Invarszintezőlécek kalibrálása a soproni Geodézia és Geofizikai Intézetben¹: 40 év fejlesztései és tapasztalatai

Orbán Aladár – Bánfi Frigyes – Horváth Attila – Papp Gábor

DOI: [10.30921/GK.72.2020.5.1](https://doi.org/10.30921/GK.72.2020.5.1)

Absztrakt: A cikk első részében röviden bemutatjuk a digitális szintezőműszerek történetét, a szintezőlécek komparálásának és kalibrálásának módszereit, valamint a Müncheni Műszaki Egyetem által alkalmazott kalibrálási eljárásokat. A második részben tárgyaljuk a soproni Geodéziai és Geofizikai Intézetben az elmúlt negyven évben lezajlott fejlesztések legfontosabb mérföldköveit és részleteit. Ezek a fejlesztések az 1970-es években kezdődtek egy hordozható (terepi) léckomparátor elkészítésével, és végül egy automatikus, számítógép vezérelt lézerinterferometrikus kódléckalibráló berendezés megépítéséhez vezettek mintegy tíz évvel ezelőtt. Az utolsó részben ennek a rendszernek a leírása olvasható néhány kalibrálási eredmény elemzésével egyetemben.

Abstract: In the first part of the paper a short review on the history and capabilities of digital levelling devices, the methods of staff comparison and staff calibration, and calibration solutions applied at the Technical University Munich is given. In its second part the most important milestones and details of the related developments done at the Geodetic and Geophysical Institute Sopron in the last forty years is shown. These developments started in the 1970s with the portable levelling staff comparator and led to the automatic computer-controlled laser interferometer device improved for bar coded levelling staff calibrations at the end of the first decade of this century. Finally a detailed description of the system and the analysis of some calibration results close this review study.

Kulcsszavak: szintezőlécek komparálása és kalibrálása, hordozható léckomparátor, lézerinterferometrikus kódléckalibráló

Keywords: levelling staff comparison and calibration, portable levelling staff comparator, laser interferometer comparator for bar coded levelling staff calibration

Bevezetés

Mind a hagyományos, mind a digitális szintezőműszerek mérési felbontóképességének javulásával, valamint a felsőrendű- és ipari geodéziai munkák pontossági követelményeinek növekedésével együtt járt annak igénye, hogy az invarszalagos felsőrendű szintezőlécek (legyenek akár metrikus, akár kódbár osztásúak) osztás-pontosságát is ellenőrizzék. Egy invarszalagos lécc azonban nem pusztán osztással ellátott „fadarab”, mivel a skálázott fémszalagot (vas-nikkel ötvözet: FeNi36) rugós feszítő-rendszer segítségével állandó hosszanti irányú erőhatásnak teszik ki a szalag felületének hullámosodását elkerülendő. Fémházas lécek esetén a ház anyagának az invarétól különböző hőtágulása miatt arról is gondoskodni kell, hogy az így megváltozott húzóerő hatását csökkentsék. Széleskörű tapasztalat bizonyítja (pl. Staiger – Witte 2005), hogy az invarszalag

hosszában változások keletkezhetnek, ha a léccet szállítás vagy használat közben valamilyen nem kívánt, durva erőhatás éri. Ez egyrészt az invar ütésre érzékeny anyagszerkezetéből adódik, másrészt a behatások következtében megváltozhat a szalagfeszítő erő, pl. a szalagház deformációja miatt. De bármilyen gondosan is készítik el és kezelik később egy léccet, az anyag öregedése és a környezeti hatások miatt a lécméter rendszeres meghatározása és a lécosztások vizsgálata a szintezési munkák minőségbiztosítása érdekében elkerülhetetlen.

A lécosztások pontossági vizsgálatát régebben komparálásnak nevezték, mert egy méteretalon hosszát hasonlították össze a lécen lévő osztások távolságaival. Az etalont fizikailag és mérésre alkalmas módon megtestesítő eszközt komparátornak nevezték.

A kalibrálás fogalma a metrológia tudománya szerint azonban ennél sokkal többet jelent, hiszen a kalibrálás olyan tevékenységek összessége, amellyel meghatározzuk az összefüggést a mérőeszköz által szolgáltatott mérési eredmény, valamint a mérendő

mennyiség valódi (hitelesnek tekintett) értéke között. Ehhez a kalibráláshoz használt eszköz, mint ún. használati etalon rendszeres, nemzetközileg elfogadott (standardizált) etalonokon és állandókon alapuló és nemzetközi szabványoknak megfelelő hitelesítése szükséges.

Ha a mérendő mennyiség a szintezőlécen lévő skála osztásainak valamely arra alkalmas kezdőponttól vett távolsága, akkor léckalibrálásról beszélünk. A fentieknek megfelelően ebben a cikkben először a komparálásról lesz szó, majd az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetében 1995 és 2006 között létrehozott Kalibráló Laboratórium akkreditációjának megfelelően a kalibrálásról.

A léckomparálás hazai történetének rövid áttekintése

Hazánkban az első korszerű léckomparátort Pusztay Ferenc tervezte (Regöczy 1957), amelynek hitelesített hossza 1m volt. A léckomparálás a BGTV budapesti laboratóriumában, légkondicionált

¹ A soproni intézet jelenlegi teljes neve Eötvös Loránd Kutatóhálózat Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet.

körülmények között történt, a komparátor alatt elhelyezett lécek fokozatos továbbmozdításával. Az ilyen komparálásoknak az volt a hátránya, hogy a terepi méréseket hosszabb időre meg kellett szakítani, és a léceket a komparáló laboratóriumba kellett szállítani.

Elméleti vizsgálatok (pl. Alpár 1969) és a gyakorlati tapasztalatok alapján ennek a problémának a kiküszöbölésére az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben javaslat született arra, hogy miként lehetne a komparálást a terepen is elvégezni. A megoldás egy 0,5 m-es, magára a szintezőlécre helyezhető komparátor volt, amelyet a lécen, vagy a lécek ládáján kialakított mérőpályán szakaszosan tovább lehetett mozgatni (Halmai 1978). Az utóbbi esetben a lécek a komparátor alatt, a ládában feküdtek. A terepi komparálásnál a legnagyobb problémát a fellépő kedvezőtlen hőhatások jelentették. Ennek minimalizálására a 0,5 m-es távolságot kijelölő két végelet egy elhanyagolható, még az invarnál is kisebb hőtágulású kerámiarúd két végére ragasztották fel. A jelek pontos távolságát az Országos Mérésügyi Hivatalban állapították meg, így ún. használati etalonként funkcionáltak. A komparátort a Magyar Optikai Művekben gyártották le. A megfigyelő berendezéshez szükséges optikai elemeket egy invarból készült optikai padocszkára helyezték, amellyel az etalonjelek és a lécosztás jeleinek távolságát mikrométer segítségével lehetett összehasonlítani, 5 μm -es pontossággal (1. ábra). A műszerből több darabot adtak el kanadai és pakisztáni megrendelésre (Halmai 1978).

1. ábra. Az MTA GGKI és a MOM kooperációjában készült hordozható terepi léckomparátor

A digitális szintezőkészítők és kódlecek megjelenése

Az 1990-es év a műszerezettség tekintetében jelentős áttörést hozott, hiszen piacra kerültek a digitális (automatikus leolvasású) szintezőkészítők és a hozzájuk tartozó metrikus vonalkódos szintezőlecek (Ingensand 1990). Az új típusú szintezőkészítő, amely több szempontból is a kompenzátoros szintezőkészítő komputertizált továbbfejlesztésének tekinthető, igen kényelmessé tette a mérést, és használata nagymértékben csökkentette a személyi hibákat. A számítógépek által azonnal értelmezhető és feldolgozható formában, digitálisan rögzíti a mérési eredményeket. A végeredményben változatlanul hagyott optikai-mechanikai működési alapelvek miatt azonban örökölte a hagyományos műszerek összes hátrányos tulajdonságát is, sőt újabb hibaforrások jelentek meg (Ingensand 1991, Schauerte 1992). A szintezéshez használt kódleceknek nagy előnye, hogy a szintezőkészítő nem egyetlen lécosztás alapján, hanem a távcső látómezőjében leképződő osztáscsoportokból határozza meg a lécleolvasás értékét, és így az egyes véletlen jellegű osztáshibák kevésbé jutnak érvényre. A leolvasási érték, vagyis a lécosztások kezdőpontja (talppont) és az aktuális műszerhorizont vertikális távolsága úgy határozható meg, hogy a műszerben numerikusan tárolt lécosztásmodellt (elméleti skála) osztásról osztásra, a talpponttól indulva digitálisan korrelálják (pl. Meskó 1980) a látómezőben leképződött osztáscsoporttal. A korrelációs értékek alkotta függvény maximum helye definiálja a lécketszékét, vagyis a leolvasási értéket.

Az utóbbi 3 évtizedben a kódlecek osztása optikai interferométerrel vezérelt festőgépekkel történik, így a technológia pontossága elvileg meg egyezik az lézerinterferométerekkel (melyekben az etalon a használt lézer által gerjesztett fény nemzetközileg elfogadott hullámhossza vákuumban) végezhető kalibrálás pontosságával. A festési művelet azonban mind véletlenszerű, mind szisztematikus (pl. a

lézerfény elhangolódása miatt) hibákat generálhat, amelyek gyártótól függetlenül ellenőrzése szükséges a minőségbiztosítás érdekében. Általánosan elmondható, hogy a modern festési technológiával az osztás-pontosság jobb, mint 10 μm . A DIN 18717 szabvány szerint a lécosztás megkövetelt pontossága, két tetszőleges osztás között $\pm 0,02 \text{ m}$ (Wunderlich et al. 2005).

Digitális szintezőkészítőt és a megfelelő kódleceket többek között a Leica, a Trimble/Zeiss és a Topcon/Sokkia cég is gyárt. Mindegyik műszer más algoritmussal, de a fent vázolt digitális korreláció módszere alapján állítja elő a mérési eredményt, vagyis a lécleolvasás értékét. Pl. a Topcon/Sokkia műszereknél a korrelációt a gyors Fourier-transzformáció (Fast Fourier Transform) segítségével számítják ki a nagy sebességű adatfeldolgozás érdekében.

A Leica/NEDO invarkódsszalagon 4050 mm hossz 2000 alapelem (minimális szélességű osztásvonás) szélességének felel meg. Innen számítható az alapelem mérete, amely

$$\Delta l = \frac{4050}{2000} = 2,025 \text{ mm} \quad (1)$$

Az összes, nem alapelem szélességű (vagyis vastagabb) vonás, az alapelem szélességének valamely egész számú többszöröse.

A kódlecek kalibrálásának alapelvei

Kezdetben a léceket kizárólag vízszintes helyzetben kalibrálták. Ezzel meghatározható a lécosztás pontossága, továbbá a szintezésnél igen fontos szerepet játszó ún. m , a lécméter egységtől való eltérésének mértéke egy adott T hőmérsékleten:

$$1 + m_T = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l_i)_T}{l_i} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l_i + \delta l_i)_T}{l_i}$$

ahol N a kalibrált lécosztások száma, $\hat{l}_i$ az i -ik lécosztásnak a kalibrálás során meghatározott tényleges hossza („*van*” értéke) T hőmérsékleten, l_i pedig az ennek megfelelő „*kell*” (nominális) érték, amely egész számú többszöröse a Δl -nek (1). $\delta \hat{l}_i$ pedig az i -edik lécosztáshoz tartozó hiba. Ezen

túlmenően, különböző (pl. K számú) hőmérsékleteken ($T = T_1, T_2, \dots, T_n$) végzett kalibrálásokkal meghatározható az invarszalag hőtágulási együtthatója is.

A kódlécek kalibrálásának legegyszerűbb módja, hogy a sínen mozgatható lécnél egy szabadon választott kezdőosztására (célszerűen annak szélére) ráállunk pl. egy koincidiációs mikroszkóppal (Orbán 1982), majd bekapcsoljuk az elmozdulást mérő hitelesített lézerinterferométert és a számláló egységét lenullázzuk. Innentől kezdve minden további osztás *kell* (nominális) leolvasási értéke a 2,025 mm-es alapérték egész számú többszöröse (Heister et al. 2005). Az ettől való eltérés egy véletlen jellegű osztáshiba és a lécszisztémikus hosszváltozásából ($m_T \neq 0$) származó hiba összege az éppen vizsgált osztásig.

A lécek vízszintes (fekvő) elhelyezése a kalibrálás során valójában „életidegen”, hiszen a szintezés függőleges léctartással történik. Ezen túlmenően a digitális szintezésnél a mérési eredményt, – a mérést végző személy messzemenő kikapcsolásával – a műszerben működő bonyolult mérési program (látómező leképezési- és képfeldolgozási-, valamint digitális korrelációs folyamat) szolgáltatja. A mérési pontosság végeredményben attól függ, hogy a műszer mit és hogyan „lát” a lécből. Ebből az is következik, hogy nem elég csupán a lécet kalibrálni, hanem az egész rendszer (műszer és lécek) mérési eredményeit kell az etalonhoz hasonlítani. Ez csak olyan kalibráló laboratóriumokban lehetséges, ahol a lécet interferométeres pontossággal függőlegesen mozgatják, miközben a műszerrel mérik a lécek magasságváltozásait. Így maga a szintező műszer szolgáltatja a „van” értékeket, amelyeket az interferométer mérési eredményeivel („*kell*” értékek) hasonlítanak össze. Fontos megemlíteni, hogy a műszer a hozzátartozó lécekkel együtt több, különböző műszer-lécek távolságon kalibrálják. Ilyen kalibrálást elsőként a graci TUG-ban (Technische Universität Graz) létesített ún. „rendszerkalibráló” laboratóriumban, majd

később a müncheni UniBwM-ben (Bundeswehr Universität München) végeztek.

Mivel a hazai szakemberek többsége a külföldi laboratóriumok közül leginkább a Technische Universität München (TUM) léckalibráló laboratóriumát ismeri, ezért ennek folyamatos, több lépcsőben végrehajtott fejlesztéseit emeljük ki. Eleinte a léceket itt is vízszintes helyzetben kalibrálták. Ma már a precíziós szintezőléceket függőlegesen mozgatják a kalibrálás során a TUM Geodéziai Tanszékén. A kalibrálási eredmények összevetéséből elmondható, hogy a vízszintes és a vertikális kalibrálás közötti különbség átlagban: 3,7 μm , így egy 3 m-es lécek függőleges helyzetben ennyivel rövidebb (Wunderlich et al. 2005, Woschitz-Brunner 2003).

A laboratórium 7m×2m×2m méretű klímakamrája képes állandó hőmérsékletet biztosítani $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletek között a hőtágulási együttható vizsgálatához.

A mérést és a kiértékelést teljesen automatizálták. A kalibrált lécről ún. Calibration Report készül. Ezen az adott hőmérséklet mellett kapott kalibrálási eredményeket tüntetik fel, vagyis a lécméter értékét nem redukálják egy adott referencia (pl. $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) hőmérsékletre. A hőtágulásra megadott egyenlet alapján azonban ezt a felhasználó könnyen kiszámíthatja. A továbbiakban $m_0 = m_{T=T_0}$.

Szintezőlécek komparálásával és kalibrálásával kapcsolatos fejlesztések az MTA GGKI-ban

A '70-es évek vége felé már Magyarországon is ismert volt a fény-interferometria segítségével történő mérés technológia, ezért az MTA GGKI megkezdte kutatásait ezen a területen, tesztelve a Michelson- és Fabry-Perot-féle interferométerkonfigurációkat (Inczédy-Krausz 1981). Ezek eredményeként pl. az intézet 0,05" felbontóképességű libellamérlege kiegészült egy ékpáras interferométerrel

a mérőcsavar pontosságának ellenőrzésére, amelyhez csíkszámláló berendezés is készült Krausz Károly és Ölbei László mérnökök együttműködésében. A laboratóriumi fejlesztések mellett folytatódtak azok az elméleti vizsgálatok is, amelyek a lécosztás hibák tulajdonságait elemezték matematikai statisztikai és kiegyenlítő számítási módszerek segítségével (Somogyi et al. 1981).

1976-ban megkezdődött egy lézerinterferométeres mérőpálya tervezése, gyártása és telepítése. A mérőpálya geometriai beállítása, vagyis a sínnek párhuzamosítása, egyenesbe és vízszintes helyzetbe szabályozása 40×-es nagyítású teodolittávcsővel és az MTA GGKI műhelyében készült, sínen gördülő kocsiakra helyezett irányozható jelekkel, valamint egy 40"/2 mm-es speciális talpas libella segítségével történt. Mivel az akkor legkorszerűbbnek számító interferométer, amit a Hewlett-Packard cég gyártott, ún. COCOM-listás (vagyis embargós) csúcstechnológiás eszköznek számított, ezért egy csehszlovák interferométert kellett alkalmazni. A rendszer nem volt automatikus, a komparálást végző személynek kellett a léceket mozgatnia a következő i -edik mérendő osztásvonáshoz, majd a mikrométercsavaros mikroszkóp segítségével, optikai észleléssel kellett meghatározni az $\tilde{l}_i$ lézeres mérést kiegészítő $(\Delta l)_i$ maradék (reziduál) leolvasást:

$$\tilde{l}_i = \tilde{l}_i + (\Delta l)_i \quad (3)$$

Habár sok probléma adódott az új mérőeszközzel, a későbbi fejlesztéseket mégis ez alapozta meg a hagyományos ZEISS, WILD és KERN invarszalagos szintezőlécek komparálása során összegyűlt tapasztalatok miatt (2. ábra).

Hagyományos felsőrendű invarszalagos szintezőlécek komparálása céljából, a Canadian Survey megrendelésére, 1990-ben dr. Mentés Gyula tudományos főmunkatárs és Bánfi Frigyes mérnök, automatikus lézerinterferométeres léckomparátort fejlesztettek ki a vastag osztásjelek irányzására, illetve érzékelésére is alkalmas Schlemmer-féle elektromos mikroszkóp (Schlemmer 1989)

felhasználásával (3. ábra). Ekkor már a komparátor fő egysége egy HP 5528A lézerinterferométer volt, amelyhez HP interfészen keresztül lehetett számítógépet (abban az időben már egy IBM PC-t) csatlakoztatni. A komparálás során a léceket léptetőmotor mozgatta egyenletes sebességgel a mikroszkóp alatt, amely minden osztásnál egy impulzust adott ki a lézerinterferométer felé. Az impulzushoz tartozó i -edik interferometrikus mérés eredményét (ld. 3. egyenlet, ahol ez esetben $(\Delta l_i)_i=0$) pedig a számítógép rögzítette, amely a folyamat végén önműködően értékelte ki a méréseket és rajzolta meg a szintezőléce hibagörbéjét (Krausz–Ölbei 1992). Az MTA GGKI soproni műszervizsgáló laboratóriumában felépített sín pályán a léckomparátor ismétlési pontossága $\pm 5 \mu\text{m}$ -en belül volt. A sikereken fellelkesülve, Krausz Károly és Ölbei László mérnökök és Inczédi János fizikus a Schlemmer-féle elektromos mikroszkópnál is korszerűbb, léckomparáló-mikroszkóp tervezésébe kezdett, de létszámléépítés miatt sajnos csak a „deszkapéldányig” jutottak.

Az MTA GGKI hagyományos (KERN típusú) invarszalagos felsőrendű léceinek kalibrálása Grazban és Sopronban is megtörtént 1995-ben. A két eredményt összehasonlítva megállapítható, hogy a független kalibrálások során kapott lécméter $(1+m_0)$ értékek különbsége nem haladta meg a német kalibrálási kör-mérések (ún. Ringversuch 2003–2004) átlagos (3–4) ppm szórását (Schauerte–Heister 2005), annak ellenére, hogy a lécosztásokat jobb híján csak az Orbán Aladár által készített koincidenciás mérőmikroszkóppal (Orbán 1982) lehetett megirányozni $\pm 5 \mu\text{m}$ -es pontossággal (4. ábra). A fent leírt fejlesztésekre és eredményekre alapozva és az Országos Mérésügyi Hivatal felkérésére 1994-ben létrejött az MTA GGKI Kalibráló Laboratórium Sopron. A kifejezetten geodéziai mérőeszközök kalibrálására szakosodott labor, az országban elsőként bekerült a nemzetközi és a nemzeti kalibráló szervezetek névjegyzékébe.

1995 után az anyagi lehetőségek függvényében tovább folyt a

2. ábra. Dr. Orbán Aladár (jobb oldal) és Horváth Attila (bal oldal) léceket komparálnak az MTA GGKI-ben. Kisalföld Hírlap (1983)

3. ábra. A Schlemmer-féle mikroszkóp az MTA GGKI kalibráló pillérén. A kék doboz a lécmegvilágítás elektronikája, a narancssárga pedig a koincidencia-jeladó elektronikája

4. ábra. Koincidenciás mérőmikroszkóp

lézerinterferométeres léckalibráló mérőrendszer fejlesztése, amelynek nagy lendületet adtak a 2008-ban

megkezdett EOMA-újramérések (Busics 2010, Virág 2011). Az országos jelentőségű felsőrendű szintezési

mérések minőségének biztosítása hirtelen szakmai alapkérdéssé vált, amire az MTA GGKI kutatói és mérnökei gyorsan reagáltak (Orbán et al. 2009a, Orbán et al. 2009b, Orbán et al. 2009c). Természetesen a technológiai haladás, elsősorban a digitális kamerák robbanásszerű elterjedése is inspirálta munkájukat, amelyet egyébiránt az MTA X. Osztályának Geodéziai és Geoinformatikai Tudományos Bizottsága is szorgalmazott. Ennek eredményeképpen 2009-ben beszerettek egy CMOS kamerát (uEye UI-1480 SE-M), valamint egy L-VS-TCM2-65C0 telecentrikus optikát az osztásvonások megfelelő $\sim 1,1 \mu\text{m}/\text{pixel}$ felbontást biztosító digitális leképezéséhez. Mivel a mérés alatt a környezeti paraméterek stabilitására ügyelni kell, a hőmérséklet, légnyomás és páratartalom értékeinek folyamatos mérésére egy nagy megbízhatóságú meteorológiai mérőállomást (Ahlborn szenzorok és ALMEMO 2290-8 adatgyűjtő és RS232 interfész) integráltak a rendszerbe. Ezek az adatok egyébként a lézertény felvétele, nem vákuumbeli hullámhosszát (ami jelen esetben az etalon pontot biztosítja) is befolyásolják, így a szükséges korrekciók kiszámításához

szükségesek. A mechanikai stabilitás biztosítása és a hőtágulás minimalizálása érdekében a lézerinterferométer elemei (interferométer egység, sugárirányító- és interferencia prizma, kamera) egyetlen márványlapon helyezkedtek el (5. ábra). A rendszer részegységeinek összehangolt működését egy IBM PC biztosítja, amely a mérési program során,

a kiértékelendő osztásvonások névleges helyzetének adatai alapján, a megfelelő közelítő helyre mozgatja a léceket a kamera alatt. Ezután kiértékeli a leképeződött osztásvonást, amelynek helyzete a képen meghatározza az ún. maradék leolvasást a 3. egyenlet szerint. A rendszer (6. ábra), amelyet Bánfi Frigyes mérnök, Battha László tudományos munkatárs

5. ábra. A CMOS-kamera, a HP-lézerfej és a sugárirányító optikák elhelyezkedése a márvány platformon (2012–2019)

6. ábra. A soproni GGI léckalibráló rendszerének blokkvázlata (2012–2019)

és Kalmár János tudományos főmunkatárs valósítottak meg, arra is képes, hogy ha az osztásvonásnak csak egyik szélé látszik a kamera képén, akkor a léptetőmotor segítségével megfelelő irányban és mértékben korrigálja a lécz vízszintes pozícióját a kalibrálást szolgáló osztásvonás mérésének megkezdése előtt.

Habár az EOMA-újrámérések sajátos módon megszakadtak, a rendszer finomítása folyamatos volt és megkezdődött a GPCL* családhoz tartozó lécek rendszeres kalibrálása (Horváth–Gyimóthy 2009). A szükséges pontosság biztosításához kialakult egy mérési protokoll, ami kezdve a kalibrálandó léceknek a laborklíma-hoz történő akklimatizálásától a jegyzőkönyvek elkészítéséig minden lépésre az ennek megfelelő eljárást és megoldást tartalmazta. Ez alapján 8 intézmény illetve cég 19 lécpárját (köztük többet ismételve) sikerült kalibrálni az elmúlt évek során. A Földmérési és Távérzékelési Intézet (2015-ben Budapest Főváros Kormányhivatala Földmérési, Távérzékelési és Földhivatali Főosztálya) lécpárjára kapott 2005 évi müncheni (vertikális) és a 2015 évi soproni (horizontális) kalibrálási eredmények:

$$\delta \hat{l}_i = \hat{l}_i - l_i, \quad (4)$$

vagyis az $\hat{l}_i$ mért léccosztások $\delta \hat{l}_i$ eltérései (léccosztás hibák) azok l_i nominális értékeitől a 7. ábrán láthatók.

Az 1. táblázat ugyanezen lécpárnak a GGI laboratóriumában kapott kalibrálási eredményeit mutatja 4 különböző évre vonatkozóan. Ezek igen konzisztens eredmények, hiszen az $\bar{m}_0$ középértékek $\sigma_{\bar{m}_0}$ szórásai (Nr. 1.: $\bar{m}_0 = -2,22 \pm 1,06$ ppm, Nr. 2.: $\bar{m}_0 = -3,56 \pm 1,05$) alig térnek el az

7. ábra. A FÖMI (BKFH FTFF) lécpár 2005 évi müncheni (TUM) és 2015 évi soproni (GGI) léckalibrálási eredményeinek összehasonlítása. A kiegyenlítő egyenesek (lin. reg.) meredekségei ($T_{TUM} = 20,8$ °C, $T_{GGI} = 20,0$ °C) az 1. táblázatban láthatók

1 ppm-től. Mivel a hibaterjedés törvénye szerint az egy műszerállásban mért Δh léccleolvasás- (magasság-) különbség hibája a lécméter időben véletlenszerűnek feltételezett változékonyságából (szórásából) adódóan

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{(\sigma_{\bar{m}_0})_1^2 + (\sigma_{\bar{m}_0})_2^2} \approx \sigma_{\bar{m}_0} \sqrt{2} \quad (5)$$

(mivel $(\sigma_{\bar{m}_0})_1 \approx (\sigma_{\bar{m}_0})_2$ fennáll), ezért az ebből származó hibák, várhatóan kisebbek, mint 0,0015 mm. Az egyes években meghatározott lécméterek

megbízhatósága is nagyon jó, hiszen az ebből számítható maximális bizonytalanság:

$$\max(\delta \hat{l}_i) \approx 3 \max(\sigma_{\bar{m}_0}) \hat{l} \quad (6)$$

a legrosszabb esetet feltételezve (ld. 1. táblázat, $\max(\sigma_{\bar{m}_0}) = 0,48$ ppm) egyetlen, pl. $\hat{l} = 3$ m maximális értékű léccleolvasás esetén is csak kb. 0,0045 mm. Természetesen mindez akkor igaz, ha a léccleolvasásokat a $T_0 = 20$ °C referencia-hőmérsékletre vonatkoztatjuk.

év	Nr. 1				Nr. 2				T [°C]
	m_0 [ppm]	m_T [ppm]	σ_{m_0} [ppm]	σ_{m_T} [ppm]	m_0 [ppm]	m_T [ppm]	σ_{m_0} [ppm]	σ_{m_T} [ppm]	
2009	-4,40		0,48		2,26		0,41		20,0
2013	-0,14		0,13		4,13		0,38		20,0
2014	-2,45		0,14		3,20		0,32		20,0
2015	-1,91		0,16		4,66		0,24		20,0
2005 (TUM)		-1,94		0,46		2,18		1,01	20,8

1. táblázat. A FÖMI (BKFH FTFF) lécpárok GGI-ben meghatározott lécmétereinek ($1+m_0$) és meghatározási pontosságaiknak (σ_{m_0}) összehasonlítása. Az utolsó sor ugyanezen lécpár 2005-ös kalibrálása során a TUM laboratóriumában meghatározott lécmétereket és megbízhatóságukat mutatja.

A GGI esetében a szakirodalmi adatok alapján az adott T hőmérsékletre redukált eredmények, míg a TUM esetében az adott hőmérsékleten mért eredmények láthatók

Azonos lécekre, de különböző külföldi kalibráló laboratóriumokban meghatározott lécméterek („Ringversuch” 2003-2004) az irodalmi adatok alapján (Schauerte-Heister 2005) átlagosan (3-4) ppm értékben is eltérnek egymástól, annak ellenére, hogy a lécméterek meghatározására szolgáló megismételt mérések szórása minden laboratóriumban és bármely eljárást alkalmazva is 0,5 ppm alatti érték volt (Schauerte-Heister 2005). A külföldi vizsgálatokból az is ismert, hogy a lécek sérülései, helytelen szállítása és a műszerek esetleges meghibásodásai 0,1 mm-es, illetve ezt jóval meghaladó mérési (leolvasási) hibákhoz is vezethetnek (Heister et al. 2005).

A fenti adatok alapján megállapítható, hogy a soproni mérésekből számítható lécméterek egységtől való m_0 eltérései a nemzetközi tapasztalatok szerint is jó egyezést mutatnak a müncheni eredményekkel, annak ellenére, hogy Sopronban egyelőre

nincsen lehetőség a vertikális kalibrálásra. Valószínűleg az észlelt különbségekben ez a körülmény is szerepet játszik. A lécosztáshibák (4) nemlineáris komponenseinek amplitúdó (Fourier) spektrumai (8. ábra) azt is megmutatják, hogy amíg a hosszú periódusú hibák (≥ 1 m) az időben stabilnak (a két kalibrálás között 10 év telt el) és még a horizontális kalibrálással is jól reprodukálhatónak mondhatók, addig a rövidebb hullámhosszúságúak a soproni mérésekben kb. kétszeres amplitúdóval bírnak. Ennek oka esetleg visszavezethető a lécek kalibrálási helyzetének már említett különbségére. Azonban ezeknek a komponenseknek az amplitúdói rendszeresen kisebbek 1 μ m-nél és a hatásuk a lécméter értékére nem jelentős, a lécek teljes hosszához viszonyítva rövidnek tekinthető periódusuk miatt.

Habár a soproni automatikus rendszer vezérlését az akkoriban egyeduralkodó digitális kódlécekre (GPCL*

család) alakították ki, természetesen más bárkódszerű felsőrendű lécek kalibrálására is van mód. Így némi átprogramozással megoldható a Trimble- és a Topcon-lécek kalibrálása is.

A legújabb módosítások a GGI léckalibráló rendszerén

Mivel az MTA 2017-ben nagy összegű felújítási keretet biztosított az MTA CSFK GGI soproni épületének felújítására, a műszervizsgáló laboratóriumot is ki kellett üríteni. A visszaköltözés után 2019-ben megkezdődött a labor berendezéseinek visszaállítása, így a léckalibráló rendszert is beüzemelték. Ennek során az Abbe-feltétel minél pontosabb kielégítése érdekében a lézerinterferométer a sín-pálya tengelyébe került, amely a mérőszög szabályozhatóságát (párhuzamosítás a pályával) is jelentősen megkönnyítette. Így most a labor, 2 év kényszerű szünet után, ismét alkalmas digitális szintezőlécek kalibrálására.

A kalibrálás előkészítése és a kalibrálás folyamatának végrehajtása a soproni GGI műszervizsgáló laboratóriumában

Az alábbi felsorolás bemutatja az előkészítés és a kalibrálás legfontosabb mozzanatait.

- A laboratóriumban stabil külső körülmények biztosítása (fűtési rendszer kikapcsolása a mérések megkezdése előtt pár nappal). Több nappal a kalibrálás megkezdése előtt, a kalibrálandó szintezőlécek elhelyezése a laboratóriumban (akklimatizálódási idő biztosítása).
- A szintezőléc szabatos rögzítése a mérőpályán futó kocsi, és a kocsi futásának ellenőrzése (Leica TC-2003 mérőállomással).
- Az Abbe-feltétel minél pontosabb biztosítása annak érdekében, hogy a mérendő mennyiség lehetőleg a mérés síkjában, illetve tengelyében legyen. A szintezőléc alátámasztási pontjainak megfelelő beállítása a legkisebb ki- és behajlás biztosítására.

8. ábra. A FÖMI (BFKH FTF) lécpár 2005 évi müncheni (TUM) és 2015 évi soproni (GGI) léckalibrálási eredményeinek, vagyis a lécosztáshibák (4) a Fourier-spektrumai

- A lézer-interferométer bekapcsolása a stabil üzemi hőmérséklet eléréséhez.

- A léckalibrálás mérési tartományában a lécmozgatás ellenőrzése (csúszás, súrlódás, elakadás stb. nem lehetséges).

- A magassági beállítások elvégzése szabatos felsőrendű szintezőműszerrel (Leica DNA 03). A CMOS kamera függőlegességének ellenőrzése és szabályozása két egymásra merőleges helyzetben történő vetítéssel (Leica TC-2003 mérőállomás használatával). Az invarszalag síkbeliségének ellenőrzése a CMOS-kamera mélységélesség tartományában. A tapasztalt eltérések minimalizálása finom emeléssel, illetve süllyesztéssel.

- Az „ALMEMO” meteorológiai adatgyűjtő és a mérés vezérlését végző számítógép (PC) bekapcsolása.

- Az akklimatizálási idő betartása után próbamérések elvégzése.

- A CMOS-kamera élességének további finomítása, fokozatos közelítéssel és ellenőrzése a képfeldolgozó program indításával. A képfeldolgozó program ablakában megfigyelve a lécet az osztásvonások esetleges hibáit is kimutathatjuk.

- Az „ALMEMO” által küldött meteorológiai adatok betöltésének ellenőrzése.

- A kezdőosztás képének számítógépes megjelenítése és pontos ráállítás a kezdőosztásra.

- Az invarszalag végigpásztázása három sávban (9. ábra) és sávonként (h , k , e) visszaállítás a legelső mérendő lécosztásra. A kamera finom mozgását a mérőpálya hossz tengelyére merőlegesen egy mikrométerrel ellátott platform teszi lehetővé. Ha a mérés végén a visszaállási hiba a tűrési határon túl van ($\pm 5 \mu\text{m}$), akkor ez a mérés kihagyandó a feldolgozásból. A sávonként meghatározott m_h , m_k és m_e méretarány-tényezők összehasonlítása alapján ellenőrizhető a mérések minősége, illetve az, hogy van-e szisztematikus eltérés az osztásvonások párhuzamosságát illetően. Szignifikáns eltérés esetén pótmérés végzendő. Az nyers mérési eredményeket a rendszer megfelelő file-okban tárolja.

- A léckalibrálás mérési állományai-ból egy több munkalapot tartalmazó

9. ábra. A három pásztázó sáv (h , k , e) helyzete a lécosztáson

10. ábra. A GGI Kalibrálási bizonyítványa

MS Excel munkafüzet készül (10. ábra). Az ebből összeállított kalibrálási bizonyítvány tartalmilag megfelel más, pl. a TUM által készített ún. Calibration Reportnak.

Az automatikus kalibráló rendszerrel eddig elvégzett kalibrálások összegezése

A Tárczy-Hornoch Antal akadémikus alapította soproni kutatóintézet

(amelyet 2011-ig MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetnek, 2012-től 2019-ig MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézetnek hívtak, jelenlegi elnevezése pedig Eötvös Loránd Kutatóhálózat Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet) az elmúlt években számos léckalibrálási megrendelést kapott, mind állami intézményektől (FÖMI, NyME GEO,

Óbudai Egyetem), mind magánvállalkozásoktól (NIVELLUM, GEODÉZIA ZRT, MÉRMŰ, TERRA GEOD), amelyeket sikerrel teljesített. Ezek között voltak GPCL2 (1 db) és GPCL3 (19 db) típusú lécek, amelyek közül számosat többszörösen is kalibráltak, maximum 4 alkalommal. Az elvégzett sikeres kalibrálások száma összesen 34.

Az Nyugat-Magyarországi Egyetem és a Budapesti Műszaki Egyetem tanárai és hallgatói több alkalommal is (pl. a soproni Geomatika Szemináriumok alatt) részt vettek mérési bemutatókon.

2017 nyarán megkezdődött a soproni intézet teljes felújítása, így a kalibráló laboratóriumot az ott elhelyezett műszerek és eszközök védelme miatt ki kellett üríteni. 2020 márciusától azonban a rendszer újra üzemképes, sőt a megfelelő módosítások után a mérési elrendezés a korábban alkalmazottnál jobban megfelel az Abbe-féle komparálási feltételnek és emellett minimális igazítást igényel.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a fejlesztésben nyújtott segítségükért a következő személyeknek: dr. Mentés Gyula, Battha László, Gimesiné N. Ágnes, Gyimóthy Attila, dr. Kalmár János, Krausz Károly, Ölbei László, Sclaffer Ferenc, dr. Szádeczky K. Gyula. Hálás szívvel emlékeznek meg arról az anyagi támogatásról, amit az MTA GGKI néhai igazgatója, dr. Závoti József nyújtott 2008–2009-ben a digitális szintezőlécek kalibrálásához szükséges laboratóriumi fejlesztésekben.

Külön köszönet illeti Virág Gábort, a Lechner Nonprofit Kft által működtetett Penci Kozmikus Geodéziai Observatórium munkatársát, hogy a FÖMI (BFKH FTFF) lécpárokra vonatkozó adatokat az összehasonlító vizsgálatok elvégzéséhez elérhetővé tette.

Irodalom

Alpár, Gy. 1969. Gedanken über die Komparierung. Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica, 4(1–2), pp. 33–40.

Busics, Gy. 2010. Az EOMA újramérésének előzetes eredményei az első három poligonban. Geomatikai Közlemények, 13(2), pp. 141–148.

Halmi, E. 1978. Feldkomparator für Invarband-Nivellierlatten. Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica, 13(1–2), pp. 144–152.

Horváth, A. – Gyimóthy, A. 2009. A felsőrendű digitális szintezőműszerek és kódlecek kalibrálási helyzete külföldön és Magyarországon. XLVIII. (48.) Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatsere Rendezvénye, 2009. június 3–5. Szolnok-Szajol, konferencia kiadvány

Inczedy, B. J. – Krausz, K. 1981. Interferometric angle measuring system operating in small angular range. Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica, 16(2–4), pp. 307–317

Ingensand, H. 1990. Das WILD NA2000. Das erste digitale Nivellier der Welt. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 6, pp. 201–210.

Ingensand, H. 2005. Die Entwicklung von Digitalnivellieren und Codelatten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 6, pp. 229–232.

Foppe, K. Wasmeier, P. Wunderlich, Th. 2005. Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlattenprüfungen an der TUM. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 6, pp. 213–220.

Krausz, K. – Ölbei, L. 1992. An interferometric length comparator for Controlling invar Levelling Rods. Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica, 27(2–4), pp. 141–152

Mentes, Gy. 2001. Geodéziai és geodinamikai műszerfejlesztések az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben. Geomatikai Közlemények, 4, pp. 47–60.

Meskó, A. 1984. Digital filtering. Applications in Geophysical Exploration for Oil. Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 636.

Orbán, A. 1982. Laboratóriumi módszerek a teodolitok minősítésére. Kandidátusi disszertáció, MTA GGKI, Sopron, 191.

Orbán, A. – Horváth, A. – Gyimóthy, A. 2009a. A libellás szintezőműszerektől a digitális szintezőműszerekig. Geodézia és Kartográfia, 61. évf. 2. sz., pp. 6–13.

Orbán, A. – Horváth, A. – Gyimóthy, A. 2009b. Felsőrendű digitális szintezőműszerek összehasonlító vizsgálata az MTA GGKI kalibráló laboratóriumában. Geodézia és Kartográfia, 61. évf. 6. sz., pp. 19–26.

Orbán, A. – Horváth, A. – Gyimóthy, A. – Bánfi, F. 2009c. Felsőrendű digitális szintezőműszerek vizsgálata a Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben. Geomatikai Közlemények, 12, pp. 63–69.

Regőczy, E. 1957. Új szintezőléckomparátor. Geodézia és Kartográfia 9. évf. 1–2 sz., pp. 52–54.

Schauerte, W. 1992. Vergleichende Untersuchung der Digitalnivelliere WILD NA 2000 und NA 3000. Vermessungswesen und Raumordnung, 53(1), pp. 45–55.

Schauerte, W. – Heister, H. 2005. Der Ringversuch 2003–2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 6, pp. 221–228.

Schlemmer, H. 1989. Anforderungen, Stand und Entwicklung von Industrie-Meßsystemen, Zeitschrift für

Vermessungswesen, 114(7–8), pp. 365–372.

Somogyi, J. – Závoti, J. – Besskó, D. 1981. About the Calibration of Invar Leveling Rod. Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica Acad. Sci. Hung., 16(2–4), pp. 281–294.

Staiger, R. – Witte, B. 2005. Zur Bedeutung der Prüfung von Präzisionsnivellierlatten für die Praxis. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 6, pp. 200–203.

Virág, G. 2002. A hazai szintezések komparálási problémái. Geomatikai Közlemények, 5, pp. 319–326.

Virág, G. 2011. Az újramért EOMA poligonok kiegyenlítése. Geomatikai Közlemények, 14(1), pp. 37–44.

Woschitz, H. 2003. System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Shaker Verlag, p. 210

Woschitz, H. – Brunner, F.K. 2003. Development of a Vertical Comparator for system Calibration of Digital Levels. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 91(1), pp. 68–76.

Bánfi Frigyes
ny. intézeti mérnök

MTA CSFK GGI,
banfi@ggki.hu

Dr. Orbán Aladár
ny. tudományos főmunkatárs

MTA CSFK GGI
orbanaladar@freemail.hu

Horváth Attila
intézeti mérnök

MTA CSFK GGI
horvath@ggki.hu

Dr. Papp Gábor
tudományos főmunkatárs

MTA CSFK GGI
papp@ggki.hu