

Húsz éves a sopronbánfalvi extenzométer

Mentes Gyula

Bevezetés

Már az 1800-as évek végén készültek deformációmérésére szolgáló extenzométerek. Az első, a mai extenzométerekkel (strainméterekkel) szemben támasztott követelményeknek nagyjából megfelelő berendezést egy amerikai szeizmológus, H. Benioff építette 1932-ben (Benioff, 1935). Fontos tudománytörténeti tény, hogy 1954-ben ezzel a műszerrel sikerült először a Föld 57 perces sajátrezgéseit kimutatnia a kamcsatkai földrengés megfigyelési anyagából, majd ezt követően a sajátrezgések széles spektrumát meghatározni az 1960. május 22-i chilei földrengés extenzométeres regisztrátumaiból (Benioff et al., 1961). Ezek a megfigyelések hatalmas előrehaladást eredményeztek a bolygónk szerkezetének megismeréséhez vezető úton.

Az extenzométereknek a geodinamikai műszerek családján belül – és talán az összes geodéziai, geofizikai műszer között – az az egyedülálló tulajdonságuk, hogy segítségükkel a Föld fizikai folyamatainak igen széles spektruma vizsgálható egyidejűleg, kezdve a hosszúperiódusú földrengéshullámokkal (felületi hullámok) és a sajátrezgésekkel, a földi árapályon keresztül egészen a recens tektonikai folyamatokig. Ugyanakkor a strainméterek széles körben alkalmazhatók a környezetvédelemben és ipari létesítmények mozgásainak megfigyelésére is.

Tudományos szempontból a fentiek alapján született döntés egy extenzométer telepítésére a Sopronbánfalvi Geodinamikai obszervatóriumba. Másik szempont az obszervatóriumban levő magas radongáz koncentráció volt. Emiatt az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat (ÁNTSZ) korlátozta az obszervatóriumban való tartózkodás idejét. Az 1971-től folyó, sok műszerkezelést igénylő horizontális ingaregisztrálásokat

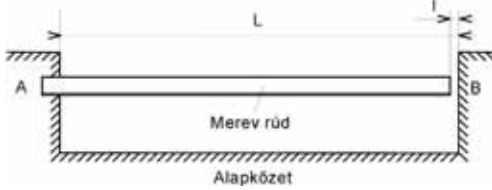
emiatt beszüntettük, és az Orosz Tudományos Akadémia (az akkori Szovjetunió Tudományos Akadémiája) moszkvai Geofizikai Intézetével együttműködve 1990-ben építettünk egy, az akkori Szovjetunióban alkalmazott kvarccsöves extenzométert (Latynina és Karmaleeva, 1978), amelynek kezelése nem igényel havi tíz percnél több benttartózkodást a magas radon koncentrációjú obszervatóriumban. A kvarccsövet és egyéb mechanikai alkatrészeket (pl. összekötő elemeket) a Geofizikai Intézettől kaptuk, míg az elektromos egységek (kapacitív elmozdulásérzékelő, automatikus kalibrálás vezérlő) az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben (GGKI) készültek (Mentes, 1991).

A műszer a telepítés óta folyamatosan működik, mind a regisztrálást, mind pedig a kalibrálást a növekvő pontossági igényeknek megfelelően folyamatosan továbbfejlesztjük. Ezzel értük el, hogy a műszerrel regisztrált folytonos adatsor a világon az egyik (talán a) leghosszabb.

Az extenzométerek elve

A geodinamikai mérésekre szolgáló extenzométerek két földfelszíni pont L távolságának ΔL megváltozását mérik. A szilárd Föld árapálya és a tektonikai mozgások által okozott $e = \Delta L / L$ relatív hosszváltozás (deformáció) nagyságrendje 10^{-8} és 10^{-11} m között van. Az extenzométerekkel mért $\Delta L = e \cdot L$ hosszváltozás annál nagyobb, minél nagyobb a két pont L távolsága. Mivel a vizsgált jelenségek által okozott deformáció igen kicsi, a két pont távolságát a lehető legnagyobbra kell választani, hogy a jelenlegi érzékelőkkel jól mérhető hosszváltozást kapjunk. Ahhoz, hogy a hosszváltozást megmérhessük, a lézernerferométeres mérések kivételével az egyik pont elmozdulását át kell vinni a másik

pont közelébe. Ez rúdextenzométerek estében egy merev rúd vagy cső, huzalextenzométerek esetében invardrót segítségével valósítható meg. Az 1. ábra az extenzométer elvét mutatja, amikor az elmozdulás átvitele az A pontból a B pontba egy merev rúd segítségével történik. Az l távolság mérése, már nagy pontossággal elvégezhető elektromos mérőátalakítók segítségével. Az l változása megegyezik a L távolság ΔL változásával. Az ábrából az is látható, hogy ellentétben más geodéziai és geofizikai műszerekkel az extenzométernek a két végpontja közötti kőzet is része. Ez azt jelenti, ha a kőzetben repedések, törések vannak, akkor a kőzetben fellépő mechanikai feszültség hatására a kőzet másképp mozog, mintha folytonos lenne. Ezek a kőzethibák geodinamikai megfigyelésekre teljesen alkalmatlanná is tehetik a műszert.

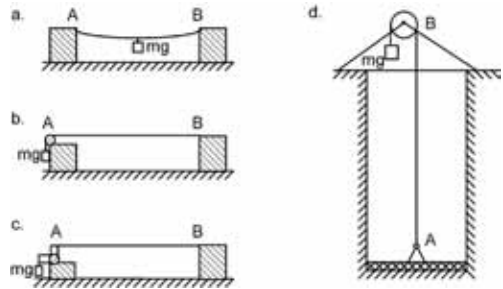


1. ábra Extenzométerek elve

Az extenzométereknek három típusát különböztetjük meg:

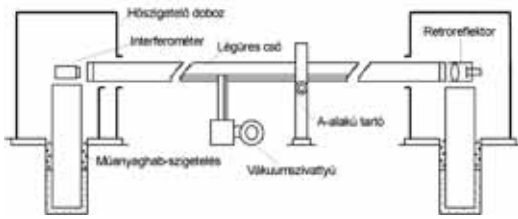
1. Rúdextenzométerek, amelyek elve az 1. ábrán látható. Ezek a műszerek általában invar (hőtágulás szempontjából invariáns, érzéketlen) vagy kvarc csőből készülnek, mivel a cső jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a rúd és tömege is kisebb. A kvarc előnyösebb, mint az invar, mivel a kvarc hőtágulása közelebb van a kőzethez, ezért a rúd és az extenzométer két végpontja közötti kőzet távolsága közel azonos mértékben változik, és ezáltal a hőmérsékleti hiba kicsi. Ugyanez pl. nem mondható el a lézinterferométeres extenzométerekről. Jelenleg a rúdextenzométerek rendelkeznek a legjobb tulajdonságokkal.
2. Huzal extenzométerek, amelyeknél invardrótot használnak a távolságváltozás

mérésére. E műszerek közös jellemzője, hogy az invardrótot $m \cdot g$ súlyerő feszíti és az extenzométer bázisvonalának hosszváltozását a feszítőtömeg elmozdulásának mérésével lehet meghatározni. A 2. ábra néhány jellegzetes megoldást mutat be. Az a, b, és d ábrákon a tömeg elmozdulását közvetlenül mérik, míg a c ábrán egy karos áttétellel mechanikai nagyítást is alkalmaznak. E műszerek hátránya, hogy feszítés hatására az invardrót folyamatosan nyúlik és a műszer nem kompenzálja a kőzet hőmérsékleti tágulását. A huzal nyúlása nagyon lassú és kismértékű, ezért hosszúidejű tektonikai mozgásmonitorozás esetében a két hosszváltozás nem választható szét.



2. ábra Huzal extenzométerek elve

3. A lézinterferométeres extenzométerek tulajdonsága, hogy a lézer koherenciahosszának megfelelően nagyobb távolságok (néhány 100 m) is ugyanakkora felbontóképességgel és pontossággal ($1/4$) mérhetők. Geodinamikai mérésekhez a lézer hullámhosszát még néhány századrészre alá kell osztani a megfelelő pontosság elérése érdekében. Hátrányuk, hogy nagyon érzékenyek a légnyomás változásaira, ezért a lézersugár többnyire vákuumcsőben terjed. Ebben az esetben a lézer csatlakoztatása a kőzethez bonyolult teleszkópos rendszerrel történik (3. ábra). Újabban megjelentek a szál-optikás interferométerek is. Ezeket jelenleg a kisebb érzékenységük miatt még csak az ipari deformációmérésben alkalmazzák (Brunner, 2009).



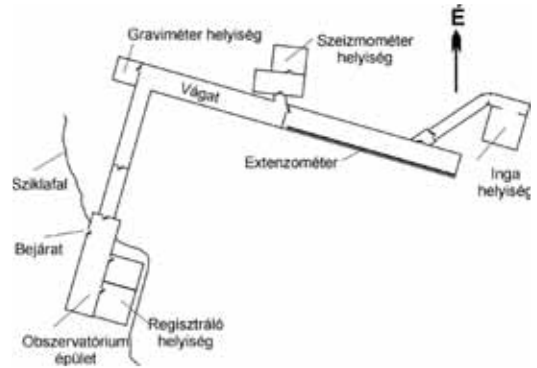
3. ábra Lézerinterferométeres extenzométer elve (Agnew, 1986)

A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatórium

Az obszervatórium Sopron központjától kb. 5 km távolságra Sopronbánfalván, Sopron kertvárosában, az Alpok keleti lábánál helyezkedik el. Koordinátái: északi szélesség $47^{\circ}40'55''$; keleti hosszúság $16^{\circ}33'32''$; tengerszint feletti magasság 220 m. Az obszervatórium gneiszben kialakított mesterséges vágat, amely felett kb. 60 m kőzet helyezkedik el. Az obszervatórium épületét az 4. ábra, alaprajzát az extenzométer elhelyezkedésével együtt pedig a 5. ábra mutatja. Az extenzométer hermetikusan lezárt vágatrészben helyezkedik el, a megfelelő hőmérsékletstabilitást a 3 ajtóts zsiliprendszer biztosítja. Az éves hőmérsékletváltozás az extenzométernél kisebb mint $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg a napi változás $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt van.



4. ábra A sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatórium épülete

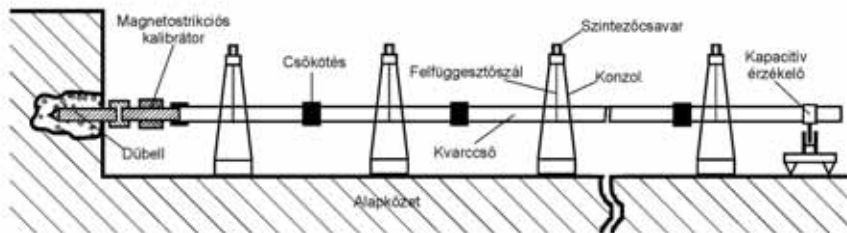


5. ábra A sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatórium alaprajza

A sopronbánfalvi extenzométer

Az extenzométer felépítése

Az extenzométer felépítése a 6. ábrán látható. A 22 m hosszúságú extenzométer 2–2,5 m hosszúságú, 45 mm átmérőjű és 2 mm falvastagságú kvarccsövekből áll, amelyek speciális kötéssel csatlakoznak egymáshoz. A csőkötés három invar profillemmezéből áll, amelyeket csavarok fognak össze. A lemezek, valamint a kvarccsövek között kétkomponensű ragasztó, kvarchomok és cement keveréke van, ami rendkívül szilárd és stabil kötést biztosít (Mentes, 1991, 2010). Az összeerősített kvarccsővet 2–3 méterenként elhelyezett konzolok tartják $20\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjű, kb. 25 cm függőleges belógású invar huzalok segítségével. A konzolokon található szintezőcsavar a cső vízszintessé tételére szolgál. A kvarccső egyik vége egy magnetostrikciós elmozdulásadóhoz (kalibrátor) kapcsolódik, amely az alapkőzetbe erősített rozsdamentes acélból készült csaphoz (dűbel) csatlakozik. A cső másik vége szabad. Ezen a végen helyezkedik el a differenciál kondenzátoros elmozdulás érzékelő középső lemeze, amely az alapkőzethez fixen rögzített állólemezek között mozog. A vékony és elegendően hosszú felfüggesztőszálak könnyen hajlanak és nem akadályozzák a cső szabad mozgását, így az alapkőzetbe erősített csap mozgása akadályoztatás nélkül jut el a kapacitív mérőátalakítóhoz, amely a horizontális ingánál alkalmazott érzékelő továbbfejlesztett változata (Mentes, 1983, 2010). A kapacitív érzékelő kimenő jelét egy 24 bites A/D konverter



6. ábra Az extenzométer felépítése

(PREMA Digital Multiméter 5017 és 5017SC 48 csatornás analóg multiplexer) segítségével digitalizáljuk és számítógépen regisztráljuk. Az adatok interneten keresztül lekérdezhetők.

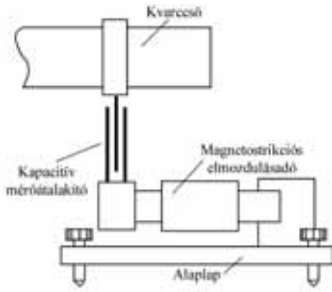
Az extenzométer kalibrálása

Az igen kicsi geodinamikai deformációk megbízható mérése céljából a műszernek igen stabilnak kell lenni. Különösen az igen lassú tektonikai deformációk választhatók el nehezen a műszerparaméterek lassú, hosszúidejű változásaitól (drift), ami a műszer helyes működésének állandó ellenőrzését követeli. Ebből a célból építettük be a műszerbe a magnetosztatikus kalibráló egységet (ld. 6. ábra). A beépített kalibrátor egy permendúr magos tekercs, amelyre adott áramot kapcsolva a permendúr mag megváltoztatja hosszát, ezáltal a kvarccsövet kismértékben elmozdítja, amit a kapacitív érzékelő regisztrál. Naponta 5 perc időtartamra szigorúan konstans (150 mA) áramot kapcsolva a tekercsre, a regisztrált impulzus amplitúdójából következtetni lehet a műszer paramétereinek változására. Ez az ellenőrzési mód csak a cső, illetve az elektronika stabilitásának ellenőrzésére alkalmas. Mivel magának a beépített kalibrátornak a paramétere is változhatnak, ezért az extenzométer in-situ, obszervatóriumi kalibrálására már a 1992-től kezdődően komoly erőfeszítéseket tettünk. A lézinterferométerek felbontóképessége 0,1 μm , ezért meg kellett oldanunk az interferométer felbontóképességének alósztasztását, hogy nm (10^{-9} m) nagyságrendű elmozdulásokat is megbízhatóan tudjunk mérni. Ebből a célból egy függőleges tengely körül forgó vízszintes kar segítségével 1:5 áttételű mechanikai nagyítást alkalmaztunk. A kar elfordulását a kar

két végén elhelyezett differenciálkondenzátoros mérőátalakítóval mértük, amely módszerrel a tengelyhibák és a környezeti paraméterek változása miatt fellépő hibák kiejthetők lettek. A berendezést lézinterferométerrel nagy léptékben kalibrálva és kihasználva a kapacitív érzékelő karakterisztikájának linearitását, valamint a kapacitív érzékelő igen nagy felbontóképességét a nm nagyságrendű elmozdulásokat megbízhatóan tudtuk mérni (Mentes, 1993, 1995, 1998, 1999a).

A berendezést úgy készítettük el, hogy mind a magnetosztatikus tekercsek beépítés előtti laboratóriumi kalibrálására, mind pedig az extenzométerek obszervatóriumi kalibrálására is alkalmas legyen. Ezzel a módszerrel elsőként sikerült az extenzométerek megbízható in-situ kalibrálását megoldanunk. E kalibrálóberendezéssel sikerült elsőként a Pannon-medence extenzométereinek [Sopronbánfalva, Budapest, pécsi uránbánya, bakonyai 3D extenzométeres állomás, Vyhne (Szlovákia)] egységes kalibrálását megoldanunk, ami lehetővé tette az extenzométeres adatok egységes értelmezését a tektonikai mozgásvizsgálatok szempontjából. Ez a berendezés két hátrányos tulajdonsággal rendelkezett. Egyrészt nagy volt a helyigénye, ami megnehezítette a különböző extenzométerekhez való csatlakoztatását, másrészt a forgó kar csatlakoztatása az extenzométerhez komplikált volt. Ennek ellenére a kalibrálás hibája 5%-ot nem haladta meg. E berendezés hátrányainak kiküszöbölésére 2007-ben egy új kalibráló berendezést fejlesztettünk ki, amelynek elve a 7. ábrán látható.

Az új kalibráló berendezés egy talpcsavarokkal vízszintesbe állítható merev alaplaphoz erősített magnetosztatikus elmozdulásadóból áll, amelyek



7. ábra A hordozható magneosztrikciós kalibrátor elve

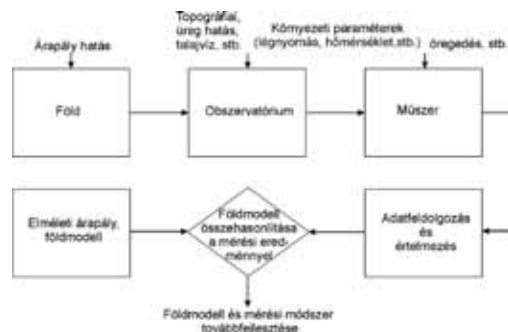
szabad, mozgó vége tartja a differenciálkondenzátoros kapacitív mérőátalakító állólemezeit. A differenciálkondenzátor mozgó középső lemeze, pedig az extenzométer csövéhez csatlakozik. Az extenzométer saját, és a kalibráló berendezés kapacitív érzékelőjével párhuzamosan regisztráljuk az extenzométer szabad végének elmozdulását. A hordozható kalibrátort minden obszervatóriumi kalibrálás előtt és után laboratóriumban lézérinterferométerrel kalibráljuk. A laboratóriumi kalibrálás a Mentés (2008a, 2010) által leírt módon történik, amelynek során mind a hordozható kalibrátor karakterisztikáját, mind pedig az elmozdulásimpulzusok mértékét nagy pontossággal meghatározzuk. A karakterisztikából a hordozható kalibrátor skálatényezője meghatározható, amelynek értéke $1,206 \pm 0,002$ nm/mV.

Ezzel a megoldással az extenzométer kétféle módon kalibrálható. Az első módszer esetében az extenzométer beépített kalibrátorának impulzusait a hordozható kalibrátorral és az extenzométer saját elektronikájával is regisztráljuk és a hordozható kalibrátor skálatényezőjének segítségével a beépített kalibrátor elmozdulását meghatározzuk. Ennek értéke $2,093 \pm 0,032$ nm/mV. A másik módszer szerint az extenzométer saját és a hordozható kalibrátor kapacitív érzékelőjével hosszabb ideig párhuzamos árapályregisztrálást végzünk és a két görbe korrelációjával az extenzométer skálatényezője (érzékenysége) meghatározható. Az így kapott érték $2,119 \pm 0,019$ nm/mV. Látható, hogy a két különböző módon kapott érték a hibahatáron belül megegyezik. Ez utóbbi módszer, olyan rúdextenzométerek kalibrálására is alkalmas, amelyeknek nincs beépített kalibrátora, sőt e módszerrel huzalextenzométerek is kalibrálhatók. Az új

berendezés segítségével a kalibrálás pontosságát kb. egy nagyságrenddel sikerült megjavítani.

Környezeti paraméterek hatása az extenzométeres mérésekre

Az extenzométerek a közet deformációját mérik. A geodinamikai eredetű deformációk mellett azonban más deformációk, pl. a környezeti paraméterek (hőmérséklet, légnyomás, talajvízszint ingadozások stb.) is hatnak a műszerre. Ez a hatás lehet közvetlen vagy közvetett. A közvetlen hatások a műszer paramétereit közvetlenül befolyásolják, míg a közvetett hatások az obszervatórium környezetében közetdeformációt okoznak, ami a vizsgálandó geodinamikai jelenség mérését pontatlanná teszi. Ezekon kívül a geodinamikai deformációk mértékét jelentősen befolyásolhatják pl. az obszervatórium és környezetének topográfiája (topográfiai hatás), az üreghatás stb. Az üreghatás azt jelenti, hogy az obszervatórium nem úgy deformálódik, mintha eredeti közzel lenne kitöltve. Ez a hatás a műszer elhelyezésével csökkenthető, illetve végeelem módszerrel elemezhető és valamilyen mértékben korrigálható. Az árapálymérések pontosságát befolyásoló hatások az árapálykutatás folyamatát bemutató 8. ábrán láthatók. Az árapály kutatás célja, hogy egyre pontosabb mérési módszerekkel, a környezeti hatások hatékony kiküszöbölésével, ill. korrekciójával, a kiértékelési eljárások tökéletesítésével hozzájáruljon egy pontosabb földmodell kidolgozásához. A mérési módszerek fejlesztése mellett ezért kiemelkedő szerepet játszik a környezeti paraméterek hatásának elemzése.



8. ábra Extenzométeres árapály mérések blokkvázlata

A hőmérséklet hatása

Mivel az extenzométer környezetében a hőmérséklet éves ingadozása $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt van, a hőmérséklet direkt hatása elhanyagolható, amit a mérések is igazolnak. Az obszervatóriumban levő, közel állandó hőmérséklet mellett ennek egyik oka, hogy az extenzométer elektronikája hőfokstabilizált. Másik oka pedig az hogy az extenzométert nem nulla hőtágulású invarból, hanem kvarccsövel építettük fel. A külső hőmérséklet változása közvetett módon, az obszervatórium környezetében levő kőzet deformációja révén jelentkezik. A külső hőmérséklet hosszúidejű hatását éves adatsorokon korreláció analízis segítségével vizsgáltuk. A nyers extenzométer és hőmérséklet adatsorokat korrelálva azt tapasztaltuk, hogy a korrelációs együttható értéke $0,830$ és $0,880$ között van. Mindkét adatsort 14 napos mozgó átlagoló szűrővel simítva a korrelációs együtthatók értéke $0,900$ és $0,920$ közé esett. 28 napos mozgóátlagolás esetén a korrelációs együttható tovább javult és értékei $0,920$ és $0,940$ közé estek. A legtöbb esetben a két görbe közötti legjobb egyezést akkor kaptuk, amikor az extenzométer és a hőmérséklet adatsort egymáshoz képest 18 nappal eltoltuk. Ekkor a korrelációs együtthatók értéke $0,950$ és $0,970$ közé esett. Az extenzométer érzékenysége a hosszúidejű hőmérsékletváltozásokra: $0,02\text{ nstr}/^{\circ}\text{C}$ ($1\text{ nstr} = 10^{-9}$ relatív hosszváltozás vagy deformáció).

Ezek a vizsgálatok azt mutatják, hogy az extenzométer a külső hőmérséklet gyors változásaira sokkal kevésbé érzékeny, mint a lassú, hosszúperiódusú változásra és az extenzométer kb. 18 napos késéssel követi a külső hőmérséklet változásait (Mentes, 2000). Mivel az extenzométer a külső hőmérséklet gyors változásait nem követi, ezért a hőmérséklet változása a rövid periódusú (napos, félnapos) árapályhullámok regisztrálására nincs hatással. A tektonikai mozgásvizsgálatokhoz szükséges hosszú regisztrációs időtartam miatt, az éves periódusú hőmérsékleti hatás az adatsorból egyszerűen kiszűrhető.

A légnyomás hatása

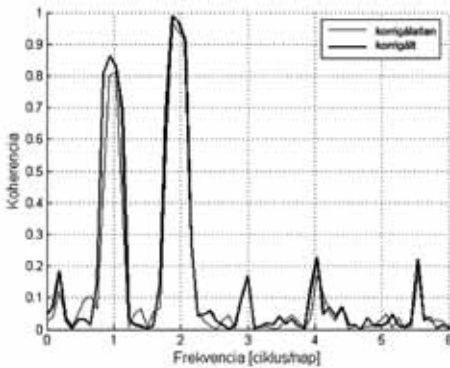
A légnyomás direkt hatása az extenzométer felépítéséből következően elhanyagolható (Mentes,

1999b). A légnyomás közvetett hatása már sokkal bonyolultabb, mint a hőmérsékleté, mivel az obszervatóriumtól nagy távolságra történő légnyomásváltozások kőzetdeformáló hatása is érzékelhető a műszerrel (Van Dam és Wahr, 1987). A légnyomás hatását csak az árapálytartományban vizsgáltuk, mivel a tektonikai mozgásmonitorozás esetében a szezonális változás a hőmérséklet hatásához hasonlóan kiszűrhető. Koherencia és regresszió analízissel azt kaptuk, hogy a légnyomásváltozás által okozott deformáció átlagosan $4,4\text{ nstr/hPa}$ és kismértékben függ a vizsgált árapály frekvenciatartománytól (Eperné és Mentes, 2002), valamint az évszakoktól (Mentes és Eper-Pápai, 2009). Az extenzométer által mért deformációváltozás kb. $0-3$ órával előzi meg a helyi légnyomásváltozást. Vizsgálataink szerint az eddigieknél jobb módszerek kidolgozására van szükség a légnyomás korrekciójának meghatározása érdekében.

Obszervatórium-extenzométer rendszer vizsgálata

Mivel extenzométerek esetében a kőzet is része a műszernek, valamint az egyéb környezeti hatások mellett az obszervatórium kialakítása (üreghatás) és környezetének topográfiája is befolyásolja a műszerrel mért értékeket célszerű a teljes obszervatórium-extenzométer rendszer (ld. 8. ábra) átviteli tulajdonságainak együttes vizsgálata. Erre a célra a koherencia analízist alkalmaztuk. A (Föld)-obszervatórium-extenzométer rendszer bemenő jelének az elméleti árapály adatsort tekintettük, amelyet az ETERNA 3.40 programcsomag PREDICT programjával állítottunk elő (Wenzel, 1996). Kimenőjelként első esetben az extenzométerrel mért adatsort, második esetben a hőmérséklettel korrigált mért adatsort és harmadik esetben, pedig a légnyomással korrigált adatsort vettük. A különböző esetekben a be- és kimenőjel koherenciáját a 9. ábra mutatja. A vékony vonallal jelölt görbe a korrelálatlan extenzométeres adatok esetében mutatja a koherenciát. A napos árapályhullámok esetében a koherencia értéke csak $0,8$, míg a félnapos hullámok esetében $0,95$. Az adatokat a hőmérséklettel korrigálva

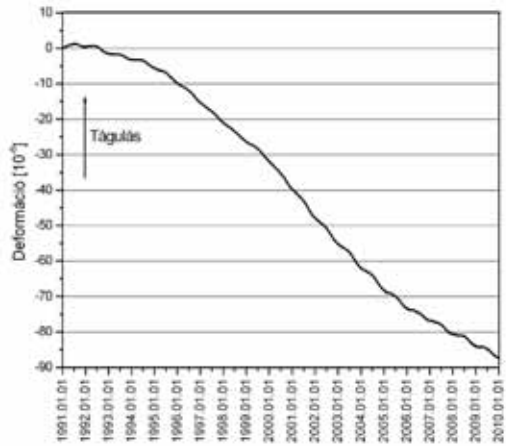
gyakorlatilag a vékony vonallal jelölt görbét kaptuk, amit külön nem ábrázoltunk. Ez azt jelenti, hogy az obszervatórium-extenzométer rendszer nem érzékeny a külső hőmérséklet változásaira a napos és félnapos frekvenciasávban. Ez az eredmény megegyezik a regressziós analízissel kapott eredményekkel is. A barometrikus korrekcióval ellátott extenzométeres adatok esetében a korrekció a félnapos tartományban jobb eredményt hozott, mint a napos tartományban, ahogy azt a vastag görbe mutatja. A koherencia vizsgálatok eredménye szerint az obszervatórium megfelelő hely a műszer számára és az extenzométer is jól működik. A napos tartományban kisebb átvitel oka még tisztázásra szorul. Ebben a frekvencia tartományban az árapály kiértékelésekből kapott zajszint (0,4–0,5 nstr.) is nagyobb, mint a félnapos tartományban (0,19–0,22 nstr.).



9. ábra A koherencia analízis eredményei

Mérési eredmények

Az 1991 és 2009 között mért nyers adatokat mikrostráinben a 10. ábra mutatja. Az ábrán jól láthatók a kismértékű szezonális változások, amelyek a külső hőmérséklet változásának eredményei.



10. ábra Az 1991 és 2009 között mért extenzométeres adatok

A görbe változó meredekségének oka a tektonikai mozgások nem állandó sebessége, amely a sopronbánfalvi extenzométer esetében a pannóniai lemez mozgásának és az Alpok emelkedésének kölcsönhatásából eredhet. A tektonikai mozgásvizsgálatokat részletesen elemzi Mentés (2001, 2008).

Az adatok árapály-feldolgozása az ETERNA 3.40 programcsomag ANALYZE programjával történt. Az ETERNA 3.40 az ETERNA 3.30 továbbfejlesztett változata. A program számítja az elméleti árapályt, az egyes hullámokra az amplitúdó faktorokat (mért amplitúdó/elméleti amplitúdó), valamint az egyes mért árapály hullámok fáziseltolását (sietését) az elméleti hullámokhoz viszonyítva. Az 1. táblázat példaképpen a 2009. évi adatok kiértékelésének eredményét mutatja a két legfőbb lunáris, a félnapos M2 és a napos O1 hullámra. E két hullám a legalkalmasabb az extenzométeres mérések összehasonlítására, mivel a szoláris hullámokat egyéb hatások is zavarják. Az éves kiértékelésekből kapott amplitúdó faktorok és fázisok, valamint ezek szórásai

A 2009 évi extenzométer adatokból számított árapály paraméterek

Frekvencia		Hullám	Elméleti amplitúdó	Ampl. faktor ± szórás	Fáziseltérés ± szórás
tól	ig				
[ciklus/nap]	[ciklus/nap]		[nstr]		[fok]
0.911391	0.947991	O1	6.5937	0.63±0.05	-12±5
1.914129	1.950419	M2	5.0573	1.16±0.03	-17±2

1. táblázat

A 2000 és 2009 között mért adatokból számított amplitúdó faktorok

Hullám	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Átlag ± szórás
O1	0.686	0.652	0.687	0.724	0.716	0.695	0.691	0.735	0.692	0.626	0.690 ±0.03
M2	1.087	1.144	1.212	1.186	0.959	1.129	1.292	1.236	1.268	1.163	1.168±0.10

2. táblázat

jó egyezést mutatnak a többi obszervatóriumban kapott eredményekkel (pl.: Arnoso et al., 1998; Timofeev et al., 2000).

Összehasonlításképpen a 2. táblázat megadja a 2000 és 2009 között mért adatokból számított amplitúdófaktorokat. A korábbi évek azért nem szerepelnek a táblázatban, mivel 2000-ben álltunk át a 24 bites adatgyűjtésre és így azonos pontosságú adatokat lehet összehasonlítani.

Az O1 naphullám amplitúdófaktorainak 1-nél kisebb értéke egyrészt az obszervatórium-műszer rendszer átviteli tulajdonságaiból adódik, amint azt a koherenciavizsgálat eredményei is mutatják (9. ábra). Másrészt, mind az O1, mind pedig az M2 hullámok esetében további hibát okozhat, hogy az ETERNA 3.40 programcsomag extenzométeres mérésekre nincs kalibrálva. Az extenzométerrel mérhető deformációk nagymértékben függenek az obszervatórium környezetének geológiájától és topográfiájától is. Valószínű ezzel magyarázható, hogy más obszervatóriumokban is hasonló pontosságú értékeket kapnak. Az árapálymérés esetében további problémát okoz, hogy a műszer kb. 30 méter távolságban helyezkedik el az obszervatórium meredek sziklafalától és arra csaknem merőleges, így közvetlenül érzékeny a sziklafalra ható szélleőkésekre is. Ezt a hatást, a jénai Friedrich Schiller Egyetem Alkalmazott Geofizikai Intézetével együttműködve, végelem modellezéssel is sikerült bizonyítani (Gebauer et al., 2010). Ez utóbbi hatás a tektonikai mozgásvizsgálatokat nem zavarja, mivel kiszűrhető.

Összefoglalás

A Sopronbánfalvi Geodinamikai Obszervatóriumban elhelyezett extenzométerrel a világon az egyik leghosszabb összefüggő adatsort lehetett regisztrálni. Ez a műszer rendszeres

ellenőrzésének, a regisztrálás és a kalibráló módszer folyamatos továbbfejlesztésének, valamint a környezeti hatások korrekciójára tett erőfeszítéseknek köszönhető. Mind a műszer rendszeres kalibrálása, mind pedig az árapály-kiértékelés eredményei azt mutatják, hogy a műszer megbízhatóan regisztrálja az igen kismértékű és lassú tektonikai mozgásokat. Az eredmények további javítása érdekében új, az eddigieknél hatásosabb barometrikus korrekcióra van szükség. A helyi geológiai és topográfiai sajátosságok figyelembevételével a mérési eredmények tovább javíthatók és talán elérhető, hogy az obszervatórium-műszer rendszer átvitele a naphullámok tartományában is közel egy legyen.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett munka egy része az OTKA 71952 számú projekt keretében készült. A szerző köszönetet mond *Eperné Pápai Idikónak* az adatok elő- és árapály-feldolgozásában nyújtott munkájáért, valamint *Molnár Tibornak* az extenzométer felügyeletéért és karbantartásáért, a kalibrálásokban nyújtott segítségével.

Irodalom

- Agnew, D.C. (1986): Strainmeters and tiltmeters. *Reviews of Geophysics*, 24: 579-624.
- Arnoso, J., Weixin, C., Vieira, R., Shiling, T., Vélez, E.J. (1998): Tidal Tilt and Strain Measurements in the Geodynamics Laboratory of Lanzarote. (Szerk.: Ducarme, B., Plâquet, P), *Proceedings of the 13th International Symposium on Earth Tides*, Brussels, 149-156.
- Benioff, H. (1935): A linear strain seismograph, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25: 283-309.
- Benioff, H., F. Press, F., Smith, S. (1961): Excitation of free oscillations of the Earth by earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 66: 605-619.
- Brunner, F.K. (2009): Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie? *Fermessung & Geoinformation*, 97: 335-342.

- Eperné, P.I., Mentés, Gy.* (2002): The effect of atmospheric pressure on strain measurement at the Sopron Observatory, Hungary. Bulletin d'Informations Marees Terrestres, Bruxelles, 137:10901-10906.
- Gebauer, A., Steffen, H., Kroner, C., Jahr, T.* (2010): Finite element modelling of atmosphere loading effects on strain, tilt and displacement at multi-sensor stations. Geophys. J. Int. [doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04549.x], 181(3):1593-1612.
- Latynina, L.A., Karmaleeva, R.A.* (1978): Deformograficeszkije izmerénijá. Nauka, Moszkva.
- Mentes, Gy.* (1983): Capacitive transducers for horizontal pendulums and gravimeters, Acta Geod. Geoph. Mont. Hung., 18: 359-368.
- Mentes, Gy.* (1991): Installation of a quartz tube extensometer at the Sopron Observatory, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, Bruxelles, 110: 7936-7939.
- Mentes, Gy.* (1993): Sort remarks concerning the calibration of quartz tube extensometers, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, Bruxelles, 115: 8467-8471.
- Mentes, Gy.* (1995): In-situ calibration of quartz tube extensometers, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, Bruxelles, 121: 9070-9075.
- Mentes, Gy.* (1998): Calibration of tidal instruments. In Ducarme, B. Plâquet, P. (Eds.): Proceedings of the 13th International Symposium on Earth Tides, Brussels, 43-50.
- Mentes, Gy.* (1999a): Extenzométeres adatok megbízhatóságának növelése a műszerek egységes kalibrálásával. Geomatikai közlemények I: 11-20.
- Mentes, Gy.* (1999b): Folyamatos mérési módszerek geodinamikai, környezeti és ipari deformációk megfigyelésére. MTA doktori értekezés, MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron, 173 p.
- Mentes, Gy.* (2000): Influence of Temperature and Barometric Pressure Variations on Extensometric Deformation Measurements at the Sopron Station. Acta Geod. Geoph. Hung, 35(3): 277-282.
- Mentes, Gy.* (2001): Results of Extensometric Measurements at the Sopron and Pécs Stations in Hungary. Journal of Geodetic Society of Japan, 47(1): 101-106.
- Mentes, Gy.* (2008a): A new method for in-situ calibration of rod extensometers. Bulletin d'Informations Marees Terrestres, 144: 11569-11573.
- Mentes, Gy.* (2008b): Observation of recent tectonic movements by extensometers in the Pannonian Basin, Journal of Geodynamics, [doi:10.1016/j.jog.2007.10.001], 45: 169-177.
- Mentes, Gy., Eper-Pápai, I.* (2009): Relations between microbarograph and strain data. Journal of Geodynamics, [doi:10.1016/j.jog.2009.09.005], 48: 110-114.
- Mentes, Gy.* (2010): Quartz tube extensometer for observation of Earth tides and local tectonic deformations at the Sopronbánfalva Geodynamic Observatory, Hungary. Review of Scientific Instruments, [doi:10.1063/1.3470100], 81: 074501-1-074501-6.
- Timofeev, V., Ducarme, B., Semibalamut, V., Ribushkin, A., Fomin, Y., Vandercoilden, L.* (2000): Tidal analysis of strain measurements in southwest part of baikal rift. Bulletin d'Informations Marees Terrestres, 133: 10459-10472.
- Van Dam, T.M., Wahr, J.M.* (1987): Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: effectson gravity and baseline measurements. J. Geophys. Res. 92 (B2): 1281-1286.
- Wenzel, H.G.* (1996): The nanogal software: earth tide data processing package ETERNA 3.30. Bulletin d'Informations Marees Terrestres, 124 : 9425-9439.

Summary

The Sopronbánfalva extensometer is twenty years old

In May, 1990 a quartz tube extensometer was installed in the Sopronbánfalva Geodynamic Observatory of the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. The high sensitive instrument (its scale factor is 2.093 ± 0.032 nm/mV) is used for Earth's tide recording and for monitoring local tectonic movements. The developed high precision in-situ calibration device and method ensure the high reliability of the recorded data. Results of the tidal and tectonic evaluation of the 18 year long continuous data series measured by the extensometer prove the high quality of the instrument.



Dr. Mentés Gyula
tudományos
főosztályvezető

MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet
mentes@ggki.hu