

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

PTE TTK Földtudományok Doktori Iskola

*A doktori iskola  
címe:*

PTE Földtudományok Doktori Iskola

*Vezetője:*

**Dr. Dövényi Zoltán**, egyetemi tanár  
az MTA doktora  
PTE TTK Földrajzi Intézet,  
Magyarország Földrajza Tanszék

**A Balfi-blokk felszínformáinak eredetéről**

**Prodán Tímea Hajnal**

*A doktori  
témacsoport címe:*

Geomorfológia

*Vezetője:*

**Dr. Schweitzer Ferenc**, professor emeritus  
az MTA doktora  
PTE TTK Földrajzi Intézet,  
Magyarország Földrajza Tanszék

*Az értekezés  
tudományága:*

Geomorfológia

*Témavezető:*

**Dr. Schweitzer Ferenc**, professor emeritus  
az MTA doktora  
PTE TTK Földrajzi Intézet,  
Magyarország Földrajza Tanszék

**Pécsi Tudományegyetem  
Természettudományi Kar**

**Pécs, 2010**

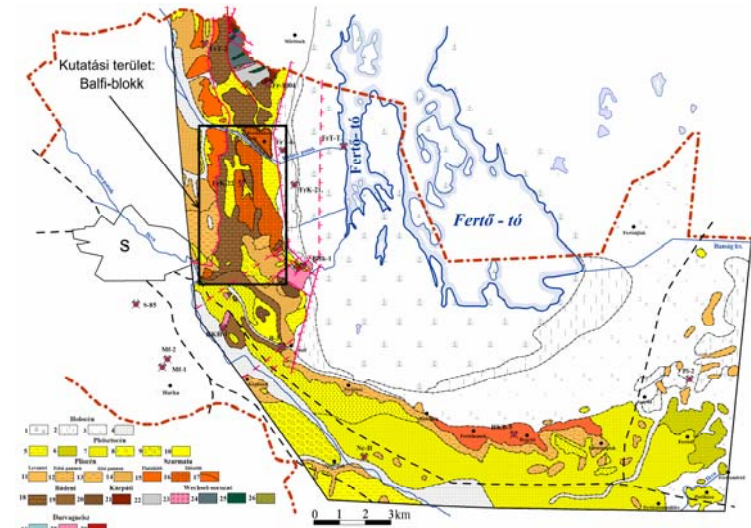
## A kutatási feladat, célkitűzések

A Fertőmelléki-dombság a Fertő-tó és a Soproni-medence közötti gyengén tagolt, kis magasságú (200–300 méter) deráziós-eróziós dombság. A dombságnak azt a szerkezeti vonalakkal jól lehatárolt részét, ahol a Soproni-hegység folytatását képező metamorf kőzeteket harmadidőszaki kőzetek (elsősorban Lajtai Mészkkő) fedik, Balfi-blokknak nevezzük. Az alaphegységet képező kristályos palák csak néhány helyen bukkannak elő. A Balfi-blokk a Fertő-tó, illetve a Kőhidai-medence felé morfológiailag határozott peremmel végződik (1. ábra).

A Balfi-blokk a világörökségi védelem alatt álló Fertő-tájnak természeti és kultúrtörténeti értékekben különösen gazdag része. A területet a történelem során erőteljes tájhasználat jellemezte. A természeti értékek felmérése és védelme érdekében végzett geomorfológiai térképezés során olyan felszínformákat vizsgáltunk, amelyekről karsztos eredet feltételezhető, illetve kialakulásukban karsztos folyamatok is szerepet játszhattak.

Az értekezés fő célja a kutatási területen előforduló felszínformák, illetve a hozzájuk kapcsolódó üregek, barlangok eredetének tisztázása, figyelembe véve a természetes eredet (karsztos folyamatok) feltételrendszerét és a valószínűsíthető antropogén tényezőket. Ehhez kapcsolódó feladatok/célkitűzések:

- a földtani környezet – földtani felépítés, tektonikai viszonyok – megismerése
- a felszínformák részletes feltérképezése, jellemzése
- a felszínformák geomorfológiai elemzése, értelmezése
- a kőzet karsztosodási hajlamának vizsgálata
- olyan felszínalatti képződmények kutatása, feltárása, amelyekkel a felszínen megfigyelhető formák összefüggésbe hozhatók
- az adott geológiai és geomorfológiai környezetben a geofizikai módszerek hatékonyságának, alkalmazhatóságának a vizsgálata
- antropogén eredetre, későbbi hatásokra utaló történeti adatok feldolgozása



1. ábra. A Fertő-táj geológiai térképe

(IVANCSICS J. térképvázlata alapján készítette PRODÁN, T. H. 2010)

1. nádas
2. tőzeg, tőzegrész, kotu
3. friss öntés (kavics, homok, iszap)
4. Holocén általában
5. homokos lösz, vályog
6. folyóvízi kavics
7. folyóvízi hordalékkúp
8. folyóvízi kavics (bozi terasz)
9. terasz kavics
10. Pleisztocén általában
11. folyóvízi homok
12. agyag, márga, homok
13. agyag, homokos agyag, vasas agyag
14. homok és kavics, alárendelten konglomerátum
15. homok, homokkő, kavics, konglomerátum
16. mészkkő, homokos mészkkő
17. alapkonglomerátum
18. durvamészkkő, mészhomok
19. agyag, kőzetlisztes agyag
20. alapkonglomerátum
21. Ruszti kavics
22. fillites csillámpala
23. muszkovitgneisz
24. földpátos csillámpala
25. amfibolit, amfibolpala
26. leukofillit
27. disztén(kianit)kvarcit
28. biotitos muszkovitgneisz
29. csillámpala

A jellegzetes, többnyire összetett szakadéktöbrökre emlékeztető felszínformák (2. ábra) mélyedésrendszerekben csoportosulnak. Eredetüket felszíni, terepi megfigyelés és geomorfológiai elemzés alapján nem sikerült egyértelműen tisztázni. Részletesen megvizsgáltuk a terület földtani felépítését, a földtani viszonyok és a felszínformák közötti összefüggéseket, valamint geofizikai méréseket végeztünk a felszín alatti térrész fizikai paramétereinek, inhomogenitásainak meghatározására. Figyelembe véve az előzetes földtani ismereteket, és a terep adta lehetőségeket, geoelektromos, elektromágneses és mágneses módszereket alkalmaztunk a képződmények leképezésére. Az antropogén eredetre utaló geomorfológiai, geológiai és a geofizikai eredmények megerősítésére

levéltári adatokat kerestünk a területen egykor folytatott ipari és bányászati tevékenységről.

A kutatási területen előforduló geomorfológiai képződmények eredetének tisztázásán túl vizsgálataink módszertani szempontokat szolgáltathatnak hasonló földtani környezetben a felszíni és a felszín alatti képződmények kutatásához.



2. ábra. Tipikus képződmények a kutatási területen (PRODÁN T.)

### A terület földtani felépítése – neogén üledékképződés

A kutatott terület szerkezetiileg a Keleti-Alpok nyúlványa. A Soproni-hegységet felépítő kristályos palákat itt több száz méter vastag üledék fedi. Az idős paleozoikumi kristályos kőzetek a területen csak néhány helyen bukkannak felszínre. A mezozoikumi és paleogén képződmények hiányoznak. Nagy üledékhézaggal a miocénben, a bádeni korszak kezdetén megindult süllyedés miatt indult meg az újabb üledékképződés. A mélyebb területeken Bádeni Agyag, a sekély, parti részeken Lajtai Mészke képződött. A bádeni és a szarmata korszak között a tenger visszahúzódott, s e regressziós fázis következtében a mészkőre rátelepült egy homokosabb réteg, majd egy abráziós konglomerátum réteg. A regressziót újabb transzgresszió követte, s gyakorlatilag visszaállt ugyanaz a fácies, ami korábban volt, csak most már a szarmata korszakban. Ennek eredménye a szarmata agyag és a szarmata mészkő.

A területet számos vető darabolja fel, ezeknek a vetőknek egy része valószínűleg többszörösen felújult. A miocén eleje körül kialakult vetők felújulása a később települt üledékcsoportokat is érte. A fő törésvonalak É-D-i irányúak és legalább bádeni korúak, a

haránttörések másodlagosak. Ezeken kívül rendszertelen alsóbbrendű vetők is bőven lehetnek.

A karsztvízszint enyhén a Fertő-tó felé lejt. Ez a víz a Fertő partján források formájában tört elő, de a Soproni Regionális Vízmű által (1968-1970 között) fűrt kutak az összes forrást elapasztották. A vízparti fűrássort (14 fűrás) a Balfi-blokk keleti határát képező vető (ún. Keleti-vető) mentén telepítették, 2 km hosszan.

Részletes földtani térkép a területről korábban nem készült, ezért a részben publikálatlan adatok, kéziratok alapján a kutatott területről részletes földtani térképet készítettünk (1. ábra).

### A jelenlegi domborzat kialakulásának története

A jelenlegi felszín kialakulása a Pannon-tó visszahúzódásával kezdődött. Az Alpok szegélyének megemelkedésével a tönkösödött kristályos alaphegységhez hozzáótt neogén (bádeni, szarmata, pannóniai) felszínen – ezeket az üledékeket elnyesve – heglábfelszín képződés indult. Az enyhén lejtősödő heglábfelszín-maradványok a különböző ellenállóképességű bádeni, szarmata és pannóniai üledékeket egyaránt metszik. A Balfi-blokkon számos helyen a Lajtai Mészke egybe van gyalulva a legidősebb és legfiatalabb szarmata rétegekkel (mészke, homokkő, homok, kavics, konglomerát), valamint a felső-pannóniai agyagos, homokos felszínnel. A pliocén fejlődésszakasz alsó részében folytatódott a heglábfelszín képződés, amelyet a terület beerdősülése, a galériaerdők kialakulása követett. Ennek eredménye a fluviolakusztikus vízrendszer kialakulása és a kereszttrétegzett homok képződése. A meleg, nedves középső- és felső-pliocénban erőteljes mállás, areális és laterális erózió egyengette a felszínt. A feldarabolódott heglábfelszíneken vörösayagok alakultak ki. A pliocén időszakot követően a meg-megújuló kéregmozgások mellett főként az erózió, a defláció, a lösz és löszszerű képződmények kialakulása dominált. A pleisztocén jégkorszakok folyamán a hordalékkúp-képződés és völgyképződés mellett a szoliflukció, a deráziós és deluviális folyamatok voltak a meghatározók. Az új-pleisztocén kéregmozgások során a Fertő-medence süllyedésével egyidejűleg alakult ki a Kőhidai-medence, melynek vizeit a Lajtai Mészkebe antecedens völgyzakasszal bevágódva a Rákos-patak

vezeti le a Fertőbe. Ezek a lesüllyedt területek, mint helyi erózióbázisok visszahatottak a (vízgyűjtő) terület letarolására. Az alpi jégtakaró elolvadása után a würm glaciális végére, a holocén elejére kialakult a mai vízrajzi és domborzati kép. Ezt követően, főként a római kortól kezdődően az antropogén hatások kerültek túlsúlyba a táj fejlődésében.

## Geomorfológiai vizsgálatok

### *Felszínformák jellemzése*

A kutatási területen feltérképezett felszínformáknak alapvetően három változata különíthető el:

Kis méretű, sekély, többnyire magányosan, néha párosan megjelenő, *egyszerű mélyedések*. Aljzatuk egyenetlen, belsejükben a mészkő nem, vagy csak ritkán bukkan elő.

A szintén *kis* méretű, *összetett mélyedések* kettőnél több részmélyedésből állnak. Kiterjedésük mintegy 50-100 m közötti, aljzatuk egyenetlen, belsejükben esetleges anyagáthalmazáshoz köthető kiemelkedések is megfigyelhetők.

A *nagyobb összetett mélyedések* vagy mélyedésrendszerek (számuk 4 db) több száz méter átmérőjük is lehetnek. Alaprajzban szabálytalanok, de mindegyikük megnyúlt kissé K-Ny-i irányban. Mivel több részmélyedés kapcsolódik egymásba, peremük nagyjából ívesen összetett. A mélyedésrendszerek peremén fűzészerűen félkörös aszimmetrikus keresztmetszetű bemélyedések (aszimmetrikus szakadéktöbrök) sorakoznak. Meredek (függőleges) oldallejtőjük a mélyedésrendszer peremének részét alkotja, s itt többnyire előbukkan a mészkő. Belsejükben ritkán, de előfordulnak kis méretű (legfeljebb 1–2 m-es átmérőjű) halmok. Gyakoribbak a sziklás, meredek oldallejtőknek támaszkodó, ugyancsak 1–2 m-es kiterjedésű közettörmelék- és mállástermék-kúpok.

A szakadéktöbrökre emlékeztető mélyedésekhez kisméretű barlangok, üregek kapcsolódnak. Egyes barlangok bejáratát a leomló anyag részben vagy teljesen elfedi. A fűzészerűen sorakozó szakadéktöbröket küszöbök, félküszöbök különítik el egymástól. A

küszöbök két szakadéktöbrő közötti keskeny formák, amelyek az eredeti térszín maradványai.

### *Barlangok, üregek*

A területen előforduló barlangok a mélyedésrendszerekhez viszonyított helyzetük szerint lehetnek a mélyedésrendszertől független helyzetűek és azokhoz kapcsolódók.

*Mélyedésrendszerektől független barlang* a Szárhalmi-kőfejtő két kisebb ürege és egy barlangja (a Szárhalmi-kőfejtő barlangja). A barlang, illetve az üregek bányászat során tárultak fel, mivel a kőbánya falában sorakoznak. A Szárhalmi-kőfejtő barlangja, amely a kőzet törésirányával megegyező irányú, mintegy 20 m hosszúságú (4,0–4,5 m magas, 7 m széles) képződmény, keresztmetszete szerint kétszattatú. Felső részén, a mennyezetén és az oldalfalakon oldásos eredetű forma is előfordul. Alsó részén az oldásos formakincs hiányzik, ez bizonyára bányászat során jött létre. Elképzelhető, hogy korábban két egymástól elkülönülő, egy természetes és egy mesterséges eredetű üreg lehetett és a bányászat hatására növekedő mesterséges üregnek a természetesbe nyílásával alakult ki a jelenlegi barlang.

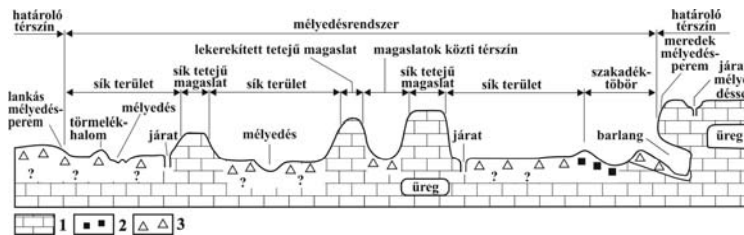
*Mélyedésrendszerhez kapcsolódó barlang* a pillérekkel tagolt, markáns oldódásos formakincs nélküli Zsivány-barlang. A barlang dőlésirányban elhelyezkedő, 1–2 m magas, 20 m széles, 50 m hosszú, mindegyik végén zártan elvégződő képződmény. Bejáratai részben a mennyezet omlásával, beszakadásával alakultak ki. A különböző időszakokból származó leírások szerint a bejáratok száma időben változik, a barlang mennyezetének beomlásával új bejáratok nyílnak, a beszakadásos mélyedések oldalából nyílnak pedig omlással elzáródnak. A pillérek arra utalnak, hogy a barlang bányászat során alakult ki. Nem ismert viszont olyan bejárata, ahol a bányászott követ könnyen ki lehetett volna szállítani.

A *mélyedésrendszerek oldalfalában felnyíló* kisebb méretű (jellemzően néhány méter hosszúságú) barlangok, zsákszerű üregek a nagy mélyedésrendszerek mindegyikében előfordulnak, sőt a kisebb méretű összetett mélyedések némelyikében is megtalálhatók. E barlangtípusnak két változata is megkülönböztethető: a *zsákszerű barlangok* és az *átjárók*. A zsákszerű barlangok a mélyedés-

rendszerek peremein fordulnak elő a szakadéktöbrök folytatásában. A barlangok hossza és szélessége általában meghaladja magasságukat. Átjáróknak a szomszédos szakadéktöbröket elválasztó küszöbök (félküszöbök) alatti üregeket nevezzük.

### A mélyedések, mélyedésrendszerek geomorfológiai elemzése

A geomorfológiai elemzés alapján természetes, karsztos eredetűek lehetnek az ívesen tagolt peremű mélyedések, mélyedésrendszerek. A felnyílással kialakult formák (szakadéktöbrök) már kialakulásukkor, vagy később, növekedésük során egymásba kapcsolódtak. Tehát a nagy mélyedésrendszerek olyan szakadék-uvalák, amelyek peremén sorakozó félkörös bemélyedések recens, kisméretű, aszimmetrikus szakadéktöbrök. A mélyedések belsejében megfigyelt kiemelkedések az eredeti térszín maradványai lehetnek, az oldalfalhoz támaszkodó halmok az oldalfalak omlásával keletkeztek. A mélyedések belsejében ritkán megfigyelt halmok törmelékes szerkezete arra utal, hogy omlás, vagy mesterséges anyagáthalmozás révén keletkeztek (3. ábra).



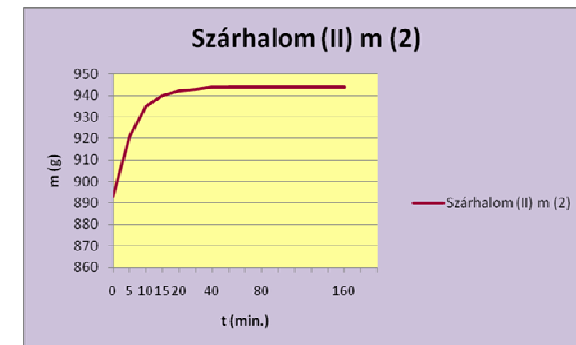
3. ábra. A Balfi-blokk mélyedésrendszereinek elvi geomorfológiai szelvénye  
1. mézskő 2. omladék 3. talaj- és közettörmelék (PRODÁN T. – V ERESS M. 2007)

A földtani térképet a geomorfológiai térképpel összevetve azt találtuk, hogy a képződmények mind olyan területre esnek, ahol a felszínen nagy (legalább 90-95%) CaCO<sub>3</sub> tartalmú mézskő található. (A jelen vizsgálatok szempontjából közömbös, hogy ez a mézskő bádénai vagy szarmata korú, mert mindkettő ugyanazokkal a fizikai-

kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek). Ez az egybeesés a képződmények karsztos eredetével kapcsolatos feltevéseket támasztja alá.

A karsztosodás egyéb feltételeit is figyelembe véve azonban a karsztos eredettel kapcsolatban több kétség is felmerül. A mélyedésrendszerek nem köthetők a geológiai térképezésből és a mélyszerkezet-kutató geofizikai mérésekből ismert olyan tektonikai vonalakhoz, amelyek mentén a karsztosodás erőteljesebb lehet. A feltárások és a fúrásadatok azt mutatják, hogy a mézskő rétegzettsége is kis mértékű (határozott réteglapok hiányoznak), továbbá csekély mértékben kompaktálódott, alig töredezett. Megvizsgáltuk a mélyedésrendszerekből gyűjtött kőzetmintákon a kőzet elsődleges porozitását.

A teszterületen gyűjtött kőzetminták porozitása 20% körül van, a nagyobb mélységből (10-20 m) származó minták porozitása 10% körüli. Ezek a magas porozitás értékek és a nagy permeabilitás (4. ábra) a kőzet alacsony karsztosodási hajlandóságát jelzik. A nagy porozitás és permeabilitás mellett a domborzati viszonyok is olyanok, hogy – legalábbis a jelenlegihez hasonló klímaviszonyok közepette – nem tud annyi víz meggyűlni a mélyedésrendszerek területén, ami számottevő karsztfolyamatokat eredményezhet.



4. ábra: Tipikus vízfelvételi görbe (Szárhalom 2) (PRODÁN T.)

## Geofizikai mérések eredményei

Karsztos területek kutatása a topográfia, a közetfizikai paraméterek nagymértékű horizontális és vertikális tagoltsága és a képződmények változatos helyzete, geometriája miatt a geofizika igazi kihívásai körébe tartozik. Az alkalmazott geofizikai módszerek közül a helyi adottságoknak megfelelő geomorfológiai térképezés, geológiai és hidrogeológiai adatok, közetfizikai paraméterek alapján, illetve a kutatási területen fellépő zajok figyelembevételével választottuk ki. A tektonikai zónák és a területi összefüggések vizsgálatára elektromágneses szelvényezés készült, a felszín alatti képződmények kutatására pedig egy olyan teszterületet választottunk, ahol minden jellegzetes képződmény megtalálható. A terület kiválasztásánál további szempont volt az alacsony zajszint, valamint az, hogy a terepviszonyok lehetővé teszik tomográfias módszerek alkalmazását. Szabályos hálózatban földradar (GPR) méréseket, geomágneses térképezést, valamint 2D és 3D geoelektromos tomográfiát végeztünk.

### *Áttekintő VLF-mérések*

Az elektromágneses módszerek közé tartozó VLF (Very Low Frequency) módszerrel a látszólagos fajlagos ellenállás horizontális változása térképezhető fel a felszínalatti néhányszor 10 m vastagságú összletben. A fajlagos ellenállás hirtelen és számottevő változása lép fel rendszerint törésvonalak mentén. Távoli hosszuhullámú (VLF) adók keltette elektromágneses tér függőleges és vízszintes mágneses komponenseinek hányadosa jó indikátora a laterális inhomogenitásoknak, hiszen ennek hiányában a mágneses térerősségnek elméletileg nincs függőleges komponense. A hányados hirtelen megváltozása nagy valószínűséggel szerkezeti vonalakat, laterális inhomogenitásokat jelez. Nagyjából É-D irányban egy, az egész blokkot átszelő VLF-szelvény készült, majd a terület északi részén sokkal nagyobb pontsűrűséggel további négy szelvényt mértünk. Ezek a VLF mérések a korábban ismert tektonikai vonalak mellett több új törést tártak fel, de a vizsgált képződmények területi elhelyezkedése és a fiatalabb tektonika között sem lehet összefüggést megállapítani.

## Részletes geofizikai térképezés

Részletes geofizikai kutatásokra az egész területen természetesen nincsen mód, így egy olyan helyet kerestünk, ahol a jellegzetes képződmények – íves peremű többszerű mélyedések, üregek – mind megtalálhatók és a terepi viszonyok is alkalmasak arra, hogy a geofizikai módszereket nagyobb előkészítés nélkül alkalmazni lehessen.

Ez a teszterület a B-11 jelű mélyedésrendszer peremén található, környezetében a terep viszonylag sík, bolygatatlan, növényzettel gyéren borított. Az egyik, kb. 7 m átmérőjű töbör oldalában a felszíntől kb. 2 m-re egy nagyobb méretű üreg 1-1,5 m átmérőjű, omladékkal részben elzárt bejárata nyílik.

### *Földradar mérés*

A földradar mérés gyors és hatékony módszer az elektromágneses paraméterek (fajlagos ellenállás, dielektromos állandó) változásának felszín közeli vizsgálatára. A felszínen keltett nagyfrekvenciás (50–500 MHz) elektromágneses hullám azokon a felületeken reflektálódik, ahol a dielektromos állandó megváltozik. A hullám behatolási mélysége a fajlagos ellenállástól függ, agyagmentes, száraz talajban 100 MHz-en elérheti a 20 m-t is. A radarszelvényen a közel vízszintes réteghatárok általában jól követhetők, az oldalirányú reflexiók 2–3D szerkezeteket (pl. üreg) indikálhatnak.

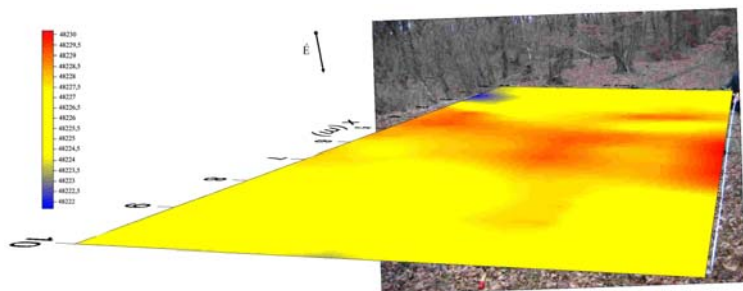
Az úttal (beszakadásos mélyedés peremével) párhuzamosan négy (S1-S4), arra merőlegesen hat (S5-S10), egyenként 21 m hosszú radarszelvény készült.

A 100 MHz-es radarszelvényeken a hullámhossz vélhetően túl nagy az üreg méreteihez képest. A pontosabb leképezéséhez nagyobb frekvenciát is (250 MHz) alkalmaztunk, de a talaj erős csillapító hatása miatt a kutatási mélység annyira lecsökkent, hogy az üregről értékelhető reflexiót nem kaptunk.



## Mágneses mérés

A teszterületen rádiófrekvenciás gerjesztésű protonmagnetométerrel (GSM-19) nagyfelbontású mágneses mérést végeztünk 0.25 m ponttávolságú szabályos hálózatban. A protonmagnetométer a geomágneses tér skalárértékét méri. A mágneses térerősség nagysága szoros kapcsolatban áll a mérési hely környezetében lévő objektumok indukált és remanens mágnesezettségével, az információt tehát az eltemetett objektumok, illetve környezetük mágneses paramétereinek eltérése hordozza. A mágneses anomália térképen egy gyenge (kb. 5 nT) pozitív anomália (5. ábra) mutatkozik, ami utalhat arra, hogy a felszínalatti üreget részlegesen nagyobb szuszceptibilitású anyag (pl. agyag) tölti ki.



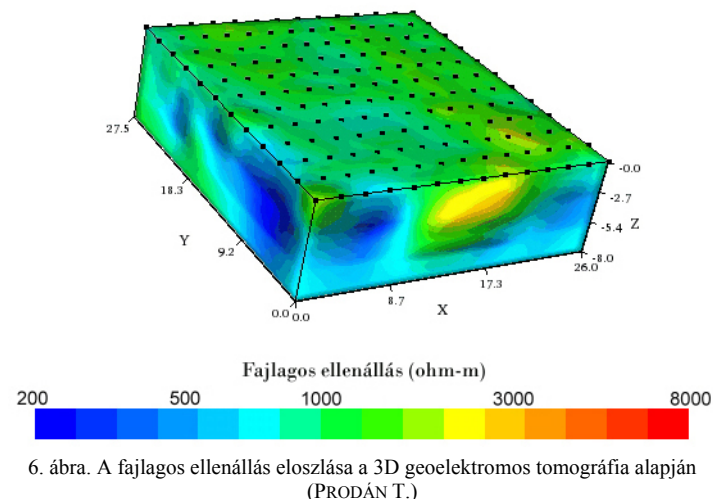
5. ábra. A vizsgált üreg felett kialakult mágneses anomália (PRODÁN T.)

## Geoelektromos mérések

A geoelektromos módszerekkel a felszín alatti térség fajlagos ellenállás eloszlását határozzuk meg. Alapesetben (1D) két áramelektrodán keresztül a földbe bocsátott áram hatására kialakuló potenciáletteret mérjük a felszínen, különböző geometriai elrendezések mellett. A kapott látszólagos fajlagos ellenállásértékek a mérési elrendezés geometriai középpontjára vonatkoznak. A kutatási mélységet az adott fajlagos ellenállás eloszlás mellett az áramelektrodák távolsága határozza meg.

A feltételezett üreg felett 26 m × 27,5 m-es területen 168 elektródával szabályos hálózatban multielektrodás mérést végeztünk. Ezzel az elrendezéssel a vizsgált térrészre több mint 8000 látszólagos

fajlagos ellenállás értéket határozzunk meg. Az inverzióval kapott háromdimenziós kép az üreget kitöltő levegő és a beágyazó kőzet közötti nagy ellenálláskontrasztot nagyon jól jelzi (6. ábra). Az üreget határoló felületet úgy választottuk meg, hogy ott a néhány 100 ohm-es beágyazó kőzetben a fajlagos ellenállás 3000 ohm-re változik. Ez a magas fajlagos ellenállás érték legalábbis részben levegővel kitöltött térrésznek értelmezhető. Az inverzió sajátossága, hogy a választott ellenálláskontrasztnak megfelelően változik az üreg és a kőzet határfelülete, vagyis a képződmény/üreg mérete.



6. ábra. A fajlagos ellenállás eloszlása a 3D geoelektromos tomográfia alapján (PRODÁN T.)

A korábban végzett VESZ szondázásokból az adódott, hogy a mészkő fajlagos ellenállása átlagosan néhány 100 ohm, tehát a több ezer ohm-es képződmény valószínűleg egy levegővel kitöltött üreg lehet.

A 3D módszerrel kapott eredmény ellenőrzésére 2D egyenáramú szondázást végeztünk, kétféle elrendezéssel. Az üreg méretének, mélységének helyes leképezését befolyásolja a kőzet változó fajlagos ellenállása. A 2D invertált szelvényeken megjelenő ellenállások a kőzet és a talaj kiszáradása miatt magasabbak, mint az 1D és 3D mérés idején. A talajréteg jól elválik, de a kiszáradt mállott réteg nem határozott.

A részletes geofizikai mérések egy olyan, a töbör oldalából nyíló üreget jeleznek, amelyik minden irányból jól lehatárolt, méreteit tekintve akár anyagkivételi hely és/vagy lakás céljára is szolgálhatott. A geomorfológiai térképezéssel felkutatott képződmények az egész területen nagy hasonlóságot mutatnak, mind a méretek, mind a formák tekintetében.

### **Történeti, iparrégészeti kutatás**

A vizsgált képződmények antropogén eredetére vonatkozó feltevéseinket történeti adatokkal, levéltári dokumentumokkal is igyekeztünk alátámasztani. Számos forrásból ismert a római idők óta használt Lajtai Mészke építészeti jelentősége. Az építőkő évezredes intenzív bányászatát tapasztalhatjuk Fertőrákoson és az ausztriai Szentmargitbányán. Tudjuk, hogy a Fertő és a Hanság egybefüggő vízi útján a 80 km-re található, 1208-ban épült lébényi apátsági templom építéséhez szállították, de Bécs középületeinek is kedvelt építőkőve volt. A bőséges levéltári anyagot iparrégészeti szempontból többen is feldolgozták. Ezek tanúsága szerint ez a viszonylag kis terület nagyon nagy körzetet látott el építőkővel és égetett mészszel. Egy, a soproni égetett mész piaci körzetét bemutató térkép tanúsága szerint erről a területről látták el égetett mészszel az egész egykori Sopron vármegyét. A 15–16. században a város mészégető kemencéi a Szárhalmi erdő környékén éppen azokon a területeken működtek, ahol a kutatott képződmények találhatóak.

A 15–17. századra jellemző kisüzemi mészégetést a 18. században nagyüzemi technológiák váltották fel. Nagy valószínűséggel ekkor kezdődött az egykori anyagkivételi helyek, mészégetők és a hozzá tartozó „raktárak”, szálláshelyek eróziója, pusztulása, amit többéves munkánk során megfigyeltünk.

#### *Az eredmények hasznosulása, további kutatások*

A kutatás elsődleges célja a kutatási területen előforduló morfológiai képződmények eredetének tisztázása volt. Már a geomorfológiai elemzés során kérdésessé vált a felszínformák természetes (karsztos) eredete, ezért a problémát tágabb geográfiai és földtani összefüggésrendszerben vizsgáltuk. Nem, vagy csak részben publikált adatok

alapján részletes digitális földtani térképet szerkesztettünk. Irodalmi adatokat és a Geológiai Szolgálat egykori irattárában fellelt jegyzőkönyveket dolgoztunk fel az ősföldrajzi kép és a felszínfejlődés rekonstruálására. Ezek az eredmények más helyi *környezetvédelmi, geotechnikai, földtani, vízföldtani vizsgálatban is hasznosulhatnak*. Geofizikai módszerekkel a felszín alatti képződményeket kutattuk, közvetett bizonyítékokat kaptunk a felszínformák *antropogén eredetére*. A képződmények eredetére vonatkozó ismeretek és azok megfigyelése révén a várható *eróziós, omlási folyamatok időbeli lefolyása és térbeli kiterjedése megbecsülhető*. Ez a tájhasználat szempontjából fontos lehet. Karsztos területek kutatása a topográfia, a kőzetfizikai paraméterek nagymértékű horizontális és vertikális tagoltsága és a képződmények változatos helyzete, geometriája miatt a geofizika igazi kihívásai körébe tartozik. Az alkalmazott geofizikai módszerek közül a helyi adottságoknak megfelelő geomorfológiai térképezés, geológiai és hidrogeológiai adatok, kőzetfizikai paraméterek alapján, illetve a kutatási területen fellépő zajok figyelembevételével választottuk ki. *Bizonyítottuk az alkalmazott módszerek jó leképezési tulajdonságait, így vizsgálataink módszertani szempontokat szolgáltathatnak hasonló földtani környezetben a felszíni és a felszín alatti képződmények kutatásához*. Történeti kutatásaink alapján bizonyítottunk tekinthetjük a felszínformák antropogén eredetét, azok további vizsgálata tehát elsősorban *kultúrtörténeti, iparrégészeti szempontból fontos*. Ami a területen elvégzendő terepi munkákat illeti, kiemelt szerepe lehet a geomágneses térképezés kiterjesztésének a mélyedésrendszerek tágabb környezetére. A mészégetés hőmérséklete ugyanis meghaladja a legtöbb ferromágneses ásvány Curie-hőmérsékletét, így azok a mészégető körül remanens mágnesezettségre tesznek szert, ami pedig jelentős mágneses anomáliát okoz, így további – akár eltemetett – mészégetők helye azonosítható. A teszterületen szerzett gyakorlati tapasztalatok alapján OTKA pályázat keretében olyan kutatási projekt indult, amelynek célja egyrészt a geoelektromos módszerek leképezési tulajdonságainak javítása, a paraméterérzékenység vizsgálata, másrészt ugyanazon helyen (a dolgozatban vizsgált teszterületen) megismételt szondázásokkal a mérési körülmények – esetünkben a nagy porozitású kőzet változó víztartalma – hatásának vizsgálata.



## Kiemelt eredmények összefoglalása

### TÉZISEK

- I. A Fertőmelléki-dombság gyenge reliefenergiájú, gyér völgyhálózatú, többnyire tagolatlan eróziós-deráziós hegyláb felszín-maradvány. A hegyláb felszín Lajtai Mészkövel fedett központi részén (Balfi-blokk) ismeretlen eredetű, főleg beszakadásos mélyedésekre, töbrökre emlékeztető felszíni formák kerültek részletes feltérképezésre és geomorfológiai elemzésre. Ezek a felszínformák három területen csoportosulnak. A geomorfológiai elemzés alapján azok a kisméretű mélyedések, amelyek környezetében vagy belsejében törmelék felhalmozódások vannak, és/vagy aljzatuk egyenetlenül tagolt, nagy valószínűséggel mesterséges eredetűek. A nagyméretű mélyedések, vagy mélyedésrendszerek azon részei, ahol sáncok, kőfalmaradványok fordulnak elő ugyancsak. Természetes, karsztos eredetűek lehetnek az ívesen tagolt peremű mélyedések, mélyedésrendszerek. A mélyedések – különösen a nagy mélyedésrendszerek – omlások, felnyílások sorozatával jöttek létre. A felnyílással kialakult formák (szakadéktöbrök), már kialakulásukkor, vagy később, növekedésük során egymásba kapcsolódtak. Tehát a nagy mélyedésrendszerek olyan szakadék-uvalák, amelyek peremén sorakozó félkörös bemélyedések recens, kisméretű, aszimmetrikus szakadéktöbrök. Ezt igazolják a mélyedések oldalfalából nyíló üregek is.
- II. A teszterület mélyedéseinek több éven keresztül megfigyelt gyors fejlődése, az oldalfalak eróziója a képződmények fiatal korára utal. A mélyedések körül a fák megdőlnék, pusztulnak, az út nyomvonala változik. Az oldalfalhoz támaszkodó omladékhalmonokon vegetáció sok helyen nem alakult ki. Ezek a monitoringnak is tekinthető megfigyelések arra utalnak, hogy a mélyedésrendszer fejlődése nem geológiai, hanem történelmi (legfeljebb néhány ezer év) időskálán zajlik. Figyelembe kell azért venni, hogy a felszínközeli folyamatok

- nem lineárisak, így a megfigyelt jelenségek múltba való extrapolálása nem bizonyító erejű.
- III. A hegyláb felszín Lajtai Mészkövel fedett központi részéről a részletes fedetlen földtani térkép alapján megállapítottuk, hogy a mélyedésrendszerek mindenütt egybeesnek a felszíni, nagy (legalább 90-95%)  $\text{CaCO}_3$  tartalmú mészkö előfordulásokkal. Az ismert töréses szerkezetek és a mélyedésrendszerek előfordulása, irányítottága között korrelációt nem lehet kimutatni. Különböző helyeken gyűjtött kőzetmintákon meghatároztuk a kőzet porozitását és a permeabilitásra jellemző vízfelvételi függvényt. A porozitás a felszín közelében eléri a 20%-ot, de még a kb. 20 m mélységből származó mintáé is 10% körüli. A nagy permeabilitást mutatja, hogy a közel 1000 grammos kőzetminta 10 perc alatt gyakorlatilag teljesen telítődött. A feltárásokban határozott rétegzettség, repedezettség (másodlagos porozitás) nem figyelhető meg. A mészkö kis kompaktáltsága, durvaszemcsés szerkezete, igen nagy porozitása, permeabilitása, kis repedezettségi hajlama kérdéssé teszi a képződmények karsztos eredetét.
  - IV. Újraértékeljük a területen és környezetében korábban végzett geofizikai mérések eredményeit. A ritka hálózatban végzett egydimenziós egyenáramú szondázások alapján megállapítottuk a mészkö felszínközeli rétegzettségét és az egész területre jellemző fajlagos vezetőképesség eloszlást. Az üregesedés vizsgálatára azonban az alkalmazott mérési elrendezés nem alkalmas. A geofizikai előkutatásra olyan elektromágneses geofizikai módszert alkalmaztunk, amivel a fajlagos ellenállás laterális változásai jóval hatékonyabban kutathatók. A VLF szelvények alapján összefüggést kerestünk a kutatót képződmények és a területen előforduló – a korábbi földtani adatokból nem ismert – töréses szerkezetek között. Ilyen törések mentén a karsztos folyamatok vélhetően erőteljesebbek, így azoknak a felszíni formákkal való területi egybeesése a karsztosodás közvetett bizonyítéka lehetne. A VLF-szelvények a korábbról ismertek mellett több fiatal tektonikai vonalat jeleznek, de a mélyedésrendszerek és a tektonika között területi összefüggés nem állapítható meg.

V. Részletes geofizikai vizsgálatokra egy teszterületen került sor. Ezen a területen minden jellegzetes felszíni forma és felszínalatti képződmény is előfordul. Az egyik beszakadásos mélyedésből nyíló üreg fölött földradar méréseket, mágneses térképezést és geoelektromos tomográfiát végeztünk. A kutatott üreg a földradar szelvényen ugyan jelentkezik, de annak pontos leképezése az üreg mélysége és mérete miatt ezzel a módszerrel nem lehetséges. A geomágneses anomáliatérkép jó tájékoztatást ad az üreg helyzetéről. Azt is jelzi, hogy az üreget részben a környezetéhez képest nagyobb szuszceptibilitású mállott anyag (pl. agyag) tölti ki. Nagyon hatékonyan bizonyultak a vertikális elektromos szondázások. A felszínközeli mállott anyag, a mészkő és a felszín alatti üreget kitöltő levegő közötti nagy ellenálláskülönbségek határozott, jó leképezést tesznek lehetővé, de természetesen az ekvivalencia jelensége miatt a közetfizikai és geometriai paraméterek csak korlátozottan határozhatók meg. A földtani struktúra bonyolultsága miatt általában be kell érni az adott objektum indikációjával vagy valamilyen leképezési eljárással kapott kvalitatív képpel. A geofizikai mérések a töbörtől (mélyedéstől) független, izolált üregesedést nem indikáltak. A töbör oldalfalából nyíló üreget az alkalmazott módszerek megfelelően leképezik. A töbör és a hozzá kapcsolódó üregek formája, mérete, mélysége az antropogén eredetre utal.

VI. A területen a mészkő bányászata már a római időkből is ismert, a középkorban folytatott intenzív bányászati-mészégető tevékenységet pedig számos levéltári adat igazolja. Építőkö minőséget csak az 5-10 m-nél nagyobb mélységekből lehet nyerni, ezért az értékes építőkö kitermelésére sajátos mélyművelésű technológiát alkalmaztak. Ennek példája a Fertőrákosi Kőfejtő.

A levéltári dokumentumok alapján a mélyedésrendszerek és az egykori mészégetés helyszínei között a területi egybeesések egyértelműen megállapíthatók. A vékony talajréteggel fedett mészkő a felszín közelében mállékony, építőkönek nem alkalmas, viszont könnyen fejthető és égetett mésznek kiváló alapanyag. A mélyedésrendszerek így olyan bányaudvarnak tekinthetők, melyeknek területén a külszíni bányászathoz ipari

feldolgozási tevékenység is kapcsolódott. A korabeli kisüzemi technológiák ismeretében azt mondhatjuk, hogy a mélyedések és az azok oldalfalából nyíló zsákszerű üregek (barlangok) anyagkivételi helyek lehettek, a nagyobbak pedig akár átmeneti szállásként és az égetett mész raktározására is szolgálhattak. Ezek a történeti dokumentumok egyértelműen az antropogén eredetet igazolják.

## AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

### SCI folyóiratban megjelent közlemények

PRODÁN, T. H. 2010: Investigation of depression systems on a carbonate terrain near Sopron, Hungary. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, October 2010, Vol. 5, No. 2, Baia-Mare, pp. 193-202. (IF: 0.606)

### Folyóiratban megjelent közlemények

PRODÁN T. H. 2010: A Balfi-blokk felszínformáinak eredetéről. *Földrajzi Közlemények*, 134/4, pp. 393-404.

PRODÁN T., VERESS M. 2007: Adalékok a Balfi-tönk felszíni karsztszerű képződményeinek morfológiájához és kialakulásához. *Karszt és barlang*, Budapest, pp. 41-48.

PRODÁN T. 2006: A B-2 mélyedésrendszer (Balfi-tönk) morfológiai térképezésének tapasztalatai. *Karsztfejlődés*, Szombathely, pp. 185-194.

### Konferencia kiadványok

PRODÁN, T. H. 2009: Application of geoelectric and electromagnetic surveys in a depression system investigation near Sopron. In: Szarka L. (szerk.) *IAGA 11th Scientific Assembly: Abstract Book*. Sopron, Hungary, 2009.08.23-2009.08.30. Sopron: Geodetic and Geophysical Research Institute of the HAS, Paper 118-THU-P1530-0836. (Poster session)

PRODÁN T. H. 2009: A Balfi-tönk morfológiai képződményeinek eredetéről, XII. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2009. március 20-21., p. 41.

PRODÁN T., VERESS M. 2008: A morfológiai képződmények vizsgálata geofizikai módszerekkel. XI. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2008. március 28-29.

PRODÁN T., VERESS M. 2007: A Balfi-tönkön végzett geofizikai mérések előzetes eredményei. X. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2007. március 23-24., p. 30.

### Előadások

PRODÁN, T. H. 2009: Application of geoelectric and electromagnetic surveys in a depression system investigation near Sopron. 11th IAGA Scientific Assembly, Poster session, Sopron, August 23-30, 2009.

PRODÁN T. H. 2009: A Balfi-tönk morfológiai képződményeinek eredetéről. XII. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2009. március 20-21.

PRODÁN T., VERESS M. 2008: A morfológiai képződmények vizsgálata geofizikai módszerekkel. XI. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2008. március 28-29.

PRODÁN T., VERESS M. 2007: A Balfi-tönkön végzett geofizikai mérések előzetes eredményei. X. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2007. március 23-24.

## TOVÁBBI PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

### Könyvek, könyvfejezetek

KIS Á., KOPPÁN A., LEMPERGER I., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ J., WESZTERGOM V. 2007: Variation of geoelectric activity – a study based on 50 years telluric observations at Nagycenk Observatory. Geophysical Observatory Reports (HU-ISBN 978-963-8381-22-4), pp. 95-101.

KIS Á., KOPPÁN A., LEMPERGER I., PRODÁN T., WESZTERGOM V., SZENDRŐI J., FERENCZ CS., LICHTENBERGER J. 2007: Connection between whistlers and Pc3 pulsation activity at time periods of quiet and disturbed geomagnetic conditions. Geophysical Observatory Reports (HU-ISBN 978-963-8381-22-4), pp. 101-109.

### Folyóiratban megjelent közlemények

KIS Á., KOPPÁN A., LEMPERGER I., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ J., WESZTERGOM V. 2007: Long Term Variation of the T Geoelectric Activity Index. Pubs. Inst. Geophys. PAS, C-99, pp. 353-360.

BENCZE P., KOPPÁN A., KOVÁCS K., MÁRCZ F., PRODÁN T., SÁTORI G., WALLNER Á., WESZTERGOM V. 2003: Geophysical Observatory Reports 1999-2001. (HU-ISSN 0133-459X), pp. 9-24.

### Konferencia kiadványok

UNGER, Z., TIMÁR, G., PRODÁN, T. H. 2009: The importance of remote sensing in the morpho-tectonical interpretation of Maramureş region. XIII. Congress of Hungarian Geomathematics and the Second Congress of Croatian and

Hungarian Geomathematics; Applications of geostatistics, GIS and remote sensing in the fields of geosciences and environmental protection, Mórahalom, May 21-23, 2009, Abstract Book, pp. 55.

KIS, A., LEMPERGER, I., KOPPAN, A., PRODAN, T., SZENDROI, J., VERO, J., WESZTERGOM, V. 2008: The geoelectric activity index T: five decades of observation at Nagycenk, Hungary. EGU 2008-A-10215, Vienna.

WESZTERGOM V., KIS Á., LEMPERGER I., LICHTENBERGER J., MAGNES W., VELLANTE M., PRODÁN T. 2007: A statistical analysis of simultaneous Pc3 pulsation and whistler activity at Nagycenk Geophysical Observator. Fourth European Space Weather Week, 5-9 November 2007, Brusseles, Abstract Book, p.34.

BENCZE P., KOPPÁN A., KOVÁCS K., LEMPERGER I., LICHTENBERGER J., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ J., WESZTERGOM V. 2006: A napszél és a geomágneses tér közötti energiaátadás változásai. Tudományos Előadások – 2006, MTA VEAB, ISSN 1785-8763, pp. 79-100.

VERŐ J., WESZTERGOM V., BENCZE P., BÓR J., KOPPÁN A., LEMPERGER I., MÁRCZ F., MARTINI D., PRODÁN T., SÁTORI G., SZENDRŐI J., WALLNER Á., ZIEGER B. 2005: INTERMAGNET – globális geomágneses rendszer. Magyar Geofizika, HU-ISSN 0025-0120, 46/3, pp. 111-120.

KOPPÁN, A., KOVÁCS, K., LEMPERGER I., MARTINI D., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ, J., WESZTERGOM, V. 2005: Variability of the T geoelectric activity index. Geophysical Research Abstracts, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, 2005, Volume 7 (ISSN: 1029 – 7006, CD-melléklet)

PRODÁN T. 2003: Villámok, whistlerek és a magnetoszféra. Magyar Geofizikusok Egyesülete, XXXIV. Ifjú Szakemberek Ankétja, 2003. március 21-22., Dobogókő, pp. 29-30.

### Előadások

UNGER Z., TIMÁR G., PRODÁN T. H. 2009: The importance of remote sensing in the morpho-tectonical interpretation of Maramureş region. XIII. Congress of Hungarian Geomathematics and the Second Congress of Croatian and Hungarian Geomathematics; Applications of geostatistics, GIS and remote sensing in the fields of geosciences and environmental protection, Mórahalom, May 21-23, 2009.

KOPPÁN A., NOVÁK A., PRODÁN T. 2008: Naptól a Földig. "Földtudományos Forгатag". Magyar Természettudományi Múzeum, 2008. április 17-20., Budapest.

KIS, A., LEMPERGER, I., KOPPAN, A.; PRODAN, T., SZENDROI, J., VERO, J., WESZTERGOM, V. 2008: The geoelectric activity index T: five decades of observation at Nagycenk, Hungary. EGU General Assembly, 13-18 April 2008, Vienna.

WESZTERGOM V., KIS Á., LEMPERGER I., LICHTENBERGER J., MAGNES W., VELLANTE M., PRODÁN T. 2007: A statistical analysis of simultaneous Pc3 pulsation and whistler activity at Nagycenk Geophysical Observatory. Fourth European Space Weather Week, 5-9 November 2007, Brussels (*poster*)

LEMPERGER I., HEILIG B., KIS Á., LICHTENBERGER J., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VELLANTE M., WESZTERGOM V. 2007: A statistical analysis of simultaneous Pc3 pulsation and whistler activity. XXIV IUGG General Assembly, 2-13 July 2007, Perugia (*poster*)

KIS Á., KOPPÁN A., LEMPERGER I., PRODÁN T., SZENDRŐI J., WESZTERGOM V. 2007: Analysis of long term behaviour of geoelectric activity at Nagycenk Geophysical Observatory. XXIV IUGG General Assembly, 2-13 July 2007, Perugia (*poster*)

KIS A., KOPPÁN A., LEMPERGER I., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ J., WESZTERGOM V. 2007: Long-Term Variation of the Geoelectric Activity Index T. XXIV IUGG, 2-13 July 2007, Perugia (*poster*)

KOPPÁN A., LEMPERGER I., PRODÁN T., SZENDRŐI J., WESZTERGOM V. 2006: Measurement and analysis of geoelectric activity at Nagycenk Geophysical Observatory. XIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Belsk/Poland, June 19-24., 2006. (*poster*)

KOPPÁN A., KOVÁCS K., LEMPERGER I., MARTINI D., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ, J., WESZTERGOM, V. 2005: A T geoelektromos index hosszúperiódusú változása. Geotudományi Ankét, Nagykanizsa, 2005. november 25.

BENCZE P., KOPPÁN A., KOVÁCS K., LEMPERGER I., LICHTENBERGER J., PRODÁN T., SZENDRŐI J., VERŐ J., WESZTERGOM V. 2005: A napszél és a geomágneses tér közötti energiacsatlás változásai. Pannon Tudományos napok, Nagykanizsa, 2005. október 12.

KOPPÁN, A.; KOVÁCS, K.; LEMPERGER I.; MARTINI D.; PRODÁN T.; SZENDRŐI J.; VERŐ, J.; WESZTERGOM, V. 2005: Variability of the T geoelectric activity index. European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, April 24-29., 2005.

VERŐ J., KOPPÁN A., LEMPERGER I., MARTINI D., PRODÁN T., SZENDRŐI J., WESZTERGOM V. 2004: A geomágneses aktivitás változása - a T index 50 éve. XXIV. Ionoszféra- és magnetoszférafizikai szeminárium, Debrecen, 2004. november 16-18.

PRODÁN T. 2003: A villámok utazása - Whistler-kísérletek a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban. Magyar Tudomány Napja, Sopron, 2003. november 3.

PRODÁN T. 2003: Whistlerek és pulzációk. Földi Elektromágnesség Konferencia (Verő '70), Sopron, 2003. június 20-21.

PRODÁN T. 2003: Villámok, whistlerek és a magnetoszféra. XXXIV. Ifjú Szakemberek Ankétja, Dobogókő, 2003. március 21-22.



