitációs mérések is jelzik: STEINHAUSEN et al. [1980] megállapítása szerint a Karavankáknak mint hegységnek nincs gyökere, tehát izosztatikusan nem kiegyensúlyozott terület.

Az AMT expedíció harmadik fázisára 1990-ben került sor a Periadriai vonal eddig vizsgált két szakasza között. A mérési pontokkal egy olyan szelvényt közelítettünk, amely mentén földtani térképezés mellett földmágneses mérések is voltak [STEINHAUSER et al. 1980]. Ez az ún. 3. AMT szelvény (l. az 5. ábrán 3-t) a Koschuta Hütte-től indul, keresztezi Zell Pfarre környékét — ahol egy MT mérése volt —, elhalad a Hochobir csúcsa mellett és a Drávánál lévő ún. Sattnitz konglomerátumnál fejeződik be. A szelvény mentén az Altkristallin blokkja egy keskeny zónába komprimálódott a Periadriai és a Dráva vonal közé és ezt 10 és 20 nT közötti pozitív mágneses anomália is jelzi.

A legkisebb ellenállásértékeket itt is a Periadriai vonal felett mértük. Ugyancsak itt kaptuk az indukciós vektorok legkisebb értékeit, tehát az erősen töredezett tektonika valamennyi AMT paraméterben jól kirajzolódott. Az

Altkristallin blokk látszólagos fajlagos ellenállása már nagyobb, de viszonylag jól elkülönül a Drávától északra lévő még nagyobb ellenállású konglomerátumtól. A Dráva is egy törési zónát követ ezen a területen, amelyet határozottan jeleznek az indukciós vektorok. A mérési eredményeket sajnálatos módon erősen zavarta a vasúthálózat 16 2/3 Hz-es frekvenciája és esetenként az 50 Hz-es hálózati frekvencia is, bár mindkét zavaró jelet analóg módon próbáltuk a berendezésünkben kiszűrni. A mérések sok tanulsággal szolgáltak az elektromágneses zavarok kutatásában, amelynek a 80-as években több tanulmányt is szenteltünk [ÁDÁM et al. 1986b].

Az Altkristallin mágneses anomáliája, párosulva az elektromos vezetőképesség megnövekedésével, arra utal, hogy a grafitos palákban vastartalmú ásvány, pl. magnetit is előfordul.

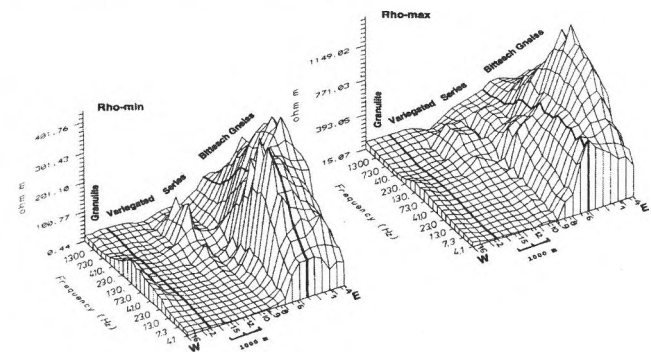
A mérési helyeket rendszerint az osztrák kollégák (G. DUMA vagy J. BERGER) jelölték ki és a méréseknel is többször segédkeztek, de alapvetően a méréseket HORVÁTH János elektromérnök és ÁDÁM Antal végezte. A mérési időt — a zajok miatt szükségessé vált — többszöri ismétlés gyakran megnövelte.

A Zell Pfarre környéki mérésekről a korábbi AMT méréseink eredményeit is összefoglaló tanulmányt írtunk [ÁDÁM et al. 1992]. Ebben a Periadriai vonal mentén észlelt és a tektonikával összefüggésben hozható vezetőképesség-eloszlást elemeztük ki.

1992-ben a Periadriai vonal menti utolsó AMT méréseinkkel visszatértünk a Gail-völgyi-Alpokba. 1986-ban a Gail-völgyi-Alpoknak csak a déli részén mértünk, ahol a földtani térkép, a légi EM és mágneses mérések — továbbá a saját tapasztalati megfigyeléseink — szerint is a grafitos blokkok a felszínen vannak, vagy mindössze vékony üledékes réteg borítja őket, amint ezt már írtuk. Célszerűnek látszott, hogy a korábbi méréseinket kiterjesszük É-D-i irányban — két szelvény mentén — egészen a Dráva északi partjáig, keresztezve a Drauzug permomezozoikumát, így a Keleti-Linzi-Dolomitokat, valamint a „Gailtaler Kristallin”-t. Ezeket a méréseket a Dolomitok völgyeiben igen tagolt topográfia mellett végeztük. Sok gondot okozott a megfelelő mérési helyek kiválasztása, mert a hegységet átszelő fő közlekedési utak mentén helyezték el az elektromos távvezetéseket transzformátorokkal együtt, amelyek biztos zavarforrást jelentettek, tehát ezektől a hegység belsejébe el kellett távolodni. Az egyik szelvény Kötschach-Mauthen és Oberdrauburg között (Gail I szelvény), míg a másik Greifenburg és Rattendorf között (Gail II szelvény) van. A zajok miatt a J. BERGER által eredetileg az utak mentén kijelölt mintegy 50 pont közül sokszoros ismétléssel alig sikerült néhányat bemérni. Új helyeket kellett keresni nehezen járható erdei utak mentén. Különösen a fázisértékeken látszik a zajokból adódó erős torzulás. Válogatott szondázási görbéket és 2D inverziós szelvényeket mutattunk be e méréseinkről az Acta Geod. Geoph. Hung.-be írt tanulmányunkban [ÁDÁM 1995]. A Drauzug dolomitjának fajlagos ellenállása olyan nagy, hogy a 2D szelvényeken csak logaritmikusan volt ábrázolható. Természetesen a szelvények déli szakaszán a „Gailtaler Kristallin” grafitos palái e mérések során is igen kis ellenállással tűntek ki. A Dolomitok alatt 2–3 km mélyen megkaptuk a jólvezető kristályos palákat.

3. MT mérések a Déli Cseh Masszívum területén

1992 őszén megkereste intézetünket K. ARIČ, a Bécsi Egyetem Meteorológiai és Geofizikai Tanszékének professzora, hogy a Déli Cseh Masszívumra irányuló komplex osztrák geofizikai projekt keretében egy szelvény mentén magnetotellurikus/audio-magnetotellurikus méréseket végezzünk a szeizmikus, mágneses, gravitációs és radiometrikus mérések kiegészítéseként. A mérési terület a közép-európai variszkuszi orogén erősen lepusztult maradványa volt, ahol a prekambriumi és paleozoós metamorf kőzeteket gránitintruziók járták át. Szelvényünk a Masszívum két nagyobb egysége, a nyugati Moldanubikum és a keleti Moravikum között az ún. Messern Arc szomszédságában volt. A földtani feladat a szelvény mentén annak a kérdésnek az eldöntése volt, hogy két nagyon hasonló gneisz — a „Moravian Bittesch Gneiss” és a „Moldanubian Dobra Gneiss” — hogyan kapcsolódik egymáshoz a felszínen őket elválasztó ún. „Variegated Series” és „Granulite” alatti szinklinális szerkezetben. A Messern (Bittesch Gneiss) és Rotweinsdorf (Granulite) közötti szelvény két végpontján végzett hosszuperiódusú MT mérések már 1992 őszén a szelvény mentén jelentős különbségeket jeleztek a fajlagos ellenállásban. Ezt megerősítették az ezeken a pontokon még 1992-ben mért AMT szondázások is és 1993-ban a részletes szelvény menti AMT mérések. A Bittesch Gneiss igen nagy fajlagos ellenállása után Ny felé haladva nagyszámú változásokat mértünk a Variegated Seriesben és a Granulite-on, feltehetően a geológia által is jelzett grafitos képződmények hatására (7. ábra). Az AMT mérések 2D inverziója kimutatta a szinklinálisszerű átmenetet a Bittesch Gneissből a Granulite és nyilvánvalóan — az eredeti feltevés szerint — Dobra Gneiss felé is. Az AMT fajlagosellenállás-eloszláshoz a szeizmikus felületelemek görbületei is jól illeszkedtek és ezáltal a két mérés jó összhangban lévő eredményeket hozott. Az indukciós vektorok is határozottan jelezték mind nagyságuk, mind irányuk változásával a Variegated Series jól vezető szerkezeit [ARIČ et al. 1997a, ARIČ et al. 1997b].



7. ábra. Rhomin és Rhomax AMT értékek eloszlása a Déli Cseh Masszívumban mért „Messern profil” mentén a frekvencia és a mérési helyek függvényében földtani formáció megadásával [ARIČ et al. 1997a]

Fig. 7. Distribution of Rhomin and Rhomax in the Southern Czech Massif along the Messern profile as a function of distance and of frequency (Hz). The surface boundaries of the three principal rock groups are shown by the bold lines [ARIČ et al. 1997a]

Az AMT mérések — ellentétben a Periadriai vonal men-

tén végzettekkel — a 16 2/3 Hz-es vasúttól távol, kivételesen zavartalan körülmények között folytak, egyben ausztriai MT és AMT méréseink kedvező befejezését jelentették. Az eredményeket a First Breakben jelentettük meg [ARIČ et al. 1997a].

4. A mérések eredményei, tanulságai

A méréseknek voltak mind módszertani, mind földtani-geofizikai eredményei. A módszertani eredmények közül első helyen említjük a nagy szintkülönbségek mellett végzett mérések telepítési-értelmezési problémáját. Igyekezünk a méréseket lehetőleg olyan helyre telepíteni, ahol a mérőelektrodák közötti szintkülönbség nem volt túlságosan nagy. Természetesen előfordult, hogy ilyen telepítésre nem volt mód, mint pl. Lasabergben, az alpi szeizmikus hosszszelvény legnyugatibb pontján, az Alacsony-Tauern szélén. A topográfiai hatást a nemzetközi irodalomban található modellezések alapján, de saját vizsgálatainkkal is alátámasztva próbáltuk megbecsülni. A jelentősebb anomáliák esetében tekintettel voltunk arra, hogy a többi, közeli mérési pontban hasonló mélységű anomália megjelenik-e. Azt is tekintetbe kellett vennünk, hogy még a viszonylag lapos mérési pontok esetében is a közeli domborzat (völgyfenék, illetve hegyvonulat) oldalhatása is fellép. Az a megnyugtató, hogy általában az egymáshoz közel fekvő pontokban (pl. a Periadriai vonal mentén) a szondázási görbék, illetve a belőlük számított modellek eléggé hasonlóak.

A másik terület, ahol érdekes megfigyeléseink voltak, az az elektromágneses zajok különös típusainak fellépése. Erről összefoglaló tanulmányt jelentettünk meg [ÁDÁM et al. 1986b]. Az ebben leírt egyik sajátos zajtípust Breitenbuchhal kapcsolatban már említettük. Eddigi mérési anyagunkban ez volt az egyetlen olyan eset, amikor ismeretlen zajforrás közelzónájára kellett gyanakodnunk. A másik megállapításunk az volt, hogy az osztrák vasutak 16 2/3 Hz-es frekvenciájú tápárama szinte mindenütt megjelenik. Különösen nehéz problémát okozott ez a zaj Klein St. Paul esetében, mert eléggé közel van egy vasútvonal, ahonnan néha impulzusszerűen jelentkezett ilyen zaj — bár az is lehet, hogy ennek forrása egy közeli kőbánya volt. Ez a frekvencia természetesen leginkább az AMT méréseket zavarta, méghozzá a közeli frekvenciákon (13 és 23 Hz-en).

A hegyvidékeken a nagyellenállású kőzeteket borító nagyon vékony, esetleg csak 1–2 m vastag mállott réteg miatt a zajok sokkal messzebbre eljutnak, mint vastag üledékkel borított medencékben. Ehhez még az is hozzájárul, hogy a jól vezetővel kitöltött repedésekben nemcsak a természetes, hanem a mesterséges elektromágneses tér is csatornázva lehet.

Az erős tektonika, illetve a csatornázás hatására a természetes elektromágneses tér annyira torzulhat, hogy a medencékben szokásos koherencia-feltételt a mágneses tér és az elektromos tér változásai gyakorlatilag sohasem teljesítik, még akkor sem, ha szinte zajmentes az állomás. Emiatt kénytelenek voltunk ezt az elfogadási kritériumot lényegesen lazábbra szabni, pl. Lassnitz esetében 0,6-ra. Ennek ellenére az volt a tapasztalatunk, hogy a szondázási görbe meghatározásának bizonytalansága nem romlott lényegesen ennek hatására.

A finn (Oului egyetem) együttműködésben elkészített real-time AMT műszer lehetőséget ad arra, hogy a számítógépek alapjául szolgáló amplitúdó értékeket is tanulmányozzuk. Mintegy 20 mérési pont adatai alapján a mágneses és a tellurikus jel és zaj amplitúdóváltozását követtük az ELF frekvenciatartományban a helyi idő, a földtani szerkezet, továbbá a mesterséges zaj forrásának megoszlása szerint. Vizsgálni tudtuk az AMT paraméterek hibáinak alakulását a fentiek függvényében [ÁDÁM, SZARKA 1995].

Ami a tektonikai eredményeket illeti, a leglényegesebbnek a Periadriai vonal kimutatását tartjuk. A Gail-völgyben található grafitos palák alátámasztják azt az értelmezést, amely szerint a Dunántúli Vezetőkészségi Anomália is ilyen képződmény hatására alakul ki.

Megállapításaink között az is szerepel, hogy az Alpok mészkőtömegei feletti mérések kevésbé voltak eredményesek (Gartenweg, Klein St. Paul). Valószínűleg a zajok a nagyon rosszul vezető mészkő feletti vékony málladékban még nagyobb távolságra jutnak el, másrészt a homogénebb kristályos tömeg esetében egyszerűbbnek tűnik a földtani felépítés, természetesen eltekintve a többször említett jól vezető csatornától.

Amint a mérések eredményei alapján született publikációk sok hivatkozása, valamint az osztrák félnek a mienkével egyező véleménye mutatja, a méréseket sikeresnek értékeltük, a kitűzött célok legnagyobb részét sikerült elérnünk.

HIVATKOZÁSOK

- ÁDÁM A., MÁRCZ F., VERŐ J., WALLNER Á., DUMA G., GUTDEUTSCH R. 1980: A Pannon-medence és a Keleti-Alpok közötti átmeneti zónában végzett elektromágneses szondázások eredményei. *Magyar Geofizika* **21**, 108–120
- ÁDÁM A., MÁRCZ F., VERŐ J., WALLNER Á., DUMA G., GUTDEUTSCH R. 1981: Magnetotelluric sounding in the transitional zone between the Eastern Alps and Pannonian Basin. *J. Geophys.* **50**, 37–44
- ÁDÁM A., DUMA G., GUTDEUTSCH R., VERŐ J., WALLNER Á. 1984: A Periadriaticus vonal kutatása az Alpokban MT szondázással. *Magyar Geofizika* **25**, 4, 136–150
- ÁDÁM A., DUMA G., GUTDEUTSCH R., VERŐ J., WALLNER Á. 1986: Periadriatic lineament in the Alps studied by magnetotellurics. *J. Geophysics* **59**, 103–111
- ÁDÁM A., SZARKA L., VERŐ J., WALLNER Á., GUTDEUTSCH R. 1986: Magnetotellurics (MT) in mountains-noise, topographic and crustal inhomogeneity effects. *Phys. of the Earth and Planet. Interiors* **42**, 165–177
- ÁDÁM A., DUMA G., HORVÁTH J. 1988: Új közelítés a Periadriai-Balaton vonal elektromos vezetőképességanomália értelmezéséhez audiomagnetotellurikus mérések alapján. *Magyar Geofizika* **29**, 27–43
- ÁDÁM A., DUMA G. 1990: Structural deformations in the Periadriatic collision zone determined by audiomagnetotellurics. *Proceedings of the International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. April 18–20, 1990, Vienna. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 149–156
- ÁDÁM A., DUMA G., HORVÁTH J. 1990: A new approach to the electrical conductivity anomalies in the Drauzug-Bakony geological unit. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **60**, 155–162
- ÁDÁM A., DUMA G., BERGER J., HORVÁTH J. 1992: Tectonic and geoelectrical features of the Periadriatic-lineament (S-Austria)

- with a generalization. *In: ÁDÁM A. (ed.) Electromagnetic results in active orogenic zones. Special Issue of the IAGA Symposium, 18 August 1991, Vienna. Acta Geod. Geoph. Mont. Hung.* **27**, 47–64
- ÁDÁM A. 1995: New AMT data of the Gailtaler Alps. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **30**, 227–239
- ÁDÁM A., SZARKA L. 1995: Time and space relation of the ELF (AMT) signals and noise. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **30**, 241–256
- ARIČ K., ÁDÁM A., SMYTHE D. K. 1997a: Combined seismic and magnetotelluric imaging of upper crystalline crust in the Southern Bohemian Massif. *First Break, Research Article* **15**, 8, 265–271
- ARIČ K., GUTDEUTSCH R., HEINZ H., MEURERS B., SEIBERL W., ÁDÁM A., SMYTHE D. 1997b: Geophysical investigations in the Southern Bohemian Massif. *Jahrb. Geol. Bundesanstalt* **140**, 9–28
- HORVÁTH F., ÁDÁM A., STANLEY W. D. 1987: New geophysical data: evidence for allochthony of the Transdanubian Central Range. *Rendiconti Soc. Geol. Italiana* **9**, 123–130
- STEINAUSER P., SEIBERL W., ZYCH D., RUESS D. 1980: Bestimmung des Bouguer-Schwerefeldes der Karawanken und der Sattnitz. *Mitt.öster. geol. Ges.* **71/72** (1978/1979), 299–306