

Fizikai geodézia és gravimetria / 2.**NEHÉZSÉGI ERŐTÉR ABSZOLÚT ÉS RELATÍV MÉRÉSE, A MŰSZEREK KALIBRÁCIÓJA**

A nehézségi erőter mérésével kapcsolatos mérési módszerek és mérőműszerek három csoportba sorolhatók.

Az első csoportba a nehézségi gyorsulás abszolút értékének meghatározására szolgáló mérési módszereket soroljuk. Az erre szolgáló mérési eszközök általában a különféle ingák, vagy az ejtés és a hajtás alapelvén működő műszerek.

A második csoportba a nehézségi gyorsulás két pont közötti relatív különbségének méréseit soroljuk. Az erre alkalmas mérőműszerek a különböző elven működő graviméterek és a relatív ingák.

A mérési módszerek harmadik csoportjába a nehézségi erőter gradienseinek meghatározási módszereit soroljuk. Ezekből a mérésekből megkapjuk, hogy a különböző irányokban, egységnyi távolságon mennyivel változik meg a nehézségi gyorsulás értéke. A gradiensek meghatározására az Eötvös-ingák és az ún. gradiométerek szolgálnak.

A nehézségi erő abszolút mérése

Míg az abszolút mérések célja az, hogy egyetlen pontban végzett mérések alapján határozzuk meg a nehézségi erő teljes értékét, addig a relatív mérésekkel két pont között a nehézségi erő különbségét határozzuk meg. Az utóbbi módszerrel abszolút érték csak akkor nyerhető, ha a mért pontok egyikén ismerjük a nehézségi erő abszolút értékét.

A nehézségi erő abszolút értékének meghatározására elvileg minden olyan fizikai jelenség alkalmas, amelyben a nehézségi gyorsulásnak szerepe van. Gyakorlatilag azonban csak azokat a jelenségeket használhatjuk fel, amelyek törvényszerűségeit leíró összefüggésekből a nehézségi gyorsulás olyan fizikai mennyiségekkel fejezhető ki, amelyek mindegyike nagy megbízhatósággal mérhető. Így pl. a matematikai inga (a fonálinga) esetében – légtüres térben és végtelenül kicsi kitérések esetén – az inga lengésideje:

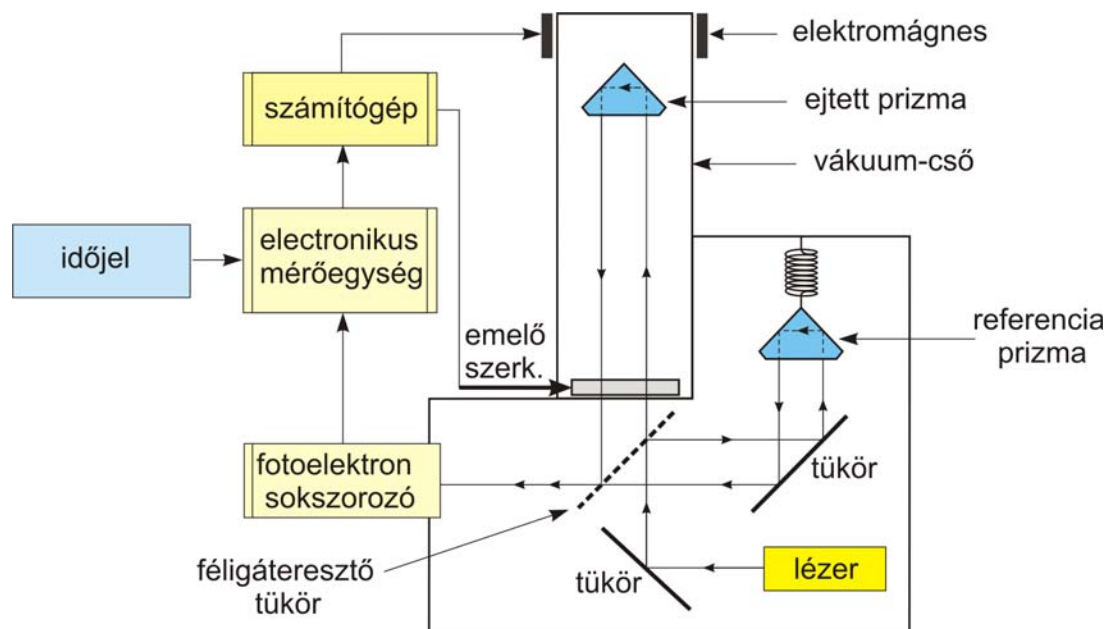
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

amiből g a mérhető ℓ ingahossz és a T lengéside ismeretében határozható meg. Mivel a matematikai inga nem valósítható meg kellő pontossággal, ezért az abszolút nehézségi gyorsulás mérésekre inkább a fizikai ingákat, illetve az ún. megfordítható (reverzibilis) ingákat alkalmazzák.

Régebben a nehézségi gyorsulás abszolút értékét kizárólag ingamérésekkel határozták meg, napjainkban azonban a mérési technika rohamos fejlődésével más módszerekkel próbálkoznak. SAKUMA japán kutató pl. a szabadesés megfigyelésére

szerkesztett igen pontos berendezést, amellyel a korábbi ingamérések pontosságát kb. két nagyságrenddel sikerült megjavítani és így csaknem elérte a $mGal$ ($10^{-8} m/s^2$) pontosságot.

Ugyancsak a szabadesés megfigyelésén alapuló – ráadásul szállítható készüléket szerkesztettek más kutatók is. Az általuk készített berendezés elvi felépítése az 1 ábrán látható. A mérés során erősen légritkított térben (vákuumban) speciális kvarcüvegből készített szögprizmának kiképzett tömeget ejtenek, amelyet a felső kiindulási helyzetben elektromágnes segítségével rögzítenek. A test ejtése, valamint a felső kiinduló helyzetébe történő visszaemelés és az újabb ejtés automatikusan történik, a berendezéshez tartozó számítógép vezérlésével. A szabadon eső optikai szögprizma része az ábrán látható Michelson-féle aszimmetrikus interferométernek. Az interferométer úgy működik, hogy a lézercsőből kilépő sugárnyalábot félig áteresztő tükörrre vetítik, amelyen a sugárnyaláb kettéválik: az egyik része irányváltoztatás nélkül halad tovább és az eső szögprizmán 180° -os törést szenvedve visszajut a félig áteresztő tükörrre; míg a másik, ún. referencia-sugárnyaláb megtörik, továbbhalad egy vertikális szeizmográf tömegeként rögzített referencia-prizmán és többszörös törés illetve visszaverődés után a félig áteresztő tükrön találkozik az eső prizmáról visszavert sugárral. Az ily módon újra egyesített két sugárnyaláb interferencia jelenséget okoz. Az interferencia miatt "fényerőmodulált" sugárnyaláb fényelektromos- (fotoelektron-) sokszorozóba jut, ahonnan erősítés után elektromos jelként átalakítva, elektromos impulzusok formájában lép ki. Az elektromos impulzusokat mérő egységbe (számláló egységbe) vezetik, ahová egyidejűleg rubídium kristály segítségével előállított igen pontos időjelek is kerülnek.



1. ábra. A ballisztikus lézergraviméter elvi felépítése

Ha valamely Δs_1 és Δs_2 útszakaszon eső test megfigyelése során az elektronikus számláló egységen Δt_1 idő alatt n_1 és Δt_2 idő alatt n_2 számú elektromos impulzus halad keresztül, akkor

$$\Delta s_1 = n_1 \frac{\lambda}{2} \quad \text{és} \quad \Delta s_2 = n_2 \frac{\lambda}{2}$$

ahol λ a lézersugarak hullámhossza. Az elektronikus számláló egység egyidejűleg az időjeleket (a rubídium kristály rezgéseit) is számlálja: az n_1 számú impulzust Δt_1 idő alatt, az n_2 impulzust Δt_2 idő alatt méri. Az eredmény egy illesztő egység (interface) közbeiktatásával elektronikus számítógépbe kerül, amely az adott ejtésből a

$$g = \left(\frac{\Delta s_2}{\Delta t_2} - \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} \right) \frac{2}{\Delta t_2 - \Delta t_1} + \delta g$$

összefüggés felhasználásával kiszámítja a nehézségi gyorsulás abszolút értékét (δg a különféle korrekciós tagok összege); valamint a korábbi ejtésekkel meghatározott g értékek felhasználásával folyamatos statisztikai feldolgozást is végez. A művelet befejezése után a számítógép utasítást ad az újabb ejtésre. Egyetlen mérési ponton a g értéke 14-25 mérési sorozat eredményének súlyozott átlagaként adódik (egy sorozatban 120 ejtést végeznek – ami kb. 30 perc időt vesz igénybe). A 2. ábrán a Kenderesen végzett méréseken használt osztrák Jilag-6 abszolút műszer látható.



2. ábra. Mérés a Jilag-6 abszolút lézergraviméterrel Kenderesen 2003-ban

A nehézségi erő relatív mérése

A relatív mérésekhez olyan nehézségi alaphálózatra van szükségünk, amelyre támaszkodva relatív mérésekkel is meghatározhatjuk az egyes pontok abszolút g értékeit.

Ma már a relatív nehézségi erő méréseket szinte kizárólag graviméterekkel végzik, ezért a következőkben részletesebben foglalkozunk a graviméteres mérésekkel.

A graviméterek

A graviméterek a fizikából ismert rugós erőmérők elve alapján működnek. A 3. ábra szerint az mg_1 súly hatására megfeszült rugó s_1 skálaértéket mutat. Ha a szerkezetet olyan másik helyre visszük, ahol g_2 a nehézségi gyorsulás értéke, akkor a mutató s_2 skálaértéket fog jelezni. A Hooke-törvény szerint az elmozdulás arányos az erővel, ezért:

$$mg_2 - mg_1 = D(s_2 - s_1)$$

ahol D a rugóállandó.

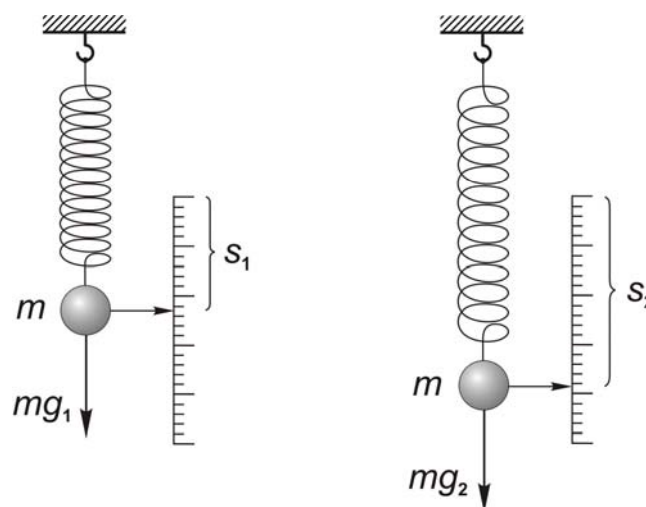
Így a két hely között a nehézségi gyorsulás különbsége:

$$g_2 - g_1 = \frac{D}{m}(s_2 - s_1)$$

vagy egyszerűbben:

$$\Delta g = c \Delta s$$

azaz két mérési pont között a Δs skálaleolvasási különbség egyenesen arányos a Δg nehézségi gyorsulás különbséggel; a c arányossági tényező a graviméter szorzója.

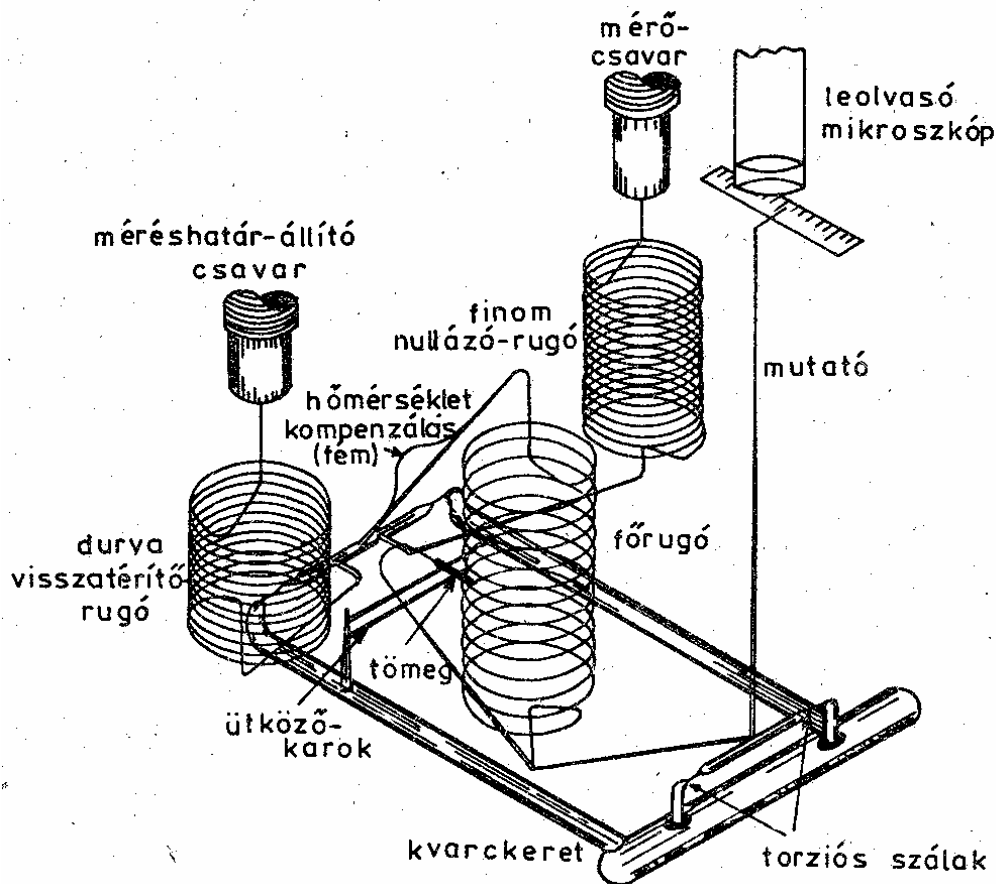


3. ábra. A graviméterek működésének alapelve

A graviméterek konkrét megvalósítási formái azonban lényegesen eltérnek a fent vázolt elvi felépítéstől. Ennek fő oka a rendkívül nagy pontossági igény, ugyanis a műszerektől elvárjuk, hogy a nehézségi gyorsulás 10^{-6} – 10^{-9} nagyságrendű megváltozását is érzékeln tudják.

A korszerű rugós graviméterek érzékenységét elsősorban asztatizációval fokozzák. Viszonylag nagy pontosságú és egyszerű kezelhetőségük miatt ma legelterjedtebbek a kvarcgraviméterek) pl. Worden, Sharpe, Scintrex, GAG stb.). A kvarcgraviméterek vázlatos belső felépítését a 4. ábra mutatja. Az ábrán feltüntetett kvarckerethez torziós szálakon két olyan kvarcrúd van kifesztve, amelyek vízszintes tengelyük körül elfordulhatnak. Az egyik kvarcrúdhhoz csatlakozó szerkezet tulajdonképpen az 5. ábrán bemutatott Galicin-féle szeizmométer, a másik kvarcrúdhhoz pedig különböző emelőkarokon keresztül a lengőt tartó főrugó, valamint a nullázó és a méréshatárt beállító rugó kapcsolódik.

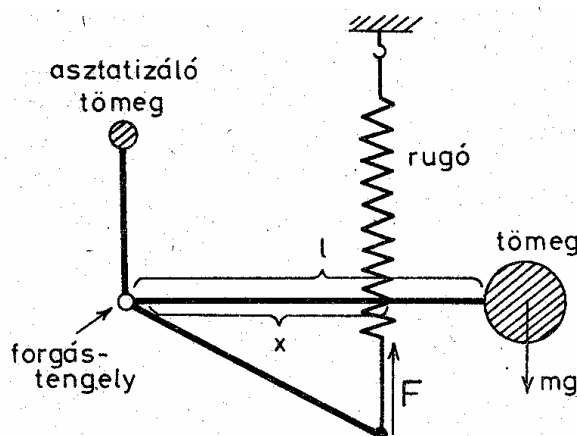
A nullázó és a méréshatárt beállító rugókkal a főrugó felső részéhez csatlakozó kart lehet emelni vagy süllyeszteni. A lengőrész forgástengelyéhez mutató kapcsolódik, amelyet a leolvasó-mikroszkópon keresztül figyelhetünk meg. Az egész szerkezet légüres térben és hőszigetelt edényben van, ráadásul a lengőt és a rugótartó karokat úgy készítik, hogy a kisebb hőmérsékletváltozások által okozott hatásokat automatikusan kompenzálják. A kvarc-alkatrészek igen könnyűek és az ütköző karok lehetővé teszik, hogy mérésen kívül, szállításkor a műszert nem kell "arretálni" – azaz a lengőrészt rögzíteni.



4. ábra. Kvarcgraviméter szerkezete

A kvarcgraviméter működése igen egyszerű: a nehézségi erő a lengő tengelyére meghatározott forgatónyomatékkal hat, amely forgatónyomatékkal a főrugó által kifejtett ellenkező irányú forgatónyomaték tart egyensúlyt. Ha a g megnő vagy lecsökken, akkor a lengő egyensúlyi helyzete annyival lejjebb vagy feljebb kerül, hogy a nehézségi erő és a rugóerő által okozott forgatónyomaték egyenlő legyen.

A mérés ún. nullpont módszerrel történik: a mérőrugót addig feszítjük vagy lazítjuk a mérőcsavar elforgatásával, amíg a lengő mutatója a leolvasó mikroszkópban látható beosztás nullpontjára nem mutat. Az elcsavarás mértéke a mérőcsavar melletti skálán olvasható le. Végül két mérési hely Δg különbsége a $\Delta g = c\Delta s$ szerint egyenesen arányos a mutató nullpont állásaihoz tartozó Δs leolvasás-különbséggel.



5. ábra. A Galicin-féle szeizmométer

A mérőrugó feszítő csavarjának két szélső helyzete bizonyos Δg nehézségi gyorsulás tartománynak felel meg. Ha a mérendő nehézségi gyorsulás változása ezen a tartományon kívül esik, akkor a 4. ábrán látható mérési határt állító, vagy "reset" csavarral tudjuk a mérési tartományt a kisebb vagy a nagyobb g értékek felé eltolni. Egyes műszereken az eltolás mértéke a csavar beosztásáról leolvasható, de csak a mérésnél kisebb megbízhatósággal.

Említettük, hogy az egyes műszerek mérőszervét általában a hőmérsékletváltozásokra kevésbé érzékeny anyagokból (pl. kvarcból) készítik és az egészet jól hőszigetelt edénybe, ún. termosztátba helyezik. Sajnos a gondos hőszigetelés ellenére is többé-kevésbé minden graviméter érzékeny a hőmérsékletváltozásokra, ezért a mérések közben óvni kell a műszert minden nagyobb hőmérsékletváltozástól. Ezt a továbbiakban feltételnek tekintjük.

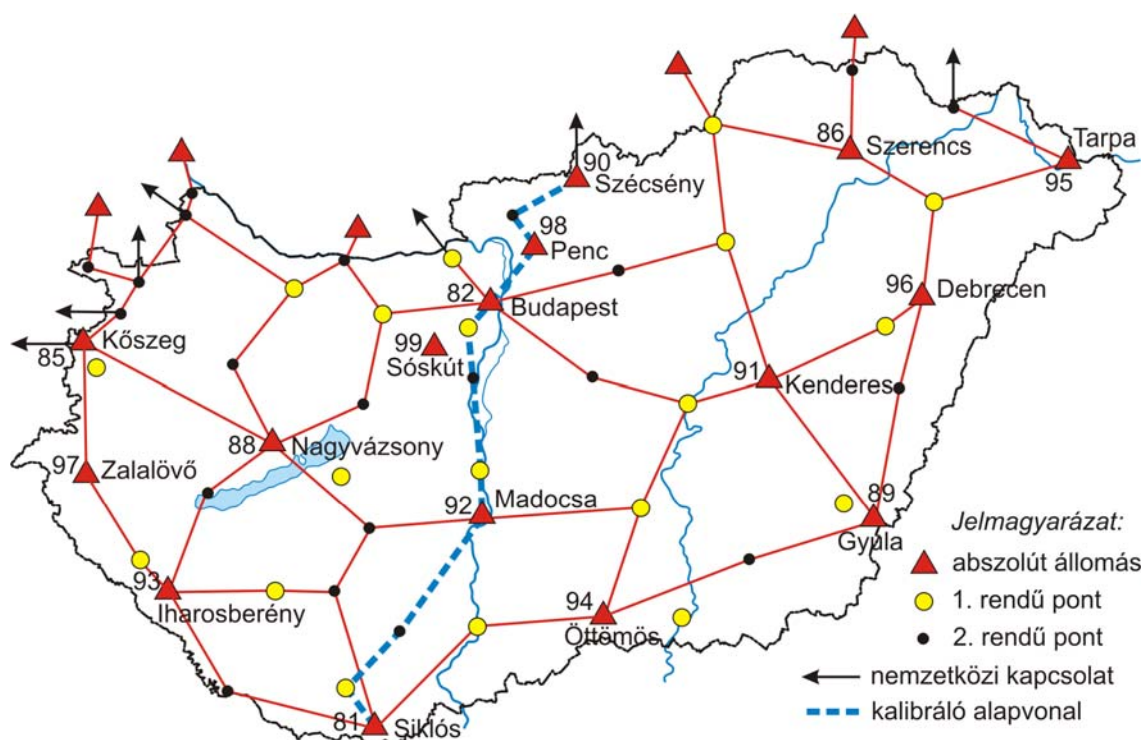
Ennek ellenére, ha az ugyanazon helyen felállított graviméterrel hosszabb időn keresztül méréseket végzünk, akkor azt tapasztaljuk, hogy a leolvasások az idővel többé-kevésbé folyamatosan változnak. Ennek oka egyrészt a nehézségi erő tér rövidperiódusú időbeli változása (a luniszoláris hatás), másrészt a műszer mérőszervezetében bekövetkező lassú lefolyású parányi változások. Ezek lehetnek pl. egészen csekély hőmérsékleti, légnyomás stb. hatások, de leginkább az anyag szerkezetében lefolyó molekuláris változások, a rugók parányi maradandó alakváltozásai. Ezek hatására a graviméter leolvasása akkor is folytonosan (sőt esetleg ugrásszerűen is) változna, ha a nehézségi erő az időben teljesen állandó lenne. Az ennek megfelelő változás az ún. *műszerjárás*, vagy *drift*.

A műszerjárás minden nagyérzékenységű graviméternek egyelőre elkerülhetetlen velejárója. A műszergyárak igyekeznek ezt a lehető legkisebb mértékre szorítani és a lehető legegyszerűsebbé tenni. Jó műszereknél a drift értéke naponta nem több néhányszor $10^{-6} m/s^2$ értéknel. A műszerjárás mértékét és egyenletességét a graviméteres mérések során állandóan figyelemmel kell kísérni. Terepi méréseknél ezt a pontok ismételt többszöri mérésével határozzuk meg. A műszerjárás szabályosságát gondos kezeléssel lehet elősegíteni.

A graviméterek kalibrációja

A mérések során alkalmazott terepi graviméterek c műszerszoróját, ill. konverziós függvényét rendszeresen ellenőrizni kell. A műszerszoró meghatározására több különböző módszer ismert (pl. döntőpad, "pince-padlás" módszer, az ELGI által létrehozott kalibráló berendezés a Mátyás-barlangban, vagy ismert hálózati pontokon történő mérés). A gyakorlatban leginkább ezt az utóbbi módszert használják. A mérés során a jelentősebb graviméteres munkák előtt és után, egyébként általában évente kétszer összehasonlító méréseket kell végezni a nagy pontossággal meghatározott (etalonnak tekinthető) **kalibráló alapvonal-pontok** között. Ezek a pontok ismerjük a g értékeket, így egyszerűen kiszámítható a szomszédos pontok közötti Δg különbség. Leolvasva a pontokon az s skálaértékeket kiszámítható közöttük a Δs különbség, így a $\Delta g = c\Delta s$ összefüggésből meghatározható a c műszerszoró értéke.

A magyarországi kalibráló alapvonal és a magyarországi UEGN közös pontok elhelyezkedése a 8. ábrán látható.

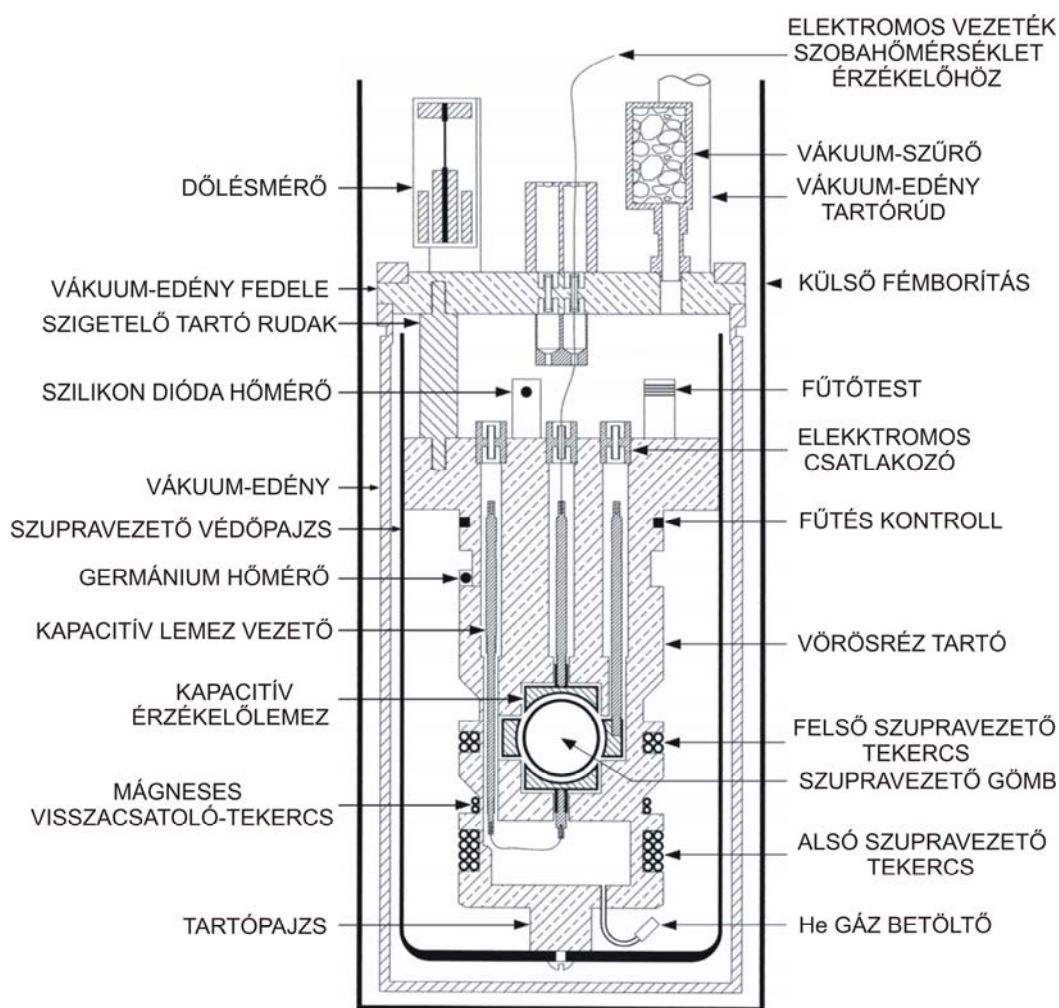


8. ábra. A magyarországi kalibráló alapvonal pontjai

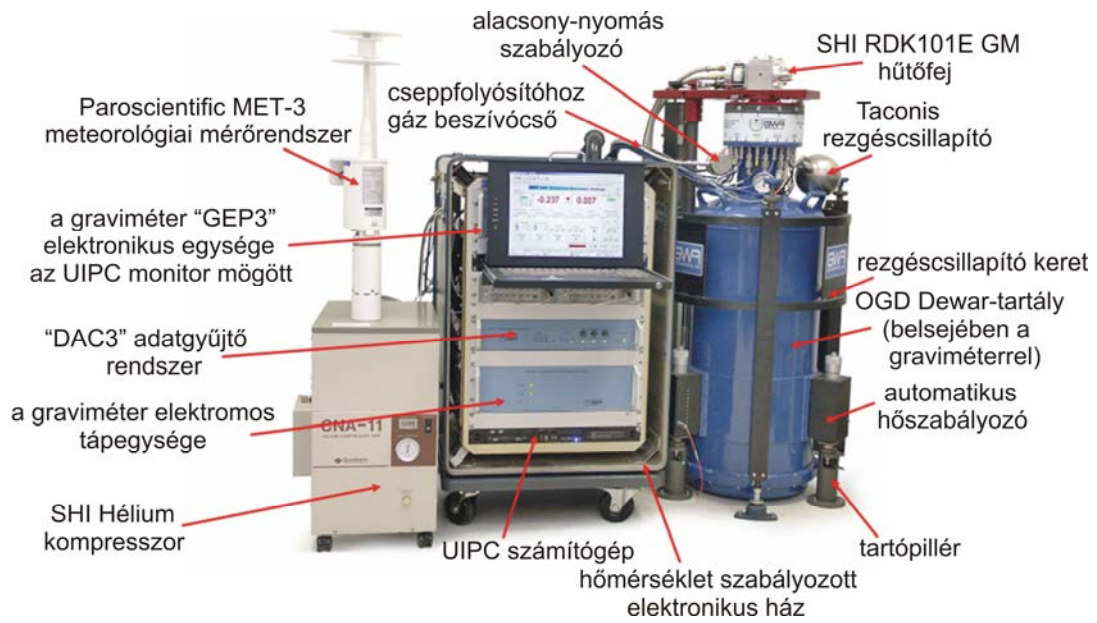
A szupravezető graviméter

A hagyományos graviméterekben a mérő tömeget az előző ábrákon látható formában fimon rugókra függesztették fel. Amint láttuk, a műszerek pontosságát alapvetően a felfüggesztő rugók driftje befolyásolja. Az utóbbi években kifejlesztettek egy olyan készüléket, amelyben a mérő gömb alakú tömeget ultrastabil mágneses erőter tartja lebegő helyzetben egyensúlyban. A mágneses teret két nióbbium tekercsben folyó áram kelti, a tekercseket és az érzékelő tömeget igen alacsony hőmérsékleten, 4.2 K° környékén tartják folyékony héliumban szupravezető állapotban (6. ábra).

Az érzékelő tömeg helyzetét és parányi elmozdulását mérőhídba kapcsolt kapacitív érzékelők mérik és negatív visszacsatolással igyekeznek mindig nullhelyzetben tartani a visszacsatoló-tekercsben folyó áram erősségének változtatásával. A nullhelyzetbe visszatérítő erőnek a nagysága arányos a nehézségi erő megváltozásával. Ezzel a módszerrel elvileg nGal (milliomod Gal) pontosság érhető el, ami közel három nagyságrenddel jobb az ediginél. A készülék jelenlegi ára megközelítőleg 10^9 Ft, ezért egyelőre csak néhányszor 10 db működik a világon. A működési alapelveinek megfelelően a szupravezető graviméter is relatív műszer. A műszer összeszerelt állapotban a 7. ábrán látható. Egyelőre kizárólag laboratóriumokban használható.



6. ábra. A szupravezető graviméter elvi felépítése



7. ábra. A szupravezető graviméter összeszerelt állapotban