

# A méter sztori

## The Story of the Metre

Pálinkás Tibor, gépészmérnök

Óbudai Egyetem, BGK, Gépészeti és Technológiai Intézet

ptibor723@gmail.com

**Összefoglalás** — A régi korok országoként, sőt tartományoként eltérő, s többnyire önmagukban is következtelen mértékrendszereitől hosszú és rögös út vezetett a tizenegyedik CGPM által 1960-ban meghozott forradalmi döntésig: az SI (Système International d'Unités) bevezetéséig. Igaz, a méter az ezt megelőző, többé-kevésbé koherens mértékrendszereknek, az MKS-nek, ill. az MKSA-nak is alapegysége volt. A következőkben az SI hét alapegysége közül a hosszúság mértékegységének a történetét foglaljuk össze; mind közül éppen ez a legkalandosabb. Mi magyarok büszkék lehetünk arra, hogy a modern méter megszületésénél bábáskodtak magyar tudósok, és a ma elfogadott realizációja a méternek is egy híres hazánkiától, Bay Zoltántól származik. Éppen ezért cikkünkben a méter hazai történetéről is részletesen esik szó. A cikk utolsó fejezeteként bepillantunk a kilogramm történetébe is.

**Kulcsszavak:** méter, SI, mértékegységrendszerek

**Abstract** — From the diverse and often inconsistent measurement systems used across countries and even provinces in earlier times, it was a long and bumpy road to the revolutionary decision made by the 11th CGPM in 1960 to introduce the SI (Système International d'Unités). Notably, the metre already served as the base unit in several of the earlier, more or less coherent systems. In the following a summary of the history of the unit of length can be read, which is the most adventurous out of the seven basic units of the SI. We Hungarians can be proud of the fact that Hungarian scientists helped to create the modern realization of metre, and that the definition of the metre adopted today comes from a famous Hungarian scientist, Zoltán Bay. That is why our article also devotes special attention to the Hungarian contribution to the history of the metre. In the last chapter of the article we also take a closer look at the history of the kilogram.

**Keywords:** metre, SI, system of units of measurements

### 1 ELŐZMÉNYEK

A kézműipar fejlődése, a kialakulófélben levő egységes nemzetközi piac, majd az ipari forradalom kényszerítő erővel hatott egy egységes mértékrendszer kidolgozására. Sok tudós fáradozott azon, hogy a hosszúság egysége ne például az uralkodó valamely testrészének a mérete (láb, arasz, hüvelyk), hanem végül egy laboratóriumi körülmények között bárhol leszármaztatható természeti állandó legyen.

Talán az első erre vonatkozó indítványt Christiaan Huygens, a használható ingaóra megalkotója tette: 1664-ben a másodpercinga hosszát javasolta a hossz mérés egységéül. Bár javaslatát később többször módosította, ötletét nem hasznosították. Ezzel a javaslattal aztán többen

is előálltak, pl. Jean Picard és Ole Rømer később a Francia Nemzetgyűlés előtt Charles-Maurice de Talleyrand is. Jean Richer francia csillagász mutatta ki, hogy az inga északi és déli országokban másképpen leng, mint az Egyenlítőn. Ma úgy mondjuk, hogy a Föld különböző pontjain a nehézségi gyorsulás állandója más és más. Érdekes, hogy ezen javaslatokban megtalálható a jelenleg érvényben levő meghatározás csirája: a hosszúságegységet az időmérésre próbálták visszavezetni!

Az mindenesetre megállapítható, hogy bár az alapmértékeket önkényesen választhatjuk meg, egy mértékegység kialakulásakor mindig két, egymásnak ellentmondó feltétel ütközik:

- a mértékegység akkor jó, ha mindig könnyen hozzáférhető és kezelhető (pl. láb),

- a mértékegység természeti állandó legyen (már Huygens javaslata is erre irányult). Az ilyen alapuló etalon viszont csak különleges körülmények között, speciális felszereléssel és speciális szakértelem birtokában kezelhető.

Az SI 2017-es revíziójáról a Természet világa folyóirat 2019/9. számában megjelent egyik cikk [1] alatt idézett, kissé maliciózus részlete éppen ez utóbbit látszik igazolni: „Ugyanakkor még e rejtélyes változtatások hívei is elismerik, hogy ezek megvadhathatják azokat, akik kevésbé jártasak a fizikai állandók világában. 'Hogyan fogjuk megtanítani az embereket az új egységek használatára?' kérdi Jon Pratt, az NIST egy másik fizikusa. 'Az új bonyolult definíciók kétségbe kergetnek mindenkit, akinek nincs erős fizikai ismerete', mondja Gary Price, egy metrológus Sydneyből, aki az Ausztrál Nemzeti Sztenderdek Hivatalának tanácsadója. 'Az új SI nem teljesíti a mértékegységrendszer alapvető kritériumát: meghatározni a tömeget, amivel más tömeg mérhető, definiálni a hosszúságot, amivel a hossz mérhető és így tovább. Az új SI sem a súlyoknak, sem a mértékeknek nem rendszere' Price szerint.”

Az 1860-as években Bécs vissza akart térni a gondolathoz, és az új, egységes tizedes hossz mérték alapjául a másodpercinga Bécsben mért hosszát kívánták megállapítani. Természetesen csak valódi fizikai inga jöhetett volna szóba, így a hosszúságegység ilyen definíciójához hozzá kellett volna rendelni egy nagyon pontosan definiált, „szabványosított” mérőingát is.

Eötvös Loránd már 1891-ben elkészítette első torziós ingáját, amivel a helyi nehézségi gyorsulást minden addigi módszernél pontosabban lehetett megmérni. Oltay Károly, később legendás műegyetemi geodézia professzor, még 1908-tól több alkalommal viszont egy speciális, vákuumban szabadon lengő „hagyományos” ingapárral határozta meg az ország néhány pontján, így Budapesten is a  $g$  gravitációs gyorsulás értékét. A méréseket Eötvös felkérésére végezte el. A Sterneck-féle kettős (nem torziós, fizikai) ingával végrehajtott mérések pontos körülményeit, eredményeit az „A nehézségyorsulás budapesti értékének meghatározása” c. művében (Saját kiadás, 1917) ismerteti. Később visszatér a témára („Relatív gravitáció-mérés invariabilis ingákkal”, 1944). Ma a nehézségi gyorsulást többnyire az Eötvös-ingánál érzékletlenebb, de könnyebben kezelhető, lényegesen gyorsabban beálló relatív graviméterekkel – különböző kinematikájú, újabb elektronikus kompenzálórendszerrel felszerelt, de lényegében rendkívül finom rugós dinamométerekkel – mérik. A helyi nehézségi gyorsulás abszolút értékét vákuumban szabadon eső test lézinterferométerrel követett pozíciójából

és az ezek között eltelt, atomórával megállapított időközökből számítják ki (abszolút graviméterek).

A Föld méretén alapuló hosszsmérték gondolatát már a XVIII. században felvetette Nicolas Louis de Lacaille és Jacques Cassini francia csillagász, és neki is kezdtek a méréseknek.

Ezen az ötleten alapult Gabriel Mouton, szintén francia csillagász javaslata is. Ő a délkör egy fokpercének hosszán alapuló tizedes mértékrendszert vezetett volna be. A Francia Tudományos Akadémia 1736-ban kiküldött egy kutatócsoportot a Föld délkeleti részének megmérése, a „Cassini és Newton közt a Föld alakja fölött kitört véleménykülönbség eldöntése végett” (idézet Kruspér Istvántól). A mérés Peruban és a Lappföldön történt. A kutatócsoportok ideiglenes hosszsmértéke egy-egy acélből készült, speciális kialakítású véglapos etalonpár volt, amelyek egy korábbi francia alaphosszmérték, a Toise du Châtelet alapján készültek. A keresztmetszetük kb.  $10 \times 40$  mm, az általuk megtestesített hossz 864 párizsi vonal (2 francia öl, kb. 1,949 m) volt. A normáliákat elkészítőjükről Langlois-féle ideiglenes mérték-normáliának is nevezték. Ezen különleges kivitelű, két, illeszkedő darabból álló hosszsmértékek elődjének története önmagában is regényes; a kutatócsoportok mindennapjai sem teltek eseménytelenül – de ezek részletezésére most nem térünk ki. A Lappföldön használt etalon (*toise du Nord*) hajótörés következtében eltűnt, a másik (*toise du Pérou*) azonban visszakerült Franciaországba. Egy, az említettekhez hasonló etalonpár egyik végéről készült felvételt mutatunk be az 1. ábrán. Az eredeti *toise du Pérou* jelenleg a *Observatoire de Paris*-ban található. 1776-ban XV. Lajos jóváhagyásával a *toise du Pérou* alapján 80 db másolatot készítettek, melyek megnevezése: *toise du l'Académie*.



1. ábra: Egy *toise du Pérou*-hoz hasonló, egymásba illeszkedő etalonpár végkialakítása

Az így kapott eredményt sem hasznosították, talán azért, mert az egyes mérések eredményeképpen kapott ívhosszak között jelentős eltérések voltak. Annyi tudományos haszna mindenesetre volt ezeknek a méréseknek, hogy egyértelműen bebizonyították a Föld lapult, geoid voltát. Jóval később, 1816 és 1855 között mások még egy felmérést végeztek, amelyeknek célja már kizárólag a Föld lapultságának meghatározása volt. (Ez volt a Struve földmérő vonal, az észtországi Tartun átmenő délkörön.)

További ötletek is felvetődtek a Föld geometriai méreteiből levezethető hosszsmértékre. Például voltak, akik az Egyenlítő egy kiválasztott szakaszának a hosszából származtatták volna le a métert, de ezt és a hasonló ötleteket mérési nehézségek miatt vetették el.

Az ókorban tökéletes gömbnek tekintett Földünk méreteinek elsőként számon tartott meghatározása időszámításunk kezdete előtti 250-ben történt, és az alexandriai könyvtár vezetőjének, Eratoszthenésznek a nevéhez fűződik. Az általa feltalált módszer igazi lángészre vall. Az Alexandriában és Sziénában végzett megfigyelései alapján, itt nem részletezendő, ám rendkívül egyszerű módszerrel megállapította, hogy a Föld kerülete mai mértékegységgel kifejezve 46 248 km. Döbbenetes eredmény, tekintve, hogy a két település távolságát csak durván lehetett megsaccolni.

Jean Francois Fernel 1550-ben közvetlen méréssel (kerékfordulat-számláló mérőkocsival) megmérte a délkör Párizs és Amiens közötti szakaszát, és kiváló eredményt kapott. A mérést 1615-ben Willebrord Snellius már geodéziai háromszögeléssel végezte, de nagy hibával terhelt eredményre jutott. (Bár őt tartják hivatalosan a geodéziai háromszögelés feltalálójának, már az ókorból is ismeretesek hasonló elvű mérésekre utaló adatok.)

Jean Picard az 1660-as években már távcsöves teodolittal végezte a háromszögelést, kiváló végeredménnyel. Tulajdonképpen ezek az eredmények állították helyre Newton megingott önbizalmát, és végre nyilvánosságra hozhatta a tömegvonzás négyzetes törvényét.

Lacaille és Cassini 1718-ban fejezte be franciaországi délkörmérését. Közben Newton kimutatta, hogy a Földnek lapultnak kell lennie. Elméletét a Jupiter távcsöves megfigyelése is igazolta, ui. az is szemmel láthatóan lapult.

Az idő tájt és később is többen, több délkörmérést, szélességkör-mérést végeztek, melyek célja a tudományos kíváncsiságon túl az országok háromszögelési hálózatának összekapcsolása, a térképek pontosítása volt. [2]

## 2 AZ ELSŐ MÉTERETALONOK, A „PÁRIZSI ÖSMÉTER”

A francia nemzetgyűlés csak 1790-ben, Talleyrand ajánlatára foglalkozott újra a kérdéssel. A március 8-i határozatában az angolokkal együttműködve szeretett volna megoldásra jutni, de azok erre nem mutattak késztséget.

Végül az 1791. március 26-ára összehívott Nemzetgyűlés elrendelte a francia Akadémia által javasolt mérés végrehajtását, ami a Föld délkeleti részének negyvenmilliomod részeként meghatározott hosszúságú új alapegység, a méter kimérését célozta meg. (A „méter” a görög „metron” szóból ered, és mértéket, távolságot jelent. Az új decimális hosszegység elnevezését később gyakorlatilag a világon mindenhol elfogadták, erről nem folytak viták. Végül is beláthatjuk: a Föld méretéből származtatott hosszsmérték-etalon politikailag teljesen semleges, ugyanígy a „méter” megnevezés is, ezért mindkettő a tudósok nagyon józan világlátását dicséri.)

Hogy miért éppen ekkora méterben állapodtak meg? Nyilván hasonló alaplímértéket szerettek volna kapni, mint meglévő, az európai ember számára megszokott mértékek. A francia öl, a „toise” kb. 0,975 m volt. A mai angol yard nagyjából 0,914 m. A többször emlegetett másodpercinga – azaz egy fél-lengést 1 s alatt végző matematikai inga – hossza Európában 0,993 m. Az európai ember valamiféle szereti az 1 m körüli hosszúságot, bár számos ellenpélda is akad más kultúrákból. A másik szempont talán az volt, hogy a délkör hossza/m hányados valamiféle könnyen megjegyezhető, „kereke” szám legyen, így adódhatott az 1:40 000 000 arány. („Még kerekebb” arányként is felfoghatjuk: a délkör Északi-sark és az Egyenlítő között mérhető szakaszának 1:10 000 000 része.)

De honnan e vonzódás a méter körüli hosszegységekhez? A neten kutakodva erre a kérdésre csak meglehetősen misztikus, sőt számmisztikával vegyített magyarázatokra leltem, igaz, ilyenek akadnak bőségesen. Az egyik érdekes teóriával Borbola János áll elő a tanulmányában, amelyek a magyar királyi korona méreteiből, a rajta található egyes szimbólumokról – melyeket a szerző egyiptomi hieroglifiként deklarált –, a szerinte 31,5 vagy 31,6 cm-es láb, mint ősi mértékegység átmérőjének megfelelő kör kerületéből stb. vonja le a következtetéseit, amelyek alapján a méterhez közeli mérték az ókorból levezethető. Az egyik cikkében [3] például erre a következtetésre jut: „A Szent Korona alaplímértékét képező abüdoszi kettős láb metrikus egységekben mért és egyiptomi hieroglifikával írt nagysága a pártázat alakos elemein félreérthetetlenül olvasható. A Szent Korona és a méter közötti összefüggés közvetlen bizonyítását ezzel befejezhetjük.”

Vagy így van, vagy nem, lelke rajta... A pártázaton tényleg láthatók a más „koronairadalomban” hegyként v. dombként definiált díszítőelemek, amelyek akár a 10-es szám hieroglifikus jeleiként is felfoghatók. Ez azért is érdekes, mert Csomor Lajos, aki műveiben többek között rendkívül részletesen leírja a Korona szerkezeti felépítését, elkészítésének technológiáját, szimbólumrendszerét, csak érintőlegesen tárgyalja a pártázat díszítőelemeit. Azt viszont több helyen hangsúlyozza, hogy a műtárgy minden mérete egyértelműen az ősi hüvelyk-rendszer tükörzi...

Az általuk leírtakkal kapcsolatban nem tudok, nem is kívánok állást foglalni, csupán egyetlen aggályomat fejezem ki. Míg az újkori méterdefiniciók között mikrométeres eltérések lehetnek, addig ha a fentiek alapján a 31,6 cm-es lábátmérővel számoljuk is a kör kerületét, az kb. 99,274 cm-re adódik. Bár közelebb van a mai méterhez, mint pl. a yard és a többi említett egység, de mégsem tekinthető egyenlőnek az újkori méterrel, még mindig több mint 7 mm az eltérés! Igaz, lényegesen jobb eredményt kapunk az egykori „egyiptomi pi”-vel, azaz  $\sqrt{10} \approx 3,16$ -tal történő szorzással; e szerint 999,3 mm-re jön ki a kör kerülete. A szerző nem említi, hogy a  $\sqrt{10}$ -nél jobban közelíti a  $\pi$ -t a szintén az ókorban kedvelt  $22/7 \approx 3,1426$  arányt, amit a szerszámgyártásban maig is használnak mint kerékfogszám-arányt. Ezzel viszont valamivel rosszabb érték (993,14 mm) adódott volna.

A mérés elméleti és gyakorlati megtervezésére Jean-Charles de Borda vezetésével bizottság alakult, melynek olyan nagynevű tudósok voltak a tagjai, mint pl. Nicolas de Condorcet, Joseph Louis Lagrange, Pierre-Simone de Laplace és Gaspard Monge. Igazán illusztris társaság!

Az első elképzelések között szerepelt a Dunkerque–Perpignan közötti ívszakasz (az ún. Lacaille–Cassini-ív) újramérése, ám végül az Akadémia úgy határozott, hogy a tényleges mérést a párizsi csillagvizsgálón áthaladó délkörnek (mai mérések alapján  $2^{\circ} 20' 14,025''$  E) egy közel tíz szögfoknyi szakaszán végzik el.

A mai, Greenwichen áthaladó kezdő délkört az 1884-ben Washingtonban megtartott Nemzetközi Meridián Konferencián fogadták el. Addig sok délkört tekintettek vonatkoztatási hosszúságnak, köztük a párizsit is.

A nemzetközi kereskedelem és áruszállítás körülményeit a fejlődés akkori állapotában nem csak a mértékegységek különbözősége nehezítette, hanem a térképek vonatkoztatási adatainak jelentős eltérése. Ezért csaknem egyidejűleg kötötték meg a nemzetközi kezdőmeridiánra vonatkozó egyezményt, a Nemzetközi Méteregyezményt és az egyezményes koordinált világidőre vonatkozó egyezményt is (amely alapján a vonatkoztatási időpont a greenwichi idő, a GMT.)

A mérésre a délkörnek a Dunkerque és a barcelonai Montjuic dombon levő erőd (Castillo de Montjuic, ma kedvelt turisztikai célpont) közötti szakaszát jelölték ki (kb. 1075 km;  $9^{\circ} 40' 23,89''$ ). A kijelölt szakasz előnye az volt, hogy a  $45^{\circ}$ -os szélességi kör mindkét oldalára kiterjedt, és végpontjai a tengerszinthez közeli magasságban voltak. Két, egymástól független mérőexpedíciót szereltek fel 1793-ban. Az egyiket bízták meg a Dunkerque-től Rodezig terjedő táv megméréseével, Jean Baptiste Joseph Delambre vezetésével. A Montjuictól Rodezig terjedő táv meghatározását végző expedíciót Pierre François André Méchain vezette (mindkettőjük csillagász-matematikusi, Delambre történész is; 2. ábra).



2. ábra: Jean Baptiste Joseph Delambre (baloldalt) és Pierre François André Méchain

A 3. ábra térképén a délkör szóban forgó szakaszait a széles sáv ábrázolja, kissé „törtvonalas közelítéssel”. A mérések csillagászati helymeghatározásokból, geodéziai

háromszögelésekből és szabatos szintezésekből álltak. A háromszögelések két nagyon gondosan kimért, hat-hat mérföldes alapvonalát Delambre-ék Melunnál (Párizs közelében), Méchain-ék Perpignannál (a francia–spanyol határ közelében) fektették fel, a háromszögelési hálózatot ezekből kiindulva fejlesztették. Alapmértékül ismét a *toise du Pérou*, ill. annak másolata szolgált. Bár Borda kidolgozott egy kis hőfokfüggésű, kettősfém (platina-sárgaréz) mérőrudat, ami a hőtágulást meghajlással kompenzálta volna, végül nem ezt választották. A háromszögeléshez az akkoriban elképzelhető legpontosabb osztású vízszintes körrel felszerelt speciális, kéttávcsöves műszert használták, ám kifejezetten erre a célra készítették. A különleges szögmérő teodolitnak nem nevezhető, hiszen függőleges köre nincs.



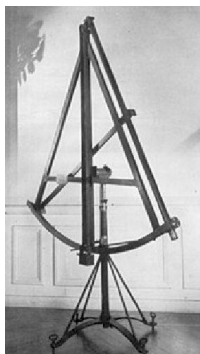
3. ábra: A Párizson áthaladó délkör megmért szakaszának térképvázlata

A mérési elv – némileg leegyszerűsítve – a következő. Az egyik távcsöve a vízszintes körhöz rögzített volt, így az egyik pontra irányzaskor „magával vitte” a skála nullpontját. A másik távcsövel megirányozták azt a pontot, aminek az előző ponthoz képest, a műszer álláspontjához viszonyított szögét meg kellett határozni. Az index segítségével ez a szög közvetlenül leolvasható volt. Ezek a mai szemmel nézve óriási méretű geodéziai műszerek (és a csillagászati helymeghatározásra szolgáló asztronómiai sextánsok is) hatalmas átmérőjű beosztásos körökkel voltak felszerelve, mert csak így tudták elérni a kívánt pontosságot és felbontást (4. és 5. ábra).

A szögmérő műszerek tehát ún. ismétlőkörös rendszerűek voltak (az elvet Etienne Lenoir dolgozta ki 1784-ben, majd Borda tökéletesítette. A körök egyébként nem  $360$  fokok, hanem  $400$  gonos – inkább újfoknak mondjuk, és a geodéták ma is használják – alaposztással bírtak. Ellentétben a régi *vicc poénjával*, itt bizony a derékszög  $100$  fok, pontosabban:  $100$  gon. A gon törtrészeit is természetesen decimális alapon származtatják: centigon [cgon], milligon [mgon].) A modern műszerekben üvegyűrűn helyezkednek el az osztások (sőt, újabban egyenletesen közeli osztások helyett vonalkód) de akkoriban sárgarézbe foglalt, felpolírozott ezüstsavokra ejtették meg a karcokat.



4. ábra: A kéttávcsöves szabatos szögmérő műszer

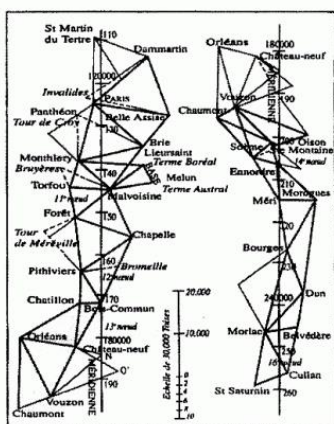


5. ábra: Korabeli szabatos szextáns

A teljes ívszakasz vázlatos hálózatát a 6. ábrán, illusztrációképpen a Dunkerque-től induló háromszögelési hálózat két kapcsolódó részhálózatának tervezetét a 7. ábrán láthatjuk.



6. ábra: A mérendő ívszakasz térkép-vázlata az egyszerűsített háromszögelési hálózattal, amelyen a két alapvonalat (*baseline*) is feltüntették



7. ábra: A délkört övező háromszögelési hálózat Dunkerque-től induló két kapcsolódó részvényének tervezete

Az expedíciók sok viszontagságot értek meg. A falusi lakosság többször lerombolta Delambre-ék geodéziai jelzőpontjait, mert a fehér jelzőzászlókat királypárti jelképnek vélték – abban az időben ez nem volt éppen életbiztosítás –, följelentették az expedíció tagjait, akiket többször el is fogtak, majd nagy nehezen szabadon engedtek. Végül 1797-ben lettek készen a mérésekkel.

A nehezebb terepet jelentő Pireneusokban Méchain balesetet szenvedett és kórházba került, máskor banditák elől kellett menekülnie, időközben kitört a francia-spanyol háború, Méchain-t bebörtönözték, idegösszeomlást is kapott. Így ők csak 1798 szeptemberében végeztek. Méchain még a börtönben rájött, hogy hibásan mért. Később az 1799-ben hatalomra került Napóleontól kért – és kapott – engedélyt a mérés megismétlésére. Erre azonban nem került sor, mert 1804-ben sárgalázban elhunyt. A mérési jegyzőkönyvei alapján még 1798-ban Delambre korrigálta a számításait. Az 551 584 toise távból Delambre kb. 380 000, Méchain kb. 170 000, toise-nyit mért meg.

Ismét tesztek egy kis kitérőt. Mint látjuk, a métert előkészítő események a francia forradalmat közvetlenül követő alkotmányos monarchia, majd a köztársaság idejére estek. A decimális mértékrendszert a Nemzeti Konvent a naptárra és az időmérésre is kiterjesztette, már amennyire az lehetséges volt. Az 1793 és 1805 között bevezetett forradalmi naptárban

a római számokkal jelzett évek az őszi napéjegyenlőség idején kezdődnek, 12 harmincnapos hónapból állnak. 1 hónap 3 tíznapos dekádból, 1 nap 10 decimális órából, 1 óra 100 decimális percből állt. Ehhez persze a másodperc értelmezését is meg kellett változtatni. A fennmaradó 5 nap egy-egy erénynek szentelt ünnepnap. Szökőévenként a 6. nap a forradalom ünnepe volt. 1806. január 1-jei hatállyal Napóleon visszaállította a Gergely-naptár szerinti időszámítást.

A délkörmérés emlékére 200 évvel később az egyik kezdőponton, a barcelonai erőd négyzet alaprajzú tornyának falán emléktáblát helyeztek el (8. ábra). Odalátogató honfitársaink a Montjuic dombot a Gellért-hegyhez, a rajta levő erődöt a Citadellához szokták hasonlítani. A dunkerque-i kezdőpont a harangtorony (9. ábra), a rodezi végpont az ottani Notre-Dame-katedrális volt.



8. ábra: A Castillo de Montjuic négyzetletű tornya és a falán elhelyezett emléktábla



9. ábra: A dunkerque-i kezdőpont, a harangtorony

Még a tervezettnél jóval tovább elhúzódo mérések befejezése előtt, 1795-ben elkészült az első ún. „levéltári méter” (*Mètre des Archives*), amelyet a Konvent augusztus elsején fogadott el. Lehet, hogy ebben közrejátszott a forradalmári türelmetlenség? Ez a méterrúd egy sárgarézből való, téglalap keresztmetszetű véglapos mérték volt, mai szóhasználattal akár mérőhasábnak is nevezhetnénk. Ideiglenes alpmértéknek tekintették; a hossza egyébként 443,443 párizsi vonalnak felelt meg. Az etalon hosszának megfelelően 16 db, márványtáblába ágyazott sárgaréz véglapokkal rendelkező métert is készítettek, melyeket 1796-ban, ill. 1797-ben különböző épületek falába építettek be Párizs legforgalmasabb pontjain, hogy bárki által hozzáférhetőek legyenek. Ezenél a tábla síkjából, arra merőlegesen kiálló csapok belső, egymás felé néző síkjai közötti távolság testesíti meg az alpmértéket, persze erősen korlátozott pontossággal. A nyilvános méterek segítségével például a korabeli kereskedők, mesteremberek ellenőrizhették a

méterrúdjaikat. A „befalazott méterekből” mára kettő maradt épségben, de csak egy van az eredeti helyén, a Luxembourg palotával szembeni épület árkádjai alatt (10. ábra).



10. ábra: „Befalazott méter” a rue Vaugirard 36. alatti épületen. (Fenn a két végelem, alul a teljes hosszsmérték)

Miután mindkét mérőcsapat végrehajtotta a feladatát, a két mérési eredmény összevetése alapján a méter hossza a számítások szerint 443,295936 vonalnak adódott; véglegesen 443,296 vonalnak vették, 13 °R (= 16,25 °C) hőmérsékleten. Ebből következik, hogy egy párizsi vonal 2,256 mm volt. Ez a mérési felbontás akkoriban köznapi életben tökéletesen elegendőnek bizonyult. Még sok műszaki szakember is túlságosan finomnak találta a milliméteres osztást! Ne feledjük, a 0,1" = 2,54 mm még a hajdani párizsi vonalnál is durvább, de néhány évtizede elterjedt „rasztermérete” volt az elektronikai paneleknek és számos alkatrésznek.

A földfelszín alakja szabálytalan. A leírására ma a világóceán közepes, nyugvó tengerszintjére fektetett geoid szolgál (Johann Benedict Listing, 1878), amely azonban matematikailag nehezen kezelhető. E helyett régóta különböző forgási ellipszoidokkal – ún. földi ellipszoidokkal, sferoidokkal – közelítik ezt a mértani felületet. Az egyes országok olyan ellipszoidot választottak, amely a területükön a legjobban illeszkedett a geoidhoz. Az első használható sferoidot Friedrich Bessel definiálta, és 1841-ben publikálta. Ez szerint a Föld fél nagytengelye (az egyenlítői sugár):  $a = 6\,377\,397,155$  m; a fél kistengelye (a forgástengely):  $b = 6\,356\,078,963$  m; a lapultság  $([a-b]/b)$ ,  $f \cong 1/299,15$ .

Bessel sferoidját az 1940-ben közzé tett, és a szovjet fennhatóság alatt álló államokban – így Magyarországon is – a II. világháború után bevezetett Sztjepan Kraszovszkij-féle ellipszoid váltotta fel ( $a = 6\,378\,245$  m;  $b = 6\,356\,863,019$  m;  $f = 1/298,3$ ).

Ma a Nemzetközi Geodéziai és Geofizikai Unió (IUGG) az 1967-ben publikált GRS 1967 elnevezésű ellipszoidja van érvényben ( $a = 6\,378\,160$  m;  $b = 6\,356\,774,516$  m;  $f$  (vagy  $\alpha$ )  $\cong 1/298,25$ ).

A fentiek a földfelszíni geodéziai hálózatok kialakítása során voltak használatosak. A GPS rendszer az ún. WGS84 (World Geodetic System, 1984), *geocentrikus* forgási ellipszoidot használja ( $a = 6\,378\,137$  m;  $b = 6\,356\,752,3142$  m;  $f$  (vagy  $\alpha$ )  $\cong 1/298,26$ ).

A sferoidokat a felmérések során, a számítások egyszerűsítése érdekében, 500 km<sup>2</sup>-nél kisebb területen belül 6371 km sugarú gömbfelülettel, 50 km<sup>2</sup>-nél kisebb területen pedig síkfelülettel helyettesíthetik. Ez azonban kizárólag a szögmerésekre vonatkozik; a magasságmérések (szabatos szintezések) alapfelülete mindig a geoid, hiszen a szintezőműszerek libellája vagy kompenzátora a helyi függővonal normálisát tűzi ki mint vízszintes irányt!

Mindenesetre a Föld lapultsága már a délkörmérési adatok feldolgozása során is problémássá tette az ívhossz értelmezését. Delambre az alábbi másodfokú polinomot javasolta a méter végleges hosszának megállapítására:

$$1 \text{ m} = 443,39271 - 27,70019f + 378,694f^2,$$

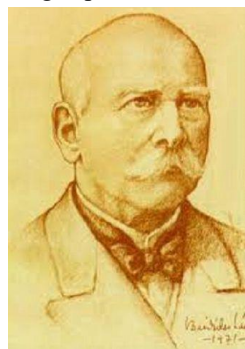
ahol az eredmény párizsi vonalban értendő. A témával foglalkozó matematikusok  $f$ -re a legkülönbözőbb értékeket számították ki. Például Legendre  $f = 1/148$  értéket állapított meg, amit azonban több tudós helytelennek vélt. A legkülönbözőbb, ennél kisebb  $f$ -et javasoltak. Delambre végül a korábbi perui, Bougueren átmenő délkör ívmérési adatainak újrászámolása alapján az  $f = 1/308,64$  értéket tartotta helyesnek.

A megállapított alaphosszúságot megtestesítendő újabb, szintén téglalap keresztmetszetű (4×25 mm-es), véglapos méterrudakat rendeltek, immár finomított platinából. Marc Etienne Janety, eredetileg XVI. Lajos ékszerésze, 1795-ben 4 db kilogramm és 4 db méter mértéket gyártott le. Ezek közül egyet-egyet jelöltek 1799-ben arra a célra, hogy etalonként használják. Innentől ezeket illetik általánosságban a levéltári kilogramm, illetve a levéltári méter (*Mètre des Archives*) névvel. A levéltár tulajdonképpen a Köztársasági Archivum. A méterrúdra rávésték a francia forradalom szállóigéjét: *À tous les temps, à tous les peuples* (Minden időkre, minden népnek).

Az ezen méterrúddal történt összehasonlító mérések ismétlési pontossága a 10<sup>-5</sup> méter, azaz 0,01 mm nagyságrendjébe esett. Ezzel egyidejűleg több vas (acél) alapanyagú méteretalont is előállítottak. A levéltári etalont, az „ösméter” máig ott őrzik.

1812-ben Napóleon császár engedélyezte a régi mértékegységek használatát. 1837-től kezdve ismét a méter és a kilogramm lett a hatályos.

Már a mérések megkezdésekor több tudós aggályát fejezte ki a délkörmérés kellő pontosságára, megismételhetőségére vonatkozóan. A mérések az akkori eszközökkel nem hozhatták meg a kívánt eredményt. Évekkel később két neves csillagász-matematikos, Bessel és Clarke egymástól nagyságrendekkel eltérő hibát határoztak meg, mint a mérések vélhető hibáját. Mások a hibahatárt 10<sup>-3</sup> m-ben, azaz 1 mm-ben korlátozták. A legújabb mérések szerint az akkor megállapított méter mintegy 0,2 mm-rel rövidebb a délkör negyvenmilliomod részénél, tehát látszólag meglepően jó (lehet, hogy ez csak a véletlen műve), de messze van a kellő pontosságú reprodukálhatóság fogalmától! Ha a mérést a mai legkorszerűbb eszközökkel és módszerekkel ismételné meg valaki, az eredményül kapott hosszúságegység meghatározási bizonytalansága elmaradna az akkori követelményektől is; az aggályok tehát nagyon is megalapozottak voltak...



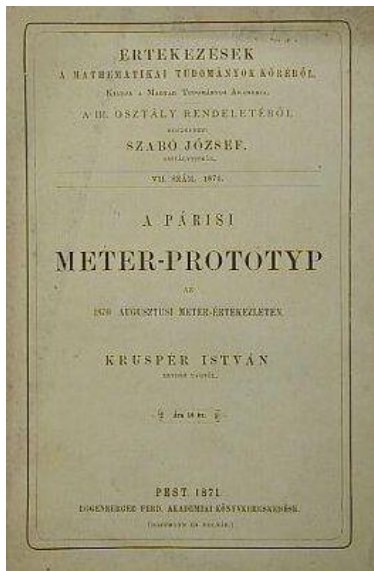
11. ábra: Kruspér István (1818–1905)



12. ábra: Szily Kálmán (1838–1924)

Több évtized elteltével a levéltári méter véglapjain horpadásokat (síktól való eltéréseket) lehetett kimutatni. Kruspér István (11. ábra) – aki akkor már a Királyi József Műegyetem Geodéziai tanszékének vezetője volt, Szily Kálmán fizikussal (12. ábra) együtt, 1870-től részt vett az 1875-ös Nemzetközi Méteregyezmény előkészítő tárgyalásaiban; ld. később –, részletes értekezést írt magáról az etalonról (*A párizsi méter-prototyp*, Pest, 1871; 13. ábra), mind a véglapokon tapasztalható, az etalon óvatlan kezeléséből adódó sérülések, mélyedések

megméréséről (*A párisi levéltári méterrúd véglapjain levő mélyedések megméréséről*, Budapest, 1873).



13. ábra: *A párisi meter-prototyp* c. füzet borítója

Az előbbiben Kruspér is aggályait fejezi ki a délkörmérés pontosságát, értelmét illetően, véleményét rövid hibaanalízissel alátámasztva. Ugyancsak e műben esik szó a vas – vagyis inkább acél – mérőrudak, így pl. a *toise du Pérou* megbízhatatlanságáról, amit a többszöri hőtágulás/összehúzódási ciklusok után a „molekuláris változásokra” visszavezethető maradó hosszváltozás okoz. Zseniális előrelátására vall, hogy a kilogrammetalon tömegének időbeni változatlanóságát is megkérdőjelezi! Utóbbi kétely mára beigazolódott; a végén erre visszatérünk.

A másodikként említett kiadványban bírálja a sérülések mérésére tett francia kísérleteket, módszereket, és egy speciális, hasított objektívű összehasonlító mikroszkópot javasol azok mélységének megállapítására. (Kruspér értekezéseit, akadémiai felolvasásainak anyagát kisalakú, puha fedelű füzetkékben adták ki, a 13. ábrához hasonló borítótérvel.)

A keletkezése idején a méterrendszer még Franciaországban is megelőzte a korát. Többször is el kellett rendelni a kötelező használatát, utóljára jóval Napóleon száműzetése után, 1837-ben.

1867-ben a párisi világkiállításon Moritz von Jacobi (aki nem tévesztendő össze testvérével, Carl Gustav Jakob Jacobi matematikussal) Szentpétervári Tudományos Akadémia elnökének kezdeményezésére Méterbizottság alakult, amelyben a Nemzetközi Geodéziai Szövetség is részt vett. A 24 meghívott tagállamot is képviselő bizottság leszögezte, hogy a méterrendszer tökéletesen megfelel a tudomány és a gazdasági élet igényeinek.

A politikai változások Magyarországot is az új mértékrendszer bevezetésére készítették. 1867 közepén Gorove István kereskedelemügyi miniszter véleményt kért ezzel kapcsolatban a Magyar Tudományos Akadémiától és más szervezetektől, szakértőktől. A véleményezés alapját egy Bécsben kidolgozott javaslat képezte. Ezzel szemben a Kruspér Istvánból, Nendtvich Károlyból, Szily Kálmánból és Schenzl Guidóból álló „négyes bizottmány” saját javaslatot nyújtott be. Ennek pontjaival a Gorove által felkért szakértők szinte mindegyike egyetértett, így a

„tizedes mérték- és súlyrendszer behozataláról” szóló törvényjavaslatot Gorove utódja a miniszteri székben, Szilágyi József, 1870. június 3-án benyújtotta.

A javaslat egyik érdekessége, hogy „szabványos alapmértékül” a Nagy Károly gyűjteményéből származó platina méterrudat ajánlotta. Ezt a 4×25,3 mm keresztmetszetű hosszmérteket eredetileg 1844-ben a párisi Observatoire számára készítette egy párisi műszerész. Mivel a tudományos intézmény pénz hiányában halogatta az átvételét, az éppen akkor Párizsban járó gyűjtő – aki jó kapcsolatot ápolt francia tudományos körökkel – vásárolta meg, a platina-kilogrammal és a liter-etalonnal együtt. Nagy világosan látta a decimális mértékegységek előnyét: „[...]a méteri rendszernek kitűnő tulajdonságai oly számosság, hogy előtűnik bármely ellenvetés elenyészik” [4].

A három etalont a szabadságharc során elhurcolták a gyűjtemény több darabjával együtt, de később a Magyar Tudományos Akadémia birtokába kerültek. Az Akadémia, Nagy Károly eredeti szándékának megfelelően, 1870-ben díjtalanul átengedte az államnak (fent idézett Akadémiai Értesítő). Sajnos, az első világháborúban ezek a relikviák elvesztek.

Nagy Károly (1797–1867) a vegytan és a természettan tudósa, polihisztor, a Kossuth-kormány külügyminiszterének, gróf Batthyány Kázmérnak volt a gazdatisztje. Kellően erős mecénásra talált tehát ahhoz, hogy 1845-ben a Bicske melletti Galagonyáson elkezdje megépíteni magán-csillagvizsgálóját (az eredetileg háromtornyú, háromkupolás épületegyüttes romjai máig láthatók; 14. ábra). A létesítmény 1847-ben lett készen. Akkoriban európai színvonalú felszereltséggel bírt, a műszerek zömmel Bécsben készültek. A csillagvizsgálót vonzó kulturális központtá kívánta tenni. Többször tett ott látogatást két legkedvesebb vendége, Kölcsey és Vörösmarty is. Sajnos, a létesítmény csak 1849-ig működött. '49-ben Nagy Károlyt meghurcolták, és emigrációra kényszerült. A szabadságharc idején leszerelt műszerek, felszerelési tárgyak egy része elkallódott, a szerencsésebbek az ország különböző közgyűjteményeiben kaptak helyet. Néhány eszköz jelenleg a Magyar Műszaki és Közlekedési Múzeumban található meg. Az impozáns, 100 mm körüli átmérőjű refraktorral felszerelt „Nagy meridiánkör” a Kaposvár utcai tanulmánytárban (talán) megtekinthető.



14. ábra: Nagy Károly bicskei obszervatóriumának romja. Az eredetileg háromtornyú, könyvtárral és kiszolgáló helyiségekkel is bíró épületkomplexumból ennyi maradt

A méterrudat és a kilogramm-alapmértéket 1870-ben Párizsba vitték, az „ösmértékekkel” való összehasonlítás céljából. Az összehasonlító mérést (komparálást) Kruspér és Szily végezte. A munkát olyan alaposan, lelkiismeretességgel abszolvárták, hogy a párisi intézet Kruspért egy értékes, kék mázzal bevont, aranyozott díszítésekkel ellátott porcelán vázával jutalmazta meg. A

visszahozott etalonokat és a hitelesítési okmányokat a Magyar Országos Levéltárban helyezték el.

A kormány értesült arról, hogy az 1867-ben Berlinben ülésezett geodéziai konferencia egy új, európai méter-alapmérték elkészítését javasolta. A végleges mértékek összehasonlítása ui. az akkori eszközökkel a szükséges pontossággal nem volt lehetséges (a mérési bizonytalanság 5...10  $\mu\text{m}$ -re tehető). További gondot jelentett a méterrúd anyagának nagy hőfoktényezője.

Sajnos, a „négyes bizottmány” javaslatának tárgyalására nem került sor, viszont az osztrák törvényjavaslat 1871. július 23-án törvényerőre emelkedett. Az osztrákok akkoriban a bécsi Akadémia ún. Steinheil-féle, üvegből készült méterrúdját – ezt a téglalap keresztmetszetű, mindkét végén lekerékített üvegléccet – tekintették alapmértéknek, mert úgy gondolták, hogy szemben a fémekkel, az nem oxidálódik. Hasonló megfontolásból a tömegetalon náluk kvarckristályból volt kimunkálva.

1874. január 26-án ismét benyújtották az eredetihez képest több ponton módosított törvényjavaslatot, hogy az osztrák törvény 1876-os életbelépését megelőzzék. Ebben már kifejezetten a „méter mérték” behozataláról is szó esik. Az 1874. évi VIII. törvénycikk ez év április 20-án emelte jogerőre a méterrendszer bevezetését Magyarországon. Még ebben az évben, Kruspér javaslatára megalakult a Magyar Királyi Állami Központi MértékHITELESÍTŐ Bizottság, amely a szintén ekkor létrehozott mértékHITELESÍTŐ hivatalokat, ill. a korábban komoly önállósággal rendelkező megyei mértékHITELESÍTŐ intézeteket felügyelte. Első igazgatója maga Kruspér lett, aki 16 évig töltötte be a tisztséget.

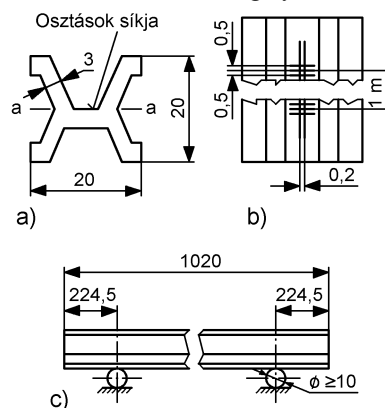
### 3 A PLATINA-IRÍDIUM MÉTERPROTOTÍPUSOK

A méter általános bevezetésének előkészítésére 1875. május 20-án Párizsban „Nemzetközi Méteregyezmény” készült. A Méteregyezmény az a legrégebben megszületett nemzetközi szerződés, amely ma is érvényes! Ennek ajánlására alakult meg 1889-ben a Nemzetközi Súly- és Mérésügyi Hivatal (Comité International des Poids et Mesures; CIPM). A Méteregyezmény aláírói között ott volt az Osztrák–Magyar Monarchia részéről Apponyi Rudolf párizsi nagykövet. Ezzel jogot szereztünk arra, hogy később birtokoljuk a méter- és a kilogrammetalon egy-egy példányát.

Mint sejthető, ekkoriban a méter fogalmát zavaró kettősség jellemezte: egyrészt a délkör negyvenmilliomod részét, mint vélt természeti állandót jelentette, másrészt a levéltári méterrúd hosszát, mint a fenti geodéziai állandó anyagi megtestesítőjét. Valójában persze a mértékHITELESÍTÉSEKHEZ csak ez utóbbit lehetett felhasználni, ezért a méternek a délkör hosszából történő lezármaztatásától (és a szóba került ismételt délkör-mérésektől is) végleg elálltak, és etalonnak a levéltári méteretalont tekintették, de elhatározták egy újabb, azénál kisebb bizonytalansággal komparálható etalontípus kifejlesztését. Ebben része volt az 1874-es magyar törvényjavaslatnak is. Végül a végleges mérték (*end standard*) helyett végvonalas (*line standard*) konstrukció mellett döntöttek.

Az újabb etalonról – amit számos métertörténeti forrás és méréstechnikai szakirodalom szintén az „ösméter” megnevezéssel illet – érdemes egy kissé részletesebben beszélni. A megtervezését Henri Tresca francia

fizikusnak, a műszaki mechanika elismert tudósának a nevéhez kapcsolják, de a kialakításában szerepe volt Kruspér javaslatainak is. A jellegzetes, „X” keresztmetszetű rúd (15.a ábra) 90% platina és 10% irídium ötvözetéből készült, ami viszonylag kis hőtágulási együtthatóval rendelkezik. A többi, szennyezőnek tekinthető ötvöző aránya egyenként 0,1% vagy az alatti lehetett. A rúd 1020 mm hosszúságú. A métert két, az *a-a* síkra – azaz a semleges síkra – a hossz tengelyre merőlegesen felvitt, 8  $\mu\text{m}$  szélességű fő karcok közötti távolság képviseli. A karcoktól 0,5 mm-re mindkét oldalon egy-egy segédvonalás található. A semleges sík középvezetében – a méterkarcok környezetében igen jó felületminőségűre felfényezett felületdarabokon – egy-egy kettős karc húzódik (a kettős karc vonaltávolsága 0,2 mm). Ezek tűzik ki az etalon tengelyvonalát (15.b ábra).



15. ábra: A platina-irídium méterrúd kialakítása, jellemző méretei, jelkarcai, alátámasztási pontjai

Ez a karcrendszer megkönnyítette a nagy nagytávú mérőmikroszkópokkal felszerelt hosszkomparátor kezelőjének a méretet jelölő karcok egyértelmű azonosítását. Az X-szelvényű méterrúd a legkisebb lehajlást eredményező, szimmetrikusan, egymástól 571 mm-re (tehát a végektől 224,5 mm-re, az ún. Bessel-féle alátámasztási pontokban) elhelyezett 2 db 10 mm (vagy legalább 10 mm) átmérőjű görgővel kellett alátámasztani

A nagy felületű és viszonylag kis keresztmetszetű méterrúd fő előnye a kellő merevségen és az ötvözetre jellemző, viszonylag nagy felületi keménységen kívül az, hogy a környezet hőmérsékletét gyorsan és egyenesen képes átvenni. A hitelesítések során ez a hőmérséklet 0 °C volt. A méteretalonok komparálásának elméleti és gyakorlati kidolgozásában – a komparálás jeges desztillált vízben történt – is nagy szerepe volt Kruspérnak, bár a folyadékban történő mérést Bessel javasolta, és komparátort is konstruált hozzá. (Akkoriban többen foglalkoztak a mérőmikroszkópokon alapuló optikai komparátorok kérdésével.) Kruspérnak a méteretalonok folyadékban történő összehasonlításról írott tanulmánya: *A vonásos hossz mértékek összehasonlítása folyadékban*, ill. *a A komparátorokról* című (mindkettőt Budapesten adták ki, 1873-ban), amelyben a különböző komparátorok előnyeit, hátrányait is részletezi.

Nem lebecsülendő előnye a bemutatott szelvénynek a téglalap keresztmetszetű mérőrúddal szemben az, hogy a rendkívül drága ötvözetből kevesebbet kellett hozzá felhasználni ahhoz, hogy az inerciája ugyanakkora legyen.

Az etalont Párizs mellett, Sèvres-ben őrizték, egy külön e célra emelt épületben, a Pavillon de Breteuilben, amely ennek következtében nemzetközi státusú intézménnyé vált és területen kivüliséget élvezett. (Ha minden igaz, 1927-ig tárolták itt.) A platina-irídium méterrúd jellegzetes szelvénye a 2006-ban megszűnt Országos Mérésügyi Hivatal jelvényének központi eleme volt (16. ábra).



16. ábra: Az egykori OMH címere

A méter meghatározása akkoriban így hangzott: „Egy méter az a távolság, amely a Párizsi platina-irídium méterrúd két középső osztásának a tengelyvonalak által határolt szakasza között mérhető 0 °C-on, 750 torr nyomáson a fent részletezett alátámasztás mellett”. Ezt a meghatározást 1889-ben az iparilag fejlett államok elfogadták – Anglia és az Egyesült Államok kivételével.

Érdekes adalékok a méterrúdak legyártása körüli nehézségekről. Mindaddig csupán 100 kg platina-irídium ötvözetet sikerült készíteni (George Matthey metallográfus által 1862-ben), de szükségessé vált ennek kiegészítése 250 kg-ra. Ezt Henri Sainte-Claire Deville és J. Henri Debra pótolták. Az ötvözet három hatalmas darabból állt, amelyet 2 kg-os részekre vágtak. Az öntési művelet 1874. május 13-án történt a Conservatoire des Arts et Metiers épületében, Henri Tresca, a fia, Gustav Tresca, George Matthey, Deville és Debray felügyelete alatt. Az eredményül kapott öntvény 236 kg lett. Az X forma létrehozása közben néhány munkadarab eltört, így összesen 27 méterrúdat sikerült elkészíteni. Amikor Deville ellenőrizte az öntvények sűrűségét, kiderült, hogy az a vártnál kisebb, mert vas- és ruténiumszennyeződés került bele. Matthey megállapítása szerint a vasszennyeződés az X formák hideghúzása miatt került a méterrúd anyagába. Ezért felkérték, hogy készítsen két négyzetes méterrúdat is. Ezek hidegalakítása már sikerrel járt, és ezzel vált véglegessé az X formájú változat. A rudak X formába való sajtólása 448 órányi időt vett igénybe. 1876 és 1878 között további méteretalonokat készítettek, többek között egy négy méter hosszú darabot is a Nemzetközi Geodéziai Társaság megrendelésére.

1882-ben a francia állam további 30 méterrúdat rendelt (a cég neve akkor már Johnson és Matthey volt). Az ötvözet összetétele: 89,75-90,25% platina; 9,75-10,24% irídium; <0,1% ruténium; <0,1% vas; <0,15% ródium és palládium; <0,02% arany, réz, ezüst, vagy egyéb fém. [5]

A nyersgyártmányokat a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban (BIPM) vetették alá a végső megmunkálásnak. A sorszámmal ellátott, a méretjelölések környezetében tükrösített felületű méterrúdra felvitték a karcokat. Mivel a 6. számú rúd karctávolsága esett a legközelebb a levéltári méter hosszához – csak 6 µm-rel bizonyult rövidebbnek azénál –, ez lett az elsőrendű, a nemzetközi méteretalon (*metre internationale*). A többi – a másodrendű etalonokat – az egyezményt elfogadó országok között 1889. szeptember 24-én Párizsban kisorsolták és átadták.

A magyar kormány még 1881. február 3-án egy méteretalont és egy kilogrammetalon rendelt. Ezek értékét utólag 13 278 frankban (6500 akkori forintban) állapították meg.

Érdekességképpen megemlítem, hogy az USA a 27. számú másolat tulajdonosa lett (17. ábra), bár a köznapi életben máig a tradicionális, nem decimális alapú mértékek vannak használatban. Így a hossz mértékek az inch – col, hüvelyk –, a láb, a yard, a szárazföldi, ill. a tengeri mérföld. Ezek átszámítását a metrikus rendszerre precízen definiálták. E szerint pl. 1" = 25,4 mm, 1 ft = 12", 1 yd = 3 ft = 0,9144 m.



17. ábra: Az USA 27. számú méteretalonjának „B” vége

Az előzőekhez annyit azért hozzáfűzök, hogy a másodperc az USA-ban is másodperc. Azonban az ottani szakírók nem a secundum törvényes SI rövidítést, az s-t használják, hanem a sec-et. Az a baj, hogy ez nálunk is elterjedt: számos népszerű ismeretterjesztő folyóiratban, tudományos folyóiratban, de még néhány PhD dolgozatban is találkoztam ezzel a jelölésmóddal!

Jelen cikk megírása idején az USA-n kívül Libéria és Mianmar (korábban Burma) még nem iktatta törvénybe az SI-t. Mindenesetre az előbbieket tükrében átérzhetjük, hogy kicsoda hatalmas vívmánynak számított a decimális mértérendszer! Pedig Simon Stevinus 1584-ben, *De Thiende* című művében már javasolta a mértékegységeknél is a decimális rendszer bevezetését...

#### 4 MAGYARORSZÁG MÉTER-ALAPMÉRTÉKE, A NEMZETI MÉTERETALON

Magyarország a 14. sorszámú méteretalont kapta (18. ábra), amelyet átadás előtt összehasonlítottak a 6. számú párizsi méterrúddal. A nemzeti méteretalon 1,3 µm-rel bizonyult rövidebbnek a nemzetközi etalonnál.



18. ábra: A 14. számú platina-irídium méteretalon „A” jelű vége a karcokkal. (Fotó: Dabasi András, Magyar Nemzeti Múzeum)

A 14. számú méterrúd hivatalosan megállapított hőmérsékletfüggő hossza, azaz a fő karcok közötti távolság m-ben:

$$M_{14} = 1 - 1,3 \cdot 10^{-6} + 8,646 \cdot 10^{-6} t + 10^{-9} t^2,$$

ahol  $t$  a hőmérséklet °C-ban. A függvény jobb oldalának második tagja a nemzetközi etalonról való alapeltérés; ez mindegyik nemzeti etalon esetén más és más. A többi tag azonban az összes példányhoz mellékelt összefüggésben valószínűleg a fentiekkel megegyező. (Bizony, az alapfokú fizikai tananyagokban szereplő, mindannyiunk által ismert fogalom, a lineáris hőtágulási együtthatóval jellemzett hőtágulás nem is annyira lineáris, ráadásul ez a másodfokú függvény is nyilván közelítő pontosságú.) A komparálást először optikai komparátorokkal végezték, amelyekkel pl. a másodrendű etalon az elsőrendűvel lehetett összehasonlítani, 1925-től pedig a Michelson-féle interferométerrel egyedileg mérték meg a karcok távolságát; ld. később.

Egy érdekesség megfigyelhető a képeken: a karcok számára felfényezett felület a 14. számú etalonnál lóversenypálya alakú és a gerinc síkja körülötte alá van munkálva, míg a 27. számú etalon fotóján téglalap alakú felület látszik. Mind a 17., mind a 18. ábrán egy, a véglap



közepébe beütött 5-ös szám is felfedezhető. Ez mindkét véglapon szerepel. Mindegyik etalonrúd végei „A”, ill. „B” betűvel azonosítottak.

1891-től tehát a 14. számú méteretalon került a Nagy Károly által adományozott, 1874 óta alapmértékül szolgáló méterrúd helyére. (Ezt az 1891: VI. tc. rendelte el, mivel a korábbi néven „levéltári” etalon, azaz a „magyar ösméter” már ugyanúgy nem felelt meg a legmagasabb követelményeknek, mint párizsi elődje. Ugyanez vonatkozik természetesen a kilogrammetalonra is.)

A nemzeti méteretalont különleges bánásmódban részesítették. Először a Budapesti Nemzeti Bank pincéjében őrizték egy gyapottal kibélelt, lepecsételt ládában. A gyapotbélés egy hengeres réztokot, az pedig magát a méterrudat tartalmazó, bársonybélésű tokot rejtette. Az 1907-ben alapított (VIII. tc.) Magyar Királyi Központi Mértékügyi Intézetben két, a nemzeti méteretalonhoz hasonló „használati főmintát” készítettek. Ezekkel ellenőrizték azokat a sárgaréz alapanyagú méterrudakat, amelyek alapján a mérőeszkögyártók dolgoztak. Az intézet rendelkezett egy ún. Deleuil-féle véglapos sárgaréz minta-méterrel is. Az akkor már Központi Mértékügyi Intézet 1915-ben a berlini Bamberg cégtől 7 db különböző minta-métert, ill. néhány mérőeket is rendelt, amelyek segítségével a véglapos hosszértékeket 0,01 mm felbontással lehetett összehasonlítani. Az összehasonlításra a Műegyetemtől vásárolt francia gyártmányú műszert használták. Az egyetlen átalakított műszerrel 1 m-nél kisebb hosszúságot megtestesítő véglapos vagy végvonásos mértékeket is komparálni lehetett.

A Méteregyezményben részt vevő országokban legkülönfélébb típusú, gyártmányú méteretalonokat használtak például a műszergyártók (harmad-, ill. negyedrendű etalonok).

A II. világháborúban Budapest ostroma során a komparátor a mérőszobával együtt elpusztult, az új, klimatizált labort sokkal később, 1953-ban szerelték fel, már az OMH-ban.

Az ostrom közepette, 1944 december 15-én Adolf Eichmann SS-Sturmbannführer utasítására Budapestról elindítják a rabolt kincseket szállító „aranyvonatot”, amely többek között a magyar méteretalont is magával vitte. Az értékeket az amerikai hadsereg lefoglalta, azokat hadizsákmánynak tekintették. 1946. június 18–25. között Washingtonban a Nagy Ferenc miniszterelnök vezette küldöttség részvételével lefolytatott tárgyaláson döntöttek az MNB aranykészletének, valamint más értékeknek, műkincseknek – és például a méteretalonnak – a visszaadásáról, amit június 21-én ezt az USA külügyminisztériuma hivatalosan is bejelentett. A méterrúd 1946-ban a hadizsákmány egy részével sértetlenül visszaérkezett Budapestre. Megőrzés végett a KMI betétjeként ismét a Nemzeti Bankban helyezték el.

1951-től az intézet Mérésügyi Intézet néven folytatta a munkáját, majd 1952. szeptember 1-jétől az új neve Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) lett. Aztán változatlanul a budai Németvölgyi úti telephellyel, de a 260/2006. (XII. 20.) Korm. rendelet alapján 2017. január 1-ig Magyar Kereskedelmi Engedélyezési Hivatal (MKEH) Metrológiai Hatóság volt a megnevezése. Azóta a helyébe jogutódként Budapest Főváros Kormányhivatala (BFKH) Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály

lépett, a jogfolytonosság biztosításával és ugyanazon a telephelyen.

A párizsi elsődleges méteretalonon alapuló meghatározás viszonylag sokáig érvényben maradt, és a többször átkeresztelt mérőlaborban máig elő-előveszik a nemzeti etalon utódját. (1971-ben ez egy Hommel gyártmányú, „H” keresztmetszetű, 428. sorszámmal ellátott méterrúd volt, amit 1982-ben felváltott a szovjet ENyIMSz márkájú „Invarstabil” méterrúd. Ez esetben a megnevezés egy speciális, 58% nikkelt tartalmazó acélötvözetre utal, amelynél a kristályszerkezet időbeni változásából adódó méretváltozás minimális. A szintén „H” keresztmetszetű rúd semleges síkja végig tükrösített, amelyre 1 m hosszon, 1 mm-es osztással, 6  $\mu\text{m}$  szélességű karcokat vittek fel. A tengelyvonalat ennél is egy 0,2 mm térközű karc pár tűzi ki, amely végigvonul a teljes hosszon. Ezek a finom vonások szabad szemmel csak megfelelő megvilágítás, „súrlófény” mellett észlelhetők. A 0114-77 számú etalon névleges hibája az 1 m-es hossza vonatkoztatva 0,3  $\mu\text{m}$ . A „H” egyik felső bordasíkján számozott centiméteres osztás található, megkönnyítendő a főosztások azonosítását (19. ábra).



19. ábra: Az ENyIMSz milliméterosztásos etalon (Az MKEH-ben fotózta a szerző)

Gyakorlatilag azonos keresztmetszetű és anyagú méteretalonokat több műszergyártó is kínált. Egy szép, angol gyártmányú darab látható a 20. ábrán, amelyen 1 mm-es számozott azonosító osztás figyelhető meg.



20. ábra: Egy H-profilú, milliméter-segédosztásos etalon. (Hilger & Watts, 1948)

A fenti típusú nagy pontosságú hossz mérő skálák paraméterei „szabványosítottak”. A vonatkozó előírásokat az OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) 1991-ben kiadott R 98 számú, *High-precision line measures of length* című közleménye tartalmazza. (A neten könnyen megtalálható.) Ez a fotókon is látható H keresztmetszetet befoglaló méreteit 25×30 mm-ben szabja meg. Az 58% nikkelt tartalmazó acélötvözet lineáris hőtágulási együtthatóját  $11,5 \pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ -ben deklarálja, +15...+30 °C környezeti hőmérséklet határok között. A mércéket 5 pontossági osztályba sorolja, az osztások

paraméterei, a maximális eltérések is ettől függenek. A legh pontosabb az M osztály.

Az ilyen etalonok mérése szárazon, klimatizált laborban történik, a mércét a készlethez mellékelt görgőkön feltámasztva. A feltámasztás elve kissé hasonló a kéttámaszú híd szerkezetek görgőihöz: az egyik görgőn síklapot alakítottak ki, így az felfekszik a mérőpad vízszintes síkján, elfordulni nem tud. A másik görgő viszont szabadon működhet. Ez a kivitel megelőzi az etalonrúd mérés közbeni elmozdulását. Az etalon oldalán a két alátámasztási helyet megjelölték. A BFKH-ban az összehasonlításokat különböző gyártmányú lézert interferométerek segítségével végzik.

A platina-irídium nemzeti méteretalon ma is a Főosztály tulajdonában van. Csupán műszaki emlék, múzeumi tárgy, amelyet a Magyar Nemzeti Múzeumban helyeztek letébe, 1996-ban. Az akkor berendezett állandó kiállításon tekinthető meg, stílszerűen a 14-es teremben (21. ábra; a természetes „Kruspér-váza” is az üvegvitrinben van kiállítva).



21. ábra: Kiállítási vitrin a Nemzeti Múzeum 14. termében. Ebben helyezték el többek között a 14. számú méterrudat (az felső „lépcsőfokon”, külön plexi burkolat alatt) és a „Kruspér-vázát”. (A MNM-ban fotózta a szerző 2016-ban)

A rúdjellegű méteretalonok témájának lezárásaképpen megemlítnék egy valószínűleg egyedi konstrukciójú különlegességet. Amikor a 1930-as években felvetődött a geodéziai távolságmérő eszközök/műszerek több száz méteres etalontávolságokon történő kalibrációjának szükségessége, a szakemberek Budapest közelében kerestek egy alkalmas tereptani, geológiai tulajdonságokkal rendelkező, nem túlságosan feltűnő helyszínt. Végül 1939-ben Máriabesnyőn (ma Gödöllő településrésze), egy felhagyott, „U” nyomvonalú vasúti vágatban találták ezt meg. (Az elkészült vágatba vágányt soha nem fektettek.) E vágat egyik száraiba telepítették azt – az összesen névlegesen 864 m-es távolságot megtestesítő – 4 db fő betonpillért, amiken nagyon gondos mérésekkel rögzítették a pontjeleket. Ezeket a méréseket az akkoriban a szabatos távolság-meghatározásokhoz használt invádrótokkal végezték.

Az egyre fokozódó pontossági elvárásoknak megfelelően felvetődött olyan mérőpontok kialakításának szükségessége, amelyek távolságát fényinterferenciás eszközökkel lehet meghatározni, sokkal pontosabban, mint az invádróttal. Erre a Väisälä (leginkább az élvonalbeli meteorológiai műszereiről, rádiószondáiról ismert) finn cég ilyen célokra

kidolgozott különleges, kevert fényű interferométere és az azzal történő kalibrálás, mint a cég egyik szolgáltatása adta meg az apropót. A lehetőség 1985-ben jutott a magyar szakemberek tudomására, és az újfajta műszerrendszer támasztotta követelmények szerinti új pillérrendszer – amit a vágatban a régivel párhuzamos nyomvonalon telepítettek – 1987-ben elkészült. Az új alapvonal névleges hossza szintén 864 m, de más kiosztásban elhelyezett 6 db pillérral. A pillérek felső síkján különleges, acél alapú alakzatot képeztek ki a különböző műszerek rögzítésére, ill. a pontjel számára (22., 23. ábra).



22. ábra: A Gödöllői Országos Geodéziai Alapvonal egyik pillére (2021-ben fotózta a szerző)



23. ábra: A pillér felső síkján kiképzett műszerfelfogószervevények és pontjel (2021-ben fotózta a szerző)

A „0”-s pillér két, egymástól 1 m távolságban levő, az előbbi fotókon látható pontjelet tartalmazó monolit betontömb. Ezen komparálták ui. azokat a speciális méteretalonokat, amiket a Väisälä szakemberei hoztak magukkal. Ezek 23 mm átmérőjű kvarccsövek voltak, amelyek hosszát a cég laboratóriumában 35 nm bizonytalansággal mérték be! Ezekkel a véglapos etalonokkal lehetett a helyszínen úgy kalibrálni a kevert fényű interferométert, hogy teljes távolságot néhány század milliméter bizonytalansággal lehessen megállapítani! A rendkívül gondos előkészítést igénylő, bonyolult méréssorozatot először 1987-ben végezték el, majd 1999-ben megismételték. A két méréssorozat összevetésével bebizonyosodott a mérőpontrendszer rendkívüli stabilitása, úgyhogy az Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) a Gödöllői Országos Geodéziai Alapvonalat 2001-ben Országos Geodéziai Hosszetalonná nyilvánította. Sajnos, azóta vandál rongálások prédájává váltak az objektumai annak ellenére, hogy a mérővonal koordinátái, megközelítésének módjai elvileg csak szűk szakmai körökben ismertek. A fenntartó állítása szerint így is használható pl. geodéziai mérőállomások, távmérő műszerek kalibrálására.

## 5 A BÁRMIKOR „ÚJRATEREMTHETŐ” MÉTER

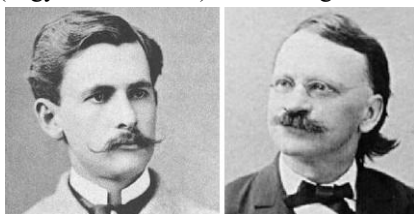
Mind Magyarország, mind az egyezményben szereplő többi ország mérésügyi hivatala meghatározott időközönként Párizsba küldte a nemzeti etalonját ellenőriztetni. Ezen mérések során derültek ki ezekkel a méterrudakkal – és ezzel a méter-meghatározással – kapcsolatos problémák. Egyrészt a karcok leolvadási bizonytalansága 0,2  $\mu\text{m}$  körüli volt, másrészt a platina-irídium ötvözet a lassú kristályszerkezet-változások miatt folyamatosan változtatja a méretét. Például a 14. számú másolat „életében” összesen 3  $\mu\text{m}$  eltérést mértek! (Az összehasonlítási bizonytalanság  $10^{-7}$  nagyságrendben volt.)

Más természetű aggályok is felvetődtek. Mi van, ha az elsőrendű etalon megsérül, eltűnik vagy megsemmisül? (Időközben kitört az I. világháború.) A délkör újramérése az alaposan megnövekedett pontossági igények miatt szóba sem jöhet. Valami olyan természeti állandót kellett találni, amelynek felhasználásával megfelelő laboratóriumi körülmények között bármikor, bárhol előállítható a méter.

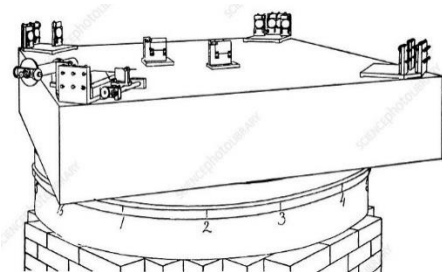
Már viszonylag korán felvetődött az a gondolat, hogy a hosszúságegységet valamilyen módon egy nagyon stabil hullámhosszúságú (fény)sugárzás hullámhosszához kössék. A fény hullámhosszán alapuló definíciót Jacques Babinet javasolta elsőként, 1827-ben. James Clark Maxwell 1859-ben a nátrium sárga színképvonalát

ajánlotta e célra, de a gyakorlati megvalósításhoz nem adott iránymutatást. 1870-ben ezt írta: „Ha a hosszúság, az idő és a tömeg abszolút maradandó etalonjait akarjuk megvalósítani, akkor azokat nem bolygónk mozgásában vagy méreteiben kell keresnünk, hanem az elpusztíthatatlan, megváltoztathatatlan és egymáshoz tökéletesen hasonló molekulák hullámhosszában, rezgési periódusában és abszolút tömegében”.

Az első valóban elfogadott ötlet Albert Abraham Michelson agyából pattant ki. Ő ugyanis – E. Morley-val (24. ábra) – még 1881-ben megalkotta híres interferométerét (a higanyfürdőn úszó négyzetes márványlapra épített műszer vázlatos rajza a 25. ábrán látható), amellyel – Maxwell elvi javaslata alapján – eredetileg az elektromágneses hullámok feltételezett hordozójának, annak a bizonyos rejtélyes „éternek” a létezését (vagy nemlétezését) kívánták igazolni.



24. ábra: A. A. Michelson (baloldalt) és E. Morley



25. ábra: Az első Michelson–Morley-interferométer fekete-fehér fotó alapján készített vázlat

Az éter létét nem sikerült bizonyítaniuk, ám a Michelson-féle interferométerként emlegetett optikai összeállítás máig a hosszsméréstechnikának (és például a gravitációs hullámokkal kapcsolatos fizikai alap kutatásoknak is) nélkülözhetetlen eszköze. Hatalmas tudományos szenzációként, először 2016-ban a Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) -nak hasonló elvű, 4 km karhosszúságú, vákuumban működő interferométerrel sikerült először detektálnia az Albert Einstein megjósolta gravitációs hullámokat! Az éter feltétlen híve volt Hendrik Antoon Lorentz holland fizikus, aki a Michelson-kísérlet negatív eredményét egy általa feltételezett hatással, a Lorentz-kontrakcióval magyarázta (amit tőle függetlenül George FitzGerald ír fizikus is leírt): az interferométer karja az „éterszél” irányában rövidül. Einstein számára az általa nagyra becsült Lorenz elmélete adta az egyik alapot a speciális relativitáselmélet kidolgozásához, ám az már nem egyeztethető össze az éter létezésével. Einstein elmélete szerint külső megfigyelő szemszögéből minden mozgó test az elmozdulás irányában rövidül, minél nagyobb sebességgel mozog, annál nagyobb mértékben. Mindezek dacára az „éter” máig gyakran elhangzik, ill. olvasható a rádióadásokkal kapcsolatban.

A feltalálók interferométere lehetővé tette egy úthossznak – például a platina-irídium etalonok két karca

közötti távolságnak – közvetlen összehasonlítását egy elvben szigorúan egyszínű fénysugárzás hullámhosszával. Ez lehetett az első hosszsméréstechnikai alkalmazása!

Michelson erre a módszerre tett javaslatot 1889-ben. Az 1927-ben megtartott VII. Súly- és Mérésügyi Nemzetközi Konferencia a vörös kadmium hullámhosszát fogadta el erre a célra. Michelson fényforrásként olyan lámpát használt, amely a kadmium vörös hullámhosszán sugároz, azaz bocsát ki fényt. Az alaposan továbbfejlesztett interferométerével és speciális optikai rendszerrel kiegészített kadmium fényforrásával kb. 200 mm-ig tudott interferenciát létrehozni, vagyis ennyi volt a fényforrás koherenciahossza, és ezzel az interferométer mérőkarjának maximális hosszváltozása. Ezzel a műszerrel – több lépésben – hasonlította össze a platina-irídium etalont a vörös Cd hullámhosszával. A mérés eredményeképpen a következő méter-meghatározás született meg: „A méter az a távolság, amely a vörös kadmium hullámhosszának 1 553 165,13-szorosát teszi ki 15 °C-on, 760 torr nyomáson, a levegő 0,03% CO<sub>2</sub> tartalmánál,  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$  nehézségi gyorsulás mellett. ( $\lambda_{\text{Cd}} = 0,64384696 \mu\text{m}$ )”.

A fenti körülmények között végrehajtott mérés bizonytalansága  $10^{-8}$  m nagyságrendben volt. Az alpmértékkel szemben támasztott egyre fokozódó pontossági követelmények miatt ez a meghatározás csak 1960-ig volt érvényben. A kadmiumlámpa magas hőmérsékleten dolgozó fényforrás volt, ráadásul nem adott kellően éles interferenciacsíkokat. Felvetődött többek között egy higany-izotópon alapuló, rádiófrekvenciásan gerjesztett fényforrás is, ám az 1960 októberében, Párizsban megrendezett 11. Súly- és Mérésügyi Nemzetközi Konferencián, az etalonképzési elv megtartása mellett, a Cd helyett a 86-os tömegszámú kripton izotóp sugárzására alapozott meghatározást iktatták törvénybe. A méter ettől kezdve: „a 86-os tömegszámú kripton izotóp  $2p_{10}$  és  $5d_5$  energiaszintjei közötti hiperfinom átmenetnek megfelelő, narancsszínű sugárzás hullámhosszának ( $\lambda_{\text{Kr}} = 0,605\,780\,211 \mu\text{m}$ , vákuumban) 1 650 763,73-szorosa”.

Nálunk ezt a meghatározást az 50/1960.XI.18. Korm. rendeletben rögzítették, bár a nemzeti méteretalon – a referenciaetalonokkal való egyszerűbb összehasonlíthatósága miatt – még ez után is használatban maradt. A kripton-sugárzás hullámhosszának állandósága olyan nagymértvűnek bizonyult, hogy még egyes hosszsmérésre szolgáló lézer-interferométerek sugárforrásának hullámhosszát is beépített kripton-interferométer alapján automatikusan helyesbítették.

A métert  $10^{-9}$  pontossággal lehetett a kriptonlámpás interferométerek segítségével reprodukálni. Tulajdonképpen a sugárzás hullámhossza ennél elvben nagyságrendekkel stabilabb, azonban sajnos, egyetlen kriptonatom sugárzását lehetetlen elkülöníteni. Az atomok sokaságának sugárzása viszont nagy spektrumvonal-szélességet okoz, jóval nagyobb, mint a lézereké.

## 6 A MÉTER MA ÉRVÉNYES DEFINÍCIÓJA

Bay Zoltánt (26. ábra), 1948-ban az Egyesült Államokba menekült világhírű magyar fizikust leginkább az 1946-ban, a Tungsram telephelyéről végzett Föld-Hold-Föld rádióradaros kísérletéről, ill. a fotoelektron-sokszorozójáról ismeri a szakmai közönség, bár több más találmány, szabadalom is fűződik a nevéhez. Éppen a

fotoelektron-sokszorozót felhasználva ő igazolta a legnagyobb pontossággal az energiamegmaradás törvényét. 1965-től a fénysebesség minél pontosabb mérése foglalkoztatta. Az általa kidolgozott újszerű elven, a koherens lézerek hullámok mikrohullámokkal történő elektrooptikai modulációján alapuló mérései (1972) eredményeképpen a fénysebesség értékét az Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) 15. ülészaka (1975)

$c = 299\,792\,458$  m/s-ban rögzítette.

A tudós Hold–Föld távolságon végzett mérései  $10^{-13}$  bizonytalansággal igazolták a fénysebességnek Einstein elméleteiből következő állandóságát. Jelenlegi tudásunk szerint a fénysebesség az egyik olyan fizikai állandó, amelynek a bizonytalanságát 0-nak tekintjük.



26. ábra: Bay Zoltán (1900–1992)

Megjegyezzük, hogy a „fénysebesség” túlságosan általános fogalom, érdemes pontosítani. A  $c$  közölt értéke elektromágneses síkhullámokra érvényes, vákuumban. Erről a témát érdekes megvilágításba helyező [4]-ben olvashatunk.

A mérhető mennyiségek közül már évtizedek óta az idő az, amit a legnagyobb pontossággal tudunk mérni. A 2013-ban konstruált „optikai rácórák” 300 millió év alatt tévedhetnek 1 s-ot, azaz az ezekkel elérhető bizonytalanság jelenleg már  $10^{-20}$  körüli. Az időmérés akkori pontossága is már 1906-ban Max Planckot, ill. 1961-ben C. H. Towerst arra vezette, hogy a hosszúság egységét az időből és a fénysebességből mint a természet egyetemes állandójából származtassa. (Míg 1906-ban még a csillagászati mérésekkel helyesbített precíziós obszervatóriumi ingaórák jelentették az időmérés netovábbját, 1961-ben már cézium atomóra is rendelkezésre állt.)

Míg ezek csak elméleti megfontolások voltak, addig Bay a gyakorlati megvalósítást is kipróbálta és leírta. Sajnos, az új mérési módszer részletes leírása csak az USA-beli Nemzeti Szabványügyi Hivatal talán máig kiadatlan, 58 oldalas belső beszámolójában található meg, amit 1965 januárjában készítettek. Később, 1968 és 1972 között a tudós rengeteg közleményben kiállt az egységes, a fény sebességén keresztül összekapcsolt idő- és hosszúságetalon bevezetéséért. Azonban ezt a méltán zseniálisnak nevezhető ötletet a mérésügyi intézetek – Anglia és Japán intézete kivételével – elleneztek. Fizikusok egy csoportja azzal vádolta meg Bayt, hogy a fénysebességet rá akarja erőltetni a méterre. Ellenkezőleg: én a métert akarom ráerőltetni a fénysebességre!” – válaszolta a tudós.

Inkább arról van szó, hogy a fénysebességet és a métert Bay kötötte egymáshoz, a  $c = 299\,792\,458$  m/s értéket ő definiálta. Felfoghatjuk úgy is, hogy akkora métert definiált, amelynél a fénysebesség az előbbi értékkel

egyenlő. Korábban a  $c = 299\,792\,456,2 \pm 0,0011$  m/s volt érvényes, azaz bizonytalanságot is tartalmazott. A méter és a fénysebesség közötti kapcsolatot a mindennél pontosabban mérhető idő teremti meg.

Az Optical Society 1969 őszén Chicagóban rendezett ülésén is felvetették az új méter-definíció bevezetését. Akkor már csak két ellenjavaslat hangzott el. J. A. Hall egy metánstabilizált HeNe lézer hullámhosszára, K. M. Baird egy CO<sub>2</sub>-lézer hullámhosszára kívánta volna visszavezetni a métert.

A Méter Definíció Tanácsadó Bizottság (CCDM) 1983 októberében Párizsban, a CGPM 17. ülészakan előterjesztette Bay javaslatát, amit el is fogadtak. Az OMH is javasolta a 8/1976.IV.27. MT rendelet módosítását; nálunk a CGPM definícióját az 1991. évi 45. törvényben rögzítették, október 9-én. A méter 2019-ig érvényben levő meghatározása volt: 1 méter az a távolság, amelyet a fény vákuumban  $1/299\,792\,458$  s alatt tesz meg.

A 26. CGPM (2018, érvényes 2019. május 20-tól) szerinti új definíció [8]: „A méter (jele: m) a hosszúság SI-mértékegysége. Definíció szerint a vákuumbeli fénysebesség ( $c$ ) rögzített számértéke legyen  $299\,792\,458$ , amely m/s egységben van kifejezve, ahol a másodpercet  $\Delta\nu_{Cs}$  határozza meg.”

Az előbbi meghatározások szerinti mérés bizonytalansága már csupán legfeljebb  $10^{-12}$  nagyságrendű, egyes kutatók pedig  $10^{-20}$  elérhető bizonytalanságot prognosztizálnak!

A méterrel kapcsolatban a kilón, millin kívül a deci és a centi előtagok is törvényesek. Ez vonatkozik a métert és hatványait tartalmazó származtatott mértékegységekre is.

Bár a fenti meghatározáson alapuló méréshez elvileg bármilyen elektromágneses sugárzás felhasználható, a gyakorlatban olyan atomi és molekuláris átmenetek egy készletét alkalmazzák, amelyek frekvenciáihoz a különféle lézerek sugárzások állandósíthatók. A hosszúság-kalibrálási feladatok közvetett módszerrel, speciális lézerekre alapuló műszeregyüttesekkel is megoldhatók, és nem kell mindig a fénysebesség alapján mérő, atomórát is igénylő, rendkívül drága és körülményesen kezelhető berendezésekhez folyamodni, amelyekből jelenleg csak néhány működik a világban.

Hogy milyen eszközökkel és hogyan történtek 2016-ban a legnagyobb pontosságú hosszúságkalibrálások az MKEH-ban, és ezek hogyan vezethetők vissza a Bay-féle definícióra, arról álljon itt egy tömör ismertetés, Tomanyiczka Kálmán nyugalmazott metrológus szíves közlése alapján:

„A  $^{127}\text{I}_2$  abszorpciós vonalaira stabilizált He–Ne gázlézer működtetése úgy történik, hogy bekapcsolás után a lézer, mint egy teljesen közönséges He–Ne gázlézer működik, ez a stabilizálatlan állapota. Amikor stabilizált állapotba akarjuk hozni azt, akkor az egyik tükör mozgásával (piezokerámia-ra kapcsolt feszültség változtatásával) hangoljuk a lézer frekvenciáját és amikor a kívánt atomi átmenethez értünk (az ún. d, e, f, g, h, i, j vonalak valamelyikéhez) akkor a szabályozó jel harmadik deriváltjának nulla átmenetén kapcsoljuk be a fáziszárt szabályozókört. Ebben a helyzetben az atomi átmenetnek ( $E = hf$ ) megfelelő frekvenciájú fény lép ki  $10^{-12}$  relatív stabilitással.

Ezen nagy pontossággal ismert frekvenciájú fényt heterodin elven, egy féligáteresztő tükrön interferáltatjuk az ismeretlen ( $d_e \lambda = 633$  nm névleges hullámhosszú) lézer fényével. Az interferencia eredménye a két lézer frekvenciakülönbsége. Mivel a frekvenciának nincs előjele, így nem tudjuk megmondani, hogy az nagyobb vagy kisebb-e, mint az etalon frekvenciája. Ezért mind a hét atomi átmeneten megmérjük a frekvenciakülönbséget, és ebből számítjuk ki az ismeretlen frekvenciájú stabilizált lézer aktuális frekvenciáját és annak reciprokát, a hullámhosszát.

Az ellenőrizni kívánt sugárforrás nem csak lézertinterferométer lehet, hanem bármilyen más,  $\lambda = 633$  nm hullámhosszúságú stabilizált lézer. Az MKEH-nak jelenleg több lézertinterferométere is van. (A hosszúságmérések területén 1 db HP 5528-cal; 1 db Agilenttel és 1 db Renishaw XL-80-nal rendelkezünk.)

Az előbbieken felsorolt lézertinterferométerek a Doppler-elvet alkalmazzák, azaz közvetlenül a szögprizma mozgási sebességéből származó frekvenciaeltolódást mérik, melynek az idő szerinti első integrálja íródik ki a digitális kijelzőre, mint elmozdulás.

A Bay-féle definícióból az következik, hogy a hosszúság elsődleges etalonja az idő etalonja, mivel a fény terjedési sebességét is definiáltuk, tehát nincs hibája. Ahhoz, hogy a „fény-mérőlécet” azaz egy nagy pontossággal ismert hullámhosszúságú fényt használhassunk hossz mérésre, arra van szükség, hogy annak periódusidejét közvetlenül meg tudjuk mérni az atomórával mint etalonnal, mert a visszavezetetés csak így teljesül.

A mi esetünkre alkalmazva: a CIPM 1983-as ajánlását követően a CGPM 17. konferenciája „Mise en Pratique”-ban lefektette az ajánlott hullámhosszakat és azok bizonytalanságait a méter gyakorlati megvalósításához. Abban az időben a leggyakrabban a  $\lambda = 633$  nm hullámhossz volt használatos, amit egy jódstabilizált gázlézerral valósítottak meg. Ezen meghatározott hullámhosszakat és bizonytalanságukat a *Consultative Committee for the Definition of the Meter (CCDM)* kiadványában teszik közzé rendszeresen.

Ez azt jelentette, hogy Magyarország (OMFB Pályázattal) 1985-ben vásárolt egy, a méter-definíciót megvalósító és a Mise en Pratique-ot kielégítő  $^{127}\text{I}_2$  abszorpciós vonalaira stabilizált, francia gyártmányú He-Ne gázlézert, amely akkor az országos hosszetalon volt. Ma egy modernebb, de ugyanúgy  $^{127}\text{I}_2$  abszorpciós vonalaira stabilizált amerikai He-Ne gázlézer a hosszetalon. Ez tehát nem abszolút, hanem összehasonlításos módszer.”

Bay Zoltán az Országos Mérésügyi Hivatal lézeralapú összeállítását 1986-ban láthatta. A Thomson CSF gyártmányú jódstabilizált lézert a hullámhossz-összehasonlításához szükséges optikai rendszerrel a 27. ábrán mutatjuk be.



27. ábra: Thomson gyártmányú jódstabilizált He-Ne lézer. (Az MKEH-ben fotózta a szerző 2016-ban)

Az ellenőrzött lézertinterferométerek segítségével történő, elmozdulásmérésre visszavezetett hosszúságmérések egy nagy Zeiss optikai hossz mérőgépen, mint optikai padon történnek, melynek szánjára felszerelték az interferométer szögprizmáját (28. ábra).



28. ábra: Mérési összeállítás a Zeiss hossz mérőgéppel és a HP lézertinterferométerrel. (Az MKEH-ben fotózta a szerző 2016-ban)

Külföldi mérésügyi hatóságok modernebb eszközökkel, ún. fésűgenerátorral (*comb generator*, optikai rásztergenerátor) is rendelkeznek. Ezek a rendkívül bonyolult és drága berendezések femtoszekundumos lézereken alapulnak, amelyek alkalmasak széles frekvenciatartományban (tehát különböző színű) lézerek abszolút módszerrel történő leszármaztatására, frekvenciájuknak megmérésére.

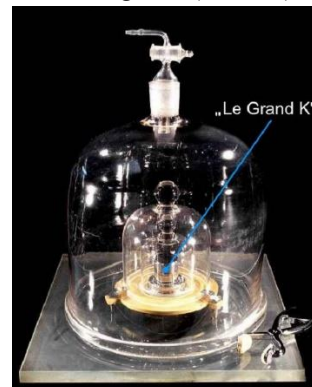
A téma zárásaként helyett álljon itt – másodközlésből – egy, az új méter-meghatározással kapcsolatos furcsaság [6]. Miután az új definíciót bejelentették, egy magyar napilap Csodabogarak rovatában volt olvasható így: „-Párizsból jelentik, hogy ezentúl a méter az a hosszúság, amit a fény 1/299 792 458 másodperc alatt megtesz...”. Nyilván a közreadónak fogalma sem volt a hír tudományos háttéréről és azt valamiféle tréfának vélte...

## 7 A KILOGRAMMETALON

Jelen írásomban a platina-irídium méteretalon „édestestvéréről”, a kilogrammetalonról is többször esett szó. Érdeemesnek tartom kiemelni, hogy míg a hét SI alapegységből hat megnevezése szerint is alapegység, addig a tömegé a „kilo” prefixummal ellátott egység (kg). Holott a CGS mértékrendszerben még a gramm (g) volt a tömeg alapegysége, de az MKS-ben és az MKSA-ban is már a kilogrammot definiálták.

A tömeg első nemzetközi etalonja, a *Kilogramme des Archives* platinából készült, 1799-ben rendszeresítették, akár a levéltári métert. Henri Tresca ötlete alapján 1874-ben platina-irídium ötvözetből készítettek el négy darabot, amelyek közül kiválasztották a közelmúltig regnáló kilogrammetalon példányát, az *International Prototype of the Kilogramm*-ot (IPK)-t. Emlékezzünk: a végvonásos méter-etalon is Tresca javasolta, ugyanebből az ötvözetből.

A kilogrammot a legutóbbi időkig ez az 1875 óta használt, az 1889. évben, Párizsban megtartott 1. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet által a tömeg nemzetközi etalonjának elfogadott, a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban, Sèvres-ben őrzött platina-irídium henger tömege képviselte. (Nagyon jó közelítéssel ekkora tömegű egy liter tiszta víz, +4 °C-on.) A gondozói csak „Le Grand K”-ként emlegették (29. ábra).

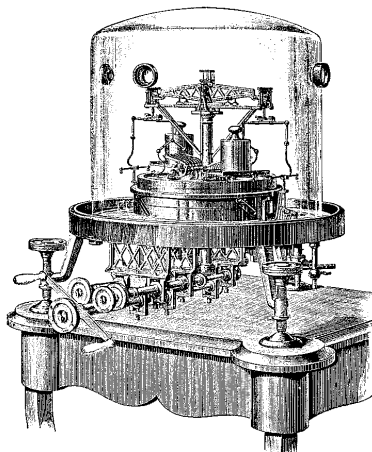


29. ábra: „Le Grand K”, hármás üvegbúrában

Kiviteli formája egy kb. Ø39×39 mm-es, lekerekített élű, tükrösített felületű henger. Mivel az elsőrendű etalon pótolhatatlan volt, rendkívül gondos bánásmódban részesítették, mind magának az etalonnak, mind az azt kezelhetővé tevő speciális fogónak a tisztítására bonyolult procedúrát írtak elő. Az elmondottak a másodrendű,

nemzeti etalonokra is érvényesek (Magyarország a 16-os számút birtokolja), de itt nem térek ki erre. Csupán a tárolására hívom fel a figyelmet: a különleges tartóba állított etalonnegert egy belső üvegúra takarja. Az egészet egy külső üvegúra veszi körül. Ezt a tárolási módot is az 1889-es konferencián rögzítették. Később egy harmadik üvegúra is került a „Le Grand K”-ra (ahogyan az a 29. ábrán látszik). Az alap-kilogrammot igen ritkán vették használatba. Egy trezorban őrizték, aminek a kinyitásához három kulcs kellett, mindegyikkel egy-egy munkatárs rendelkezett.

Sajnos, mindezek ellenére a metrológusok arra a következtetésre jutottak, hogy a Sèvres-i henger az elfogadása óta lassan mintegy 50  $\mu\text{g}$ -ot veszített a tömegéből, az utóbbi években pedig mintegy 100  $\mu\text{g}$ -ot „hízott”, különböző felületi rétegek kialakulása miatt! Ezek az értékek az elsőrendű etalonnak a nemzeti etalonokkal történt rendszeres összehasonlítása során, bonyolult számítások eredményeképpen adódtak. Érdekes, hogy a nemzeti etalonok esetében nem tapasztaltak ilyen mérvű tömegváltozást. Látható, hogy a „Le Grand K” tömegváltozásai  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  nagyságrendbe esnek. Néhány etalontömeg értékváltozásáról érdekes diagramokat közölnek [7].



30. ábra: Kruspér vákuum-mérlege. (A Pallas nagy lexikonából)

Kruspér a kilogramm-alapmértékkel kapcsolatban is jeleskedett. Egy olyan, a kilogrammetalonok komparálására szolgáló, manipulátorokkal kívülről kezelhető, szimmetrikus kétkarú vákuummérleget tervezett, aminek az érzékenysége, 1-1 kg-os tömegekkel terhelve, 1  $\mu\text{g}$ -ra tehető (30. ábra).

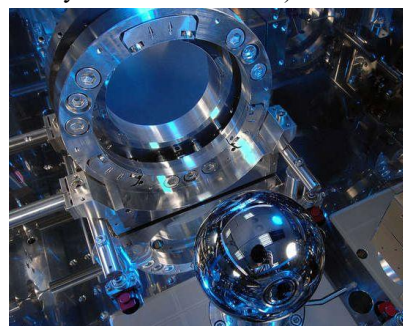
A Gauss-féle tömegcserét is lehetővé tevő szuperprecíz – akkori szóhasználattal szigorú – mérleget egy bizonyos Nemetz bécsi műszerész készítette el, aki aztán gyártotta és forgalmazta is. Árjegyzékében 5000 forintért kínálta a „Kruspér-féle üresterű mérleget”. Kruspér ezzel a tömegkomparátorral elnyerte az 1885-ös antwerpeni vilákiállítás aranyérmét. Egy korszerű, szubmikrogrammos vákuumos tömegkomparátort láthatunk a 31. ábrán.

A legutóbbi időkig tehát a tömeget nem sikerült a méteréhez hasonlóan, laboratóriumi körülmények között előállítható, reprodukálható formában valamilyen természeti állandóból levezetni, bár az ezzel kapcsolatos kutatások folytak.



31. ábra: Korszerű vákuumos tömegkomparátor (Mettler Toledo)

Egyes kutatók adott számú szénatom tömegét definiálták volna kilogrammként, néhány éve pedig a Peter Becker vezette Német Szövetségi Intézet Fizikai és Műszaki Bizottságának kutatásaiban egy 100 mm átmérőjű monokristályos szilíciumgömb atomjainak számából származtatták volna le a tömegegységet, de ez a módszer (sem) emelkedett törvényerőre. Annak kritériuma ui. az lett volna, hogy az Avogadro-állandó meghatározási bizonytalanságát  $2,0 \cdot 10^{-8}$  alá vigyék, ami ez ideig nem sikerült. (Több kutató csak 2018-ra datálta a szilícium-tömegetalon elfogadását. Egy néhány évvel azelőtti kísérleti példány látható a 32. ábrán.)



32. ábra: Etalonnak szánt szilíciumgömb (Leibniz Institute Berlin)

Ezzel kapcsolatban érdemes megemlíteni, hogy kemény anyagokból viszonylag egyszerű technológiával, de rengeteg, speciális érzéket is megkívánó kézi munkával gyárthatók rendkívüli geometriai és méretpontosságú gömbök. Jól példazza ezt a Gravity Probe B, 2004-ben felbocsátott műhold szuperprecíz giroszkópja, ami nem más, mint egy néhány atomnyi pontossággal – ez mintegy 10 nm-es alakhibát jelent – megmunkált, 38 mm átmérőjű olvasztott kvarcgolyó. A golyót néhány atomnyi vastagságú nióbiumréteggel vonták be. A 2 K hőmérsékletű szuperfolyékony héliumban pörgő gömb elmozdulását interferométerrel mérték. Einstein szerint a gravitáció egyik hatása a téridő görbítése, amely pl. a Föld tömegének hatására is fel kell hogy lépjen. A műhold giroszkópos mérései ezt  $10^{-4}$  bizonytalansággal igazolták. A golyó megmunkálásának végső fázisát a <https://einstein.stanford.edu/Media/Gyro-polishing-flash.html> videón megtekinthetjük.

Azóta lényeges előrelépés történt a kilogrammetalon ügyében is: elmondhatjuk, hogy a „Le Grand K” végleg nyugállományba vonult. 2018 novemberében fogadták el többek között a kilogramm új definícióját Versailles-ban az Általános Súly- és Mértékügyi Konferencián. Ezen a konferencián egyhangúlag szavazták meg az SI (Systeme International d'Unites) mértékegységrendszer teljes

revízióját. Az SI alapegységeinek – a méter, a kilogramm, a kelvin, a másodperc, az amper, a kandela és a mól – újradefiniálását követően az új szabályzat 2019. május 20-tól érvényes. Ez biztosítja, hogy a mértékegységrendszer hosszú távon stabil és konzisztens legyen.

A kilogramm új etalonképzése végül is nem az említett előzetes elképzelések, kísérletek mentén történt, tehát a modern kilogramm ugyanúgy nem egy megtestesült objektum, mint a méter, ill. mint az SI többi alapegysége. Talán ez a legjelentősebb változás az SI történetében! A kilogramm modern definíciója a Planck-állandóhoz, a kvantummechanika egyik alapvető állandójához kötött, amelynek elfogadott értéke:  $h = 6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$  kg·m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>, (másképpen Js), amit hasonló logika mentén rögzítettek, mint a méterdefiníció kapcsán említett fénysebességet.

A komparálás vákuumban dolgozó elektrodinamikussal árammérleg – ún. Kibble-mérleg – alapuló berendezéssel történik, dinamikus módszerrel, az  $U \cdot I = m \cdot g \cdot v$  összefüggés alapján, lényegében a tehetetlen és súlyos tömeg ekvivalenciáját kihasználva. (A korábbi Watt-mérleg elnevezést is ez az összefüggés inspirálta. A mérési elvet Bryan Kibble fizikus javasolta.) A különleges felépítésű, de végső soron élagyazású kétkarú mérleggel történő összehasonlítás során az egyenletben szereplő állandókat az elérhető legnagyobb pontossággal mérik, ill. állítják be. Például a feszültség és az elektrodinamikussal rendszerrel gerjesztő áram közvetetten Josephson-feszültségétalonból származik, a helyi gravitációs állandót hatalmas tömegű, különlegesen pontos abszolút graviméterrel, a karok sebességét és elmozdulását lézer-interferométerrel mérik. A mágneskör és a tekercs kialakítása is rendkívüli gondossággal, precizitással történt. A mechanikus beállítások nem kevésbé pontosak, a mérlegkart egy kör alakú, élagyazású tárcsával helyettesítették.

Az elektrodinamikussal rendszer az egyik mérlegkart periodikusan mozgatja mintegy csúcstól csúcsig 15 mm-es amplitúdóval, 1 mm/s közepes sebességgel. A mérendő tömeg is itt van elhelyezve. A másik karon egy kiegyensúlyozó tömeg függ [9]. Léteznek ettől eltérő elrendezések is. A vázolt elv a sebességmérlegé, de létezik az árammérleg működéséhez közelebb álló, statikus működésű, az ún. erőmérleg.

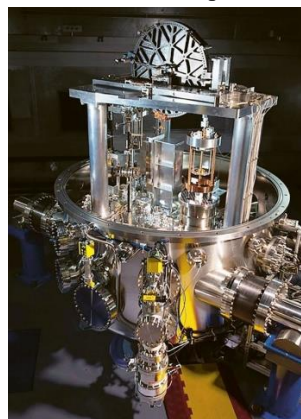
Stephan Schlamminger, amerikai fizikus, a precíziós mérések szakértője, az első megvalósított Kibble-mérleg egyik tervezője mondta: „Egészen addig, amíg a kilogrammot egy tárgyhoz mértük, nem sikerült a tömegmérést időállóvá tenni. Nincs ugyanis olyan emberi kéz alkotta tárgy, amely ne változna, de a Planck-állandó, legalábbis a mai ismereteink szerint, örök.”

Azért az ember olyan, hogy szereti látni a tényleges kilogrammot is (lásd a cikk elején idézett maliciózus megállapításokat), amit végül az említett szilíciumgolyó testesít meg, és a legtöbb hitelesítési feladat során egyszerűbben használható, mint a Planck-állandón alapuló bonyolult, kényes készülék. A szilíciumgömb üvegburába helyezett eredeti példánya a 33. ábrán látható, amit Münchenben, a német állami mérésügyi intézetben, a Physikalisch-Technische Bundesanstaltban (PTB-ben) őriznek.

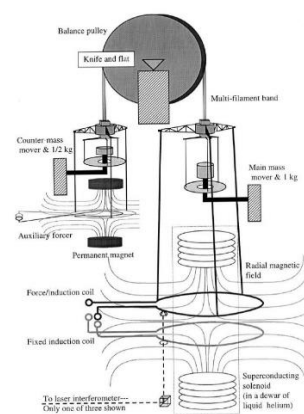


33. ábra: A kilogramm új, megtestesült formája: a szilíciumgömb

Egy Kibble-mérleget csodálhatunk meg a 34. ábrán, a 35. ábra pedig az egyik konstrukció erősen leegyszerűsített szerkezeti vázlatát szemlélteti. Idő közben jelentősen eltérő konstrukciójú társai is épültek. Olyan elképzeléssel is találkoztam a neten, amelyben a két terhelőág között nem egy mechanika, hanem hidraulikus erőátvitel létesít kapcsolatot [10].



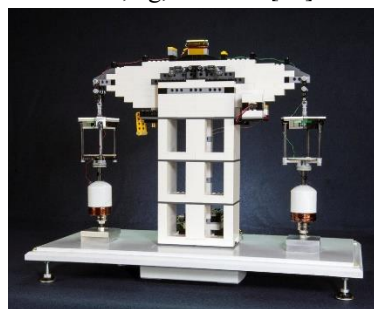
34. ábra: Egy Kibble-mérleg, a vákuumzáró búra eltávolítva. Nem éppen egyszerű szerkezet! [1]



35. ábra: A Kibble-mérleg működési vázlat

Nem kevésbé meghökkentő a „hagyományos” Kibble-mérlegek szabálytalan elmozdulásainak csökkentése érdekében kidolgozott, leginkább a régi, sokcsuklós konyhamérlegekhez hasonló konstrukció [11].

Ám még ezeknél is meghökkentőbb lehet sokunknak: a LEGO elemek felhasználásával kifejlesztett, elemekből összerakható demonstrációs asztali Kibble-mérleg (36. ábra). Bár pontossága szerény, mindkét működési elvet jól demonstrálja. Legfeljebb 20 g-os tömegeket képes kezelni, a felbontása 0,2 g, azaz 1% [12].



36. ábra: A LEGO-elemeken alapuló Kibble-mérleg. A pontossága erősen korlátozott, de az elvet képes demonstrálni

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Végül köszönetet mondok a volt MKEH munkatársainak, Kőszegi József akkori főosztályvezető-helyettesnek és Tomanyiczka Kálmán metrológusnak a rengeteg hasznos információért, és hogy lehetővé tették számomra az intézmény hosszmerő laboratóriumában való fényképezést (2016-ban történt). Igazi élmény volt! Szintén megköszönöm a Magyar Nemzeti Múzeum munkatársainak, dr. Tomka Gábor főigazgató-helyettesnek és dr. Ridovics Anna művészettörténésznek a kért fotók rendelkezésemre bocsátását.

### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Simonyi M. (2019). A kilogramm detronizálása – Búcsú egy etalontól, *Természet Világa*, 150 (5)  
<https://www.termvil.hu/2019/09/12/bucusu-egy-etalonol/>
- [2] [http://www.agt.bme.hu/tantargyak/felso\\_geodezia/fg3.pdf](http://www.agt.bme.hu/tantargyak/felso_geodezia/fg3.pdf)
- [3] Borbola J. (2009). A Szent Korona és a méter, *Ősi Gyökér*, 27(4), 2-35.  
[https://epa.oszk.hu/02300/02387/00014/pdf/C5%90si%20Gy%C3%B6k%C3%A9r\\_2009\\_4\\_002-035.pdf](https://epa.oszk.hu/02300/02387/00014/pdf/C5%90si%20Gy%C3%B6k%C3%A9r_2009_4_002-035.pdf)
- [4] Ván Péter: Mennyire állandó a fény sebessége?; A Bay Zoltán 120 emlékkonferencia előadásainak ismertető kiadványa (Bay Zoltán Tudomány és Technikatörténeti Alapítvány, 2021)
- [5] <https://hu.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9ter>
- [6] *Mérés és Automatika* 1984/4.
- [7] Abbott, P., Kubarych, Z., Jarrett, D., & Elmquist, R. (2019). The units for mass, voltage, resistance, and current in the SI, S. Schlamminger. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 637. [https://www.researchgate.net/figure/Top-Mass-values-of-four-official-copies-of-the-kilogram-kept-at-the-BIPM-as-a-function\\_fig1\\_333451790](https://www.researchgate.net/figure/Top-Mass-values-of-four-official-copies-of-the-kilogram-kept-at-the-BIPM-as-a-function_fig1_333451790)
- [8] <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1>
- [9] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Kibble-m%C3%A9rleg>
- [10] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-MSL-Kibble-Balance-Weighing-Mode-Sutton-Clarkson/52d2e41df73cfd92b26a1776e0d641bfb9b02b8/figure/0>
- [11] <https://epjtechniquesandinstrumentation.springeropen.com/articles/10.1140/epji/s40485-022-00080-3>
- [12] Chao, L. S., Schlamminger, S., Newell, D. B., Pratt, J. R., Seifert, F., Zhang, X., ... & Haddad, D. (2015). A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI. *American Journal of Physics*, 83(11), 913-922.
- [13] Regőczi, E. (1942). A gödöllői országos összehasonlító alapvonal; magánkiadás.
- [14] Kääriäinen, J. et al. (1988). The Gödöllő Standard Baseline, Helsinki.
- [15] Jokela J. (2001). Remeasurement of the Gödöllő Standard Baseline, Kirkkonummi.
- [16] Ván, P (2021). Mennyire állandó a fény sebessége?, A Bay Zoltán 120 emlékkonferencia előadásainak ismertető kiadványa, Bay Zoltán Tudomány és Technikatörténeti Alapítvány.
- [17] Makkai, L. (szerk.) (1959). *Fejezetek a magyar mérésügy történetéből*, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó.
- [18] Rédey, I. (1966). *A geodézia története*, Tankönyvkiadó.
- [19] Fehér, I., dr. Horváth, Á. (1963). *A fizika és a haladás I.*, Tankönyvkiadó.
- [20] Tisza, S., Tökés, Sz (1968). *Mérés és Automatika*, 1968/7., p. 319
- [21] Dr. Petrik, F. (1984) *Mérés és Automatika*, 1984/4. p. 148.
- [22] Dr. Bölöni, P. (1984). A méter ötödik definíciója és ennek hatása..., *Mérésügyi Közlemények*, 1984/4., p. 87.
- [23] Dr. Fodor, Gy. (1990). *Mértékegység-lexikon*, Műszaki Könyvkiadó.
- [24] Wagner, F. S. (1994). Bay Zoltán atomfizikus, az úrkutatás úttörője, Akadémiai Kiadó.
- [25] Kovács, G. (szerk) (1996). *További fejezetek a magyar mérésügy történetéből*, OMH.
- [26] Quinn, T. J. (1997). A Nemzetközi Mértékegység-rendszer alapegységei, azok pontossága, leszármaztatása és a nemzetközi visszavezethetőség (II.), *Mérésügyi Közlemények*, 1997/2.
- [27] Dr. Pataki, P. (2000). *Metrológiai rendszerek*, Elektrotechnika, 2000/10.