# Geofizika

## Gravitációs kutatómódszer

## 1. rész

Összeállította: dr. Pethő Gábor, dr Vass Péter

ME, Geofizikai Tanszék

# Történeti áttekintés

**Pütagorasz** (Kr. e. 580-520 körül) és követői (pütagoreusok)

már gömb alakúnak tekintették a Földet.

**Arisztotelész** (Kr. e. 384 – 322)

már bizonyítékokat is szolgáltat a gömb alakra vonatkozóan

**Szamoszi Arisztarkhosz** (kb. Kr. e. 310 – kb. 230)

heliocentrikus világkép gondolatának felvetése

**Nikolausz Kopernikusz** (1473 – 1543)

Fő műve: De Revolutionibus Orbium Coelestium (Az égi pályák körforgásairól), 1543 Nürnberg

A bolygók a Nap körül kör pályán keringenek.

**Galileo Galilei** (1564 -1642)

Kísérletileg bizonyította, hogy a szabadesés sebessége független a testek tömegétől.

# Történeti áttekintés

**Johannes Kepler** (1571–1630)

A bolygók pályája nem kör, hanem ellipszis, és annak egyik gyújtó-pontjában van a Nap.
A bolygók vezérsugarai azonos idők alatt azonos területet súrolnak.
A bolygók Naptól való átlagos távolságainak a köbei úgy aránylanak egymáshoz, mint a keringési idejük négyzetei.
Feltételezi, hogy a bolygókat egy a Napból kiáradó erő tartja a pályájukon. Ez az erő a Naptól távolabb gyengébb, ezért mozognak lassabban a távoli bolygók.

**Sir Isaac Newton** (1642 –1727)

Fő műve: Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (A természet-filozófia matematikai alapelvei, 1687)
Általános tömegvonzási törvény
Mechanika alaptörvényei
(Kepler törvényeire és bolygópálya-leírásaira támaszkodott).

# Történeti áttekintés

**Pierre Bouguer** (1698 –1758)

A nehézségi erő földrajzi szélesség és tengerszint feletti magasságtól való függését vizsgálta (1735 Peru).
A Föld sűrűségének meghatározásával is foglalkozott.

báró **Eötvös Loránd Ágoston** (1848 –1919)

A torziós inga kifejlesztése (az első geofizikai mérőműszer).
A gravitációs módszer az első geofizikai kutatómódszer (szénhidrogénkutatás).
Sódómok és antiklinális szerkezetek kimutatása.
Az I. világháború után a műszert több kontinensen alkalmazták sikeresen (Európa, Ázsia, Amerika).

# Történeti áttekintés

**Lucien LaCoste** (1908 – 1995) és **Arnold Romberg**

Az első graviméter kifejlesztése (1934)

A graviméterek az 1930-as évek vége felé kezdték felváltani az Eötvös- ingákat.

Az 50-es évektől hajón, légi eszközökön végeznek gravitációs méréseket.

A 80 évektől a rugós graviméterekben alkalmazást kapott az elektrosztatikus nullázás (pontosság növekszik, gyorsabb mérés).

Az utóbbi évtizedekben nagyon pontos gravimétereket (pl szupravezető graviméter) fejlesztettek ki.

A pontosság növelése új feladatok megoldását teszi lehetővé (pl. tengerfenéki graviméterekkel elvégzett monitoring mérések révén $CO_2$ besajtolás hatásának megfigyelés).

A XXI. század elején több sikeres műholdas gravitációs mérés is megvalósult, az eredmények biztatók.

# Fizikai alapok

Az anyagnak két megjelenési formája ismeretes:

- a korpuszkuláris anyag,
- és a mező anyag.

A gravitációs tér (v. gravitációs mező) egy mező anyag (hasonlóan az elektromágneses térhez), és mint ilyen rendelkezik az anyag sok lényeges tulajdonságával (energia, impulzus, impulzusmomentum).

Nem rendelkezik azonban a részecskékből (korpuszkula) felépülő anyagokra jellemző egyéb tulajdonságokkal, mint pl. áthatolhatatlanság, megfoghatóság, határfelület, keménység és láthatóság.

A gravitációs tér forrása a tömeg.

A testek a saját gravitációs terük által hatást fejtenek ki egymásra, amit gravitációs kölcsönhatásnak nevezünk.

# Fizikai alapok

A gravitációs kölcsönhatás jellemzői:

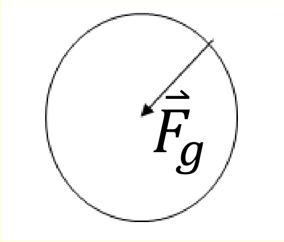
- mindig vonzásban nyilvánul meg,
- az alapvető kölcsönhatások közül a leggyengébb,
- a gravitációs tér hatása nem árnyékolható le (mindenen áthatol),
- a hatótávolsága "végtelen".

A gravitációs mező jellemző tulajdonságai:

- forrásos mező (a forrásai a tömeggel rendelkező testek),
- konzervatív mező (ha a mezőben egy test mozog, vagy mozgatjuk, akkor két pont között végzett munka nagysága nem függ az útpálya hosszától és alakjától, csak a két pont koordinátáitól),
- örvénymentes mező (ha a mezőben egy test zárt görbe mentén mozog vagy mozgatjuk, akkor a végzett munka összege nulla).

# Fizikai alapok

Homogén összetételű, gömb alakú test esetén az $m_1$ tömegű $r$ távolságú testre ható tömegvonzási (gravitációs) erő:




$$\vec{F}_g = f\,\frac{m_1 M}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}$$

$M$: a test tömege, $f$: (általános) tömegvonzási (v. gravitációs) állandó ($f = 6.67 \cdot 10^{-11} Nm^2/kg$).

$$\vec{F}_g = m_1\vec{g} \rightarrow \vec{g} = f\,\frac{M}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}$$

**g** vektor: gravitációs térerősség vektor, más néven

gravitációs gyorsulás (tömegvonzási gyorsulás), melynek átlagos értéke a Föld esetében g = 9,81 m/s$^2$

A gravitációs gyorsulás cgs egységét Galilei tiszteletére 1 gal-nak nevezik. **1 gal = 1 cm/s$^2$ = 0,01 m/s$^2$**

Megjegyzés: az angolszász szakirodalomban a tömegvonzási állandót G-vel jelölik és némi iróniával "big G" néven is emlegetik, amely a nagyon kicsi értékével állítja szembe a jelölést.

# Fizikai alapok

A valóságban a gravitációs térerősség térben és időben változhat:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}(t, \mathbf{r}).$$

A gravitációs erőtér matematikai leírása megkívánja az ún. gravitációs (v. tömegvonzási) potenciál függvény bevezetését.

Általános esetben a gravitációs potenciál a hely és az idő függvénye:

$$U = U(t, \mathbf{r}).$$

Stacionárius (időtől független) esetben egy skalár-vektor függvénnyel írható le a gravitációs potenciál: $U = U(\mathbf{r})$ [j/kg].

A gravitációs potenciál értéke megadja, hogy az egységnyi tömeggel bíró tömegpont mekkora munkát végezne, ha a tér végtelen távoli pontjából a tér vizsgálat tárgyát képező pontjába jutna.

A gravitációs térerősség és a potenciál közötti kapcsolatot az alábbi összefüggés szerint értelmezik:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}(\mathbf{r}) = -\,\mathrm{grad}\, U(\mathbf{r}),$$

azaz a gravitációs térerősség a gravitációs potenciál negatív gradiense.

# Fizikai alapok

Megjegyzések:

A gradiens negatív előjeles alkalmazásának előnye az, hogy egy vonzó centrum (pl. a Föld) környezetében lévő tömegpontok esetében a számítással kapott gravitációs térerősség iránya a vonzó centrum felé fog mutatni, ami a tapasztalatokkal megegyező eredményre vezet.

A gravitációs potenciál egy másik lehetséges definíciója szerint a gravitációs potenciál értéke megadja, hogy mekkora munkát kell befektetni ahhoz, hogy az egységnyi tömeggel bíró tömegpontot a tér vizsgálat tárgyát képező pontjából a tér végtelen távoli pontjába juttassuk.

A két definíció szerinti potenciálfüggvények csak előjelükben különböznek.

Természetesen a gravitációs potenciál értékét abszolút értelemben nem tudjuk mérni, hiszen a műszereinket nem tudjuk a végtelen távoli pont gravitációs potenciáljához kalibrálni.

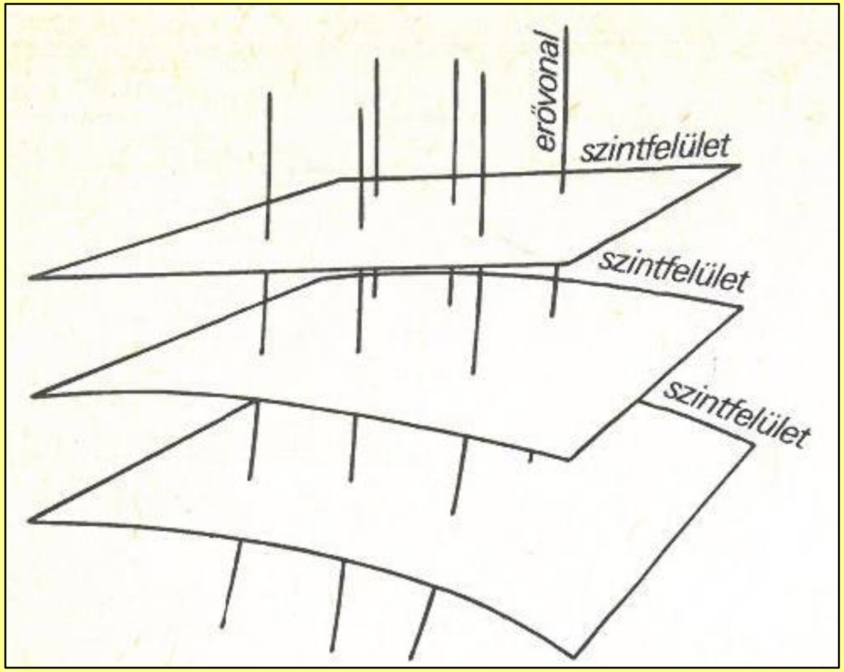
Két térbeli pont közötti gravitációs potenciálkülönbség mérése azonban már technikai értelemben kivitelezhető feladat.

Minden konzervatív erőtér (nem csak a gravitációs) előállítható egy neki megfelelő potenciál függvény gradienseként (pl. sztatikus elektromos mező).

# Fizikai alapok

A gravitációs tér azon pontjai, amelyeknek a gravitációs potenciálja megegyezik egy felületet alkotnak. Az ilyen felületet (gravitációs) ekvipotenciális felületnek (nívófelület) nevezzük:

$U(\mathbf{r}) = C$ (C konstans, a gravitációs potenciál értéke)




A gravitációs erőteret jellemző erővonalak a tér minden pontjában merőlegesek az ekvipotenciális felületekre, és a csökkenő potenciál felé mutatnak.

Meskó A.: bevezetés a geofizikába, Tankönyvkiadó, Bp., 1989

# Fizikai alapok

Valamely ekvipotenciális felületre eső pontok potenciális (*helyzeti*) energiája megegyezik.
A különböző gravitációs pontenciálértékekhez tartozó ekvipotenciális felületek nem metszik egymást!

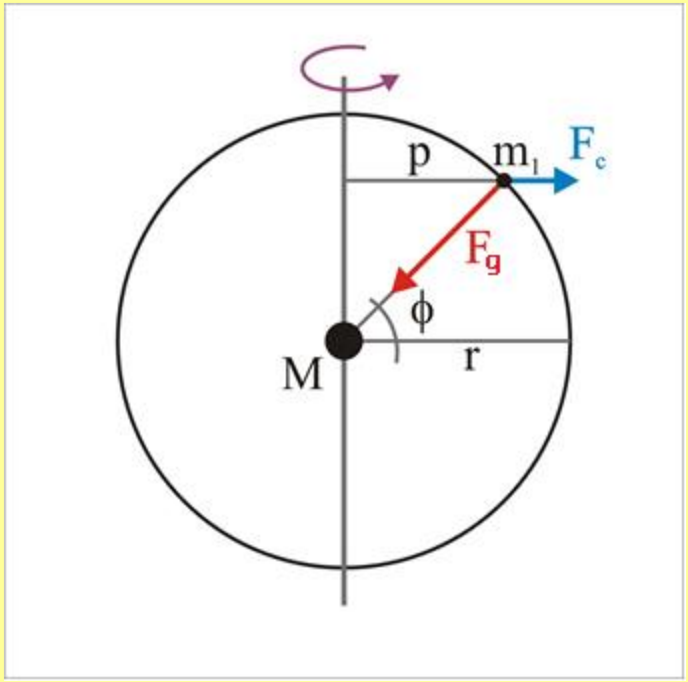
Mivel a gravitációs erőtér *konzervatív*, a végzett munka független a test által bejárt útvonaltól, csakis a kezdő és végpont potenciális energiáitól (a két pont közötti potenciális energia különbségtől) függ.

$$W_g = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}_g d\vec{r} = const.$$

Az ekvipotenciális felület mentén nincs különbség a pontok potenciális energiái között, ezért nem kell energiát befektetni egy test mozgatásához a felület mentén (surlódás és légellenállás nélküli esetben).
Homogén tömegeloszlású gömb esetében a gravitációs ekvipotenciális felületek koncentrikusan elhelyezkedő gömb felületek.

# Fizikai alapok

Homogén tömegeloszlású, tengelye körül $\omega$ szögsebességgel forgó gömbalakú test esetén, a felszín $P$ pontjában elhelyezkedő $m_1$ tömegű testre a gravitációs erőn ($\mathbf{F}_g$) kívül centrifugális erő ($\mathbf{F}_c$) is hat. A két erő eredője az ún. nehézségi erő ($\mathbf{F}_n$)




$$\vec{F}_g = f\frac{m_1 M}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}$$

$$\vec{F}_c = m_1\omega^2\vec{p} = m_1\omega^2 p\frac{\vec{p}}{p} = m_1\omega^2 r\cos\phi\frac{\vec{p}}{p}$$

$$\vec{F}_n = \vec{F}_g + \vec{F}_c = f\frac{m_1 M}{r^2}\frac{\vec{r}}{r} + m_1\omega^2 r\cos\phi\frac{\vec{p}}{p} =$$

$$= m_1\left(f\frac{M}{r^2}\frac{\vec{r}}{r} + \omega^2 r\cos\phi\frac{\vec{p}}{p}\right) = m_1\vec{g}_n$$

*r* : a gömb sugara, $\phi$: a tömegpont gömbi szélességkörének szöge, *p*: a *P* helyzetű pont távolsága a forgástengelytől (merőleges irányban),
**r** vektor a középpont felé, a **p** vektor a forgástengelytől kifelé mutat.

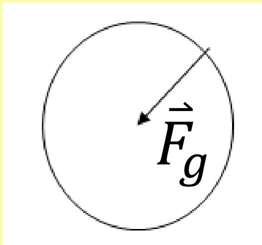
# Fizikai alapok

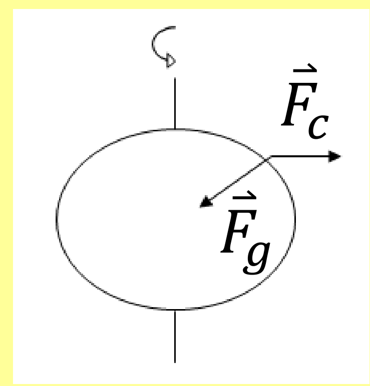
A *gravitációs erőtér*hez hasonlóan a *centrifugális erő*tér is konzervatív.
Két konzervatív erőtér eredője is konzervatív erőtér lesz.
A két erőtér eredőjét *nehézségi erőtér*nek nevezzük. A két erőtér potenciáljainak összege adja meg a nehézségi erőtér potenciálját.
Ennek megfelelően a nehézségi erőtérben is definiálhatunk ekvipotenciális felületeket.

$\mathbf{g}_n$ vektor: *nehézségi térerősség*, vagy **nehézségi gyorsulás** vektor (a gravitációs és a centrifugális gyorsulás vektorok eredője).

A centrifugális erő nagysága függ a geocentrikus szélességtől!

A centrifugális erőtér hatására a gömb alakú, homogén tömegeloszlású, rugalmas test alakja megváltozik, forgási ellipszoid lesz belőle.



# Nehézségi erő

A nehézségi erő ($\vec{F}_n$) a tömegvonzási erő ($\vec{F}_g$) és a centrifugális erő eredője ($\vec{F}_c$).

Az $M$ tömegű Föld a felszínén lévő $m_1$ tömegű nyugvó testre a Newton-féle általános tömegvonzási törvény szerint hat a tömegvonzási erő.
Ha a Föld tömegét ( $M = 5.977 * 10^{24} kg$ ) annak középpontjába képzeljük el és a Föld átlagos sugarát $r$ = 6370 km-nek vesszük, az általános tömegvonzási állandó ( $f = 6.67 * 10^{-11} Nm^2 / kg^2$) és a próbatömeg $m_1$ tömegének ismeretében a Föld középpontja felé mutató tömegvonzási erő számítható.

A Föld forgása miatt a felszínen nyugvó testre a centrifugális erő is hat, melynek iránya a forgástengelyre merőlegesen, kifelé mutat ($\vec{p}$), és nagyságát a próbatest $m_1$ tömege, a szögsebesség ($\omega = 2\pi / csillagászati\ nap$ ), a forgástengelytől mért távolság ( $p = r\cos\phi$ , ahol $\phi$ a geocentrikus szélesség) határozza meg.

# Gravitációs kérdés

Milyen  a centrifugális és a tömegvonzási erő aránya az Egyenlítő mentén és az északi sarkon?

Megoldás:

az egyenlítő mentén ($\phi=0°$) a centrifugális és a gravitációs erők:

$$F_c = m_1\omega^2 r cos\phi = m_1\omega^2 r = m_1(2\pi/24/3600)^2 \cdot 6{,}37 \cdot 10^6 kg \cdot m/s^2$$

$$F_g = f\frac{m_1 M}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} Nm^2/kg^2 \cdot \frac{m_1 \cdot 5{,}977 \cdot 10^{24} kg^2}{6{,}37^2 \cdot 10^{12} m^2}$$

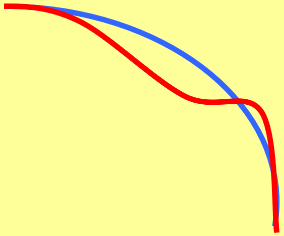
Az arány független $m_1$ értékétől.

SI mértékrendszert használva az erőt N egységben kapjuk.

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{0{,}033688\ N}{9{,}825\ N} = \frac{1}{292} \approx \frac{1}{300}$$

**Más  földrajzi szélességek mellett az arány még kisebb, a sarkokon zérus!**

# A Föld normál alakja

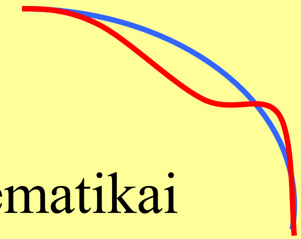


**A Föld normál alakja**
a Föld tömegével megegyező, homogén sűrűségű, folyadékszerűen viselkedő anyagból álló, a Föld tömegközéppontjával, forgástengelyével és szögsebességével megegyező tömegközéppontú, forgástengelyű és szögsebességgel forgó, valamint a Föld tényleges nehézségi erőterét legjobban megközelítő nehézségi erőteret létrehozó, és abban egyensúlyi állapotot felvevő zárt alakzat.
A fentebb említett fizikai paraméterekkel bíró alakzat megfeleltethető egy geocentrikus helyzetű forgási ellipszoidnak. A felszíni pontjai elhelyezkedését és lapultságát leíró egyenletek az alábbiak:

$$r_{fe} = r_e(1 - l \cdot \sin^2 \phi) \qquad l = \frac{r_e - r_p}{r_e}$$

$l$: a forgási ellipszoid geometriai lapultsága, $r_e$: az egyenlítői sugár, $r_p$: a poláris (sarki) sugár, $\phi$: a geocentrikus szélesség.
A forgásból származó hatás miatt a poláris sugár értéke kisebb az egyenlítői sugárnál.

# A Föld normál alakja



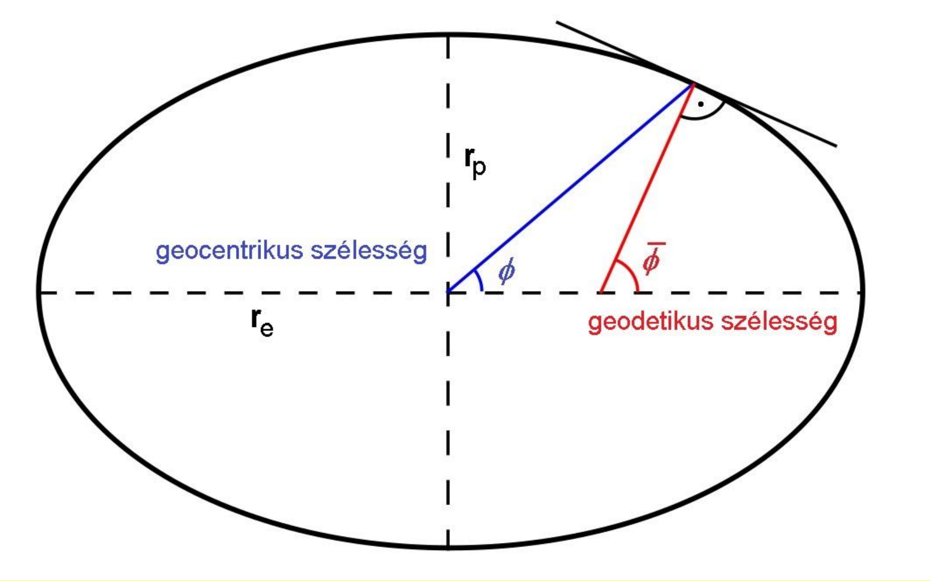
Mivel a Föld tényleges nehézségi erőterét nem tudjuk matematikai formában pontosan megadni, a normál alaknak megfelelő ellipszoid paramétereinek meghatározása nem egyszerű feladat.
Csillagászati geodéziai mérések, a földi nehézségi erőtér gravitációs hálózatokon alapuló mérései, valamint a műholdak helyzetének méréséből származó adatok alapján van lehetőség a felsőgeodéziában referencia ellipszoidnak nevezett forgástest paramétereinek meghatározására.
A Föld normál alakjához tartozó nehézségi erőteret normál nehézségi erőtérnek nevezzük.
A normálalak felülete, egyben a normál nehézségi erőtér egyik szintfelülete (ekvipotenciális felület).
A normál nehézségi erőtérnek a Föld normál alakján érvényes nehézségi gyorsulását normális nehézségi gyorsulásnak (a nehézségi gyorsulás normál értéke) nevezzük.

# A Föld normál alakja

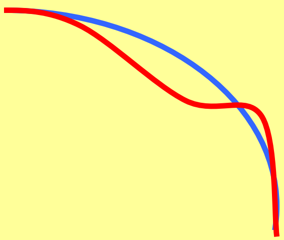
A nehézségi gyorsulás normál értéke csak a földrajzi (másnéven geodetikus) szélességtől függ, és az ellipszoidi paraméterek ismeretében matematikai formulával megadható. Speciális függvénysor szerinti sorfejtés első néhány tagjának megadásával közelítik. A matematikai összefüggés alakja:

$$g_{norm} = g_e(1 + \beta \cdot \sin^2 \bar{\phi} + \beta_1 \cdot \sin^2 2\bar{\phi})$$

$g_{norm}$: a nehézségi gyorsulás normál értéke, $g_e$: a nehézségi gyorsulás normál értéke az egyenlítőn, a $\beta$ és $\beta_1$ mennyiségek konstans szorzótényezők (sorfejtési együtthatók), $\bar{\phi}$: a geodetikus (földrajzi) szélesség.



# A Föld normál alakja



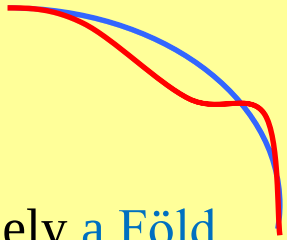
A Földet globálisan közelítő, nemzetközileg elfogadott és jelenleg is alkalmazott geocentrikus forgási ellipszoid (referencia ellipszoid) a **WGS84 modell** (World Geodetic System 1984).

A globális helymeghatározás referencia szintje (ezt használja az USA által kifejlesztett GPS rendszer).

Főbb paraméterei:

- egyenlítői sugár $r_e$ = 6 378 137 m,
- a pólusoknál a sugár $r_p$ = 6 356 752 m,
- míg a lapultság mértéke $l$ = 1/298,25223563.
- az egyenlítői normál nehézségi gyorsulás $g_e \cong 9{,}78$ m/s$^2$
- a normál nehézségi gyorsulás a póluson $g_p \cong 9{,}832$ m/s$^2$

# A geoid



**Geoid (a Föld elméleti alakja):**

a nehézségi erőtér azon ekvipotenciális felülete (nívófelülete), amely a Föld tényleges (fizikai) alakját a nyugalmi tengerszinten legjobban közelíti.

Ez a zárt felület nemcsak a földrajzi szélesség ($\phi$), hanem kisebb mértékben ugyan de a földrajzi hosszúság ($\lambda$) függvénye is. Nem szabályos alakzat (matematikailag nem írható le).

$$r_{geoid} = r_{geoid}(\phi, \lambda)$$

$r_{geoid}$ a geoid tömegközéppontja és a felszíni pont közötti távolság

A geoid adott pontbeli érintősíkja definiálja a helyi vízszintes síkot, és a rá merőleges nehézségi erő hatásvonalát adja meg a helyi függőleges vonal.

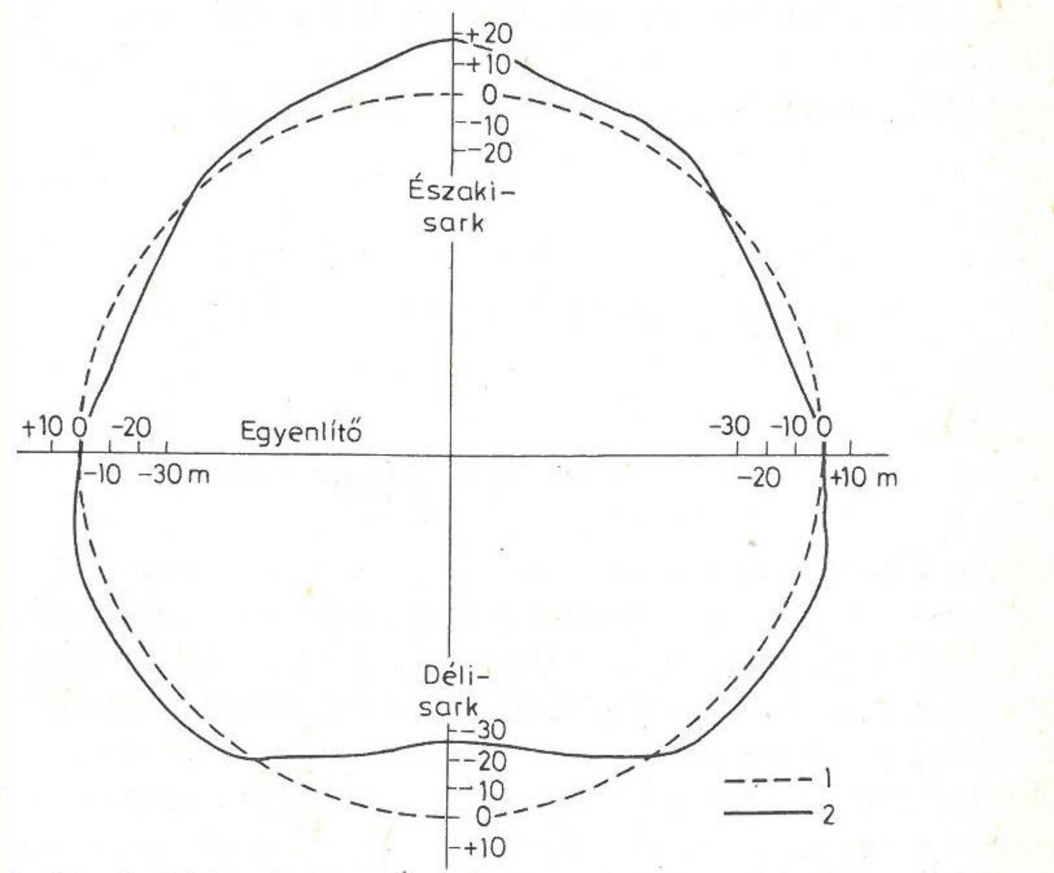
A geoidon a nehézségi gyorsulás értéke függ a földrajzi szélességtől és a hosszúságtól:

$$g_{n,geoid} = g_{n,geoid}(\phi, \lambda)$$

Ha a Föld alakját kívánjuk jellemezni, akkor a **geoid** és a **forgási ellipszoid** (normál Föld alak) felületek magasságkülönbségét kell megadni minden pontban. Ezt a magasságkülönbséget nevezzük **geoid unduláció**nak **(*N*),** ami a földrajzi szélesség és hosszúság függvénye, és a mértéke abszolút értékben kisebb, mint 100 m.

$$N(\phi, \lambda) = r_{geoid}(\phi, \lambda) - r_{fe}(\phi)$$

# Referencia ellipszoid és geoid




A „körte" alakú Föld. *1* – a forgási ellipszoid, *2* – a geoid. Az Egyenlítőnél és a sarkokon a geoid eltérései méterben olvashatók le

Gábris, Marik, Szabó: Csillagászati földrajz, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991

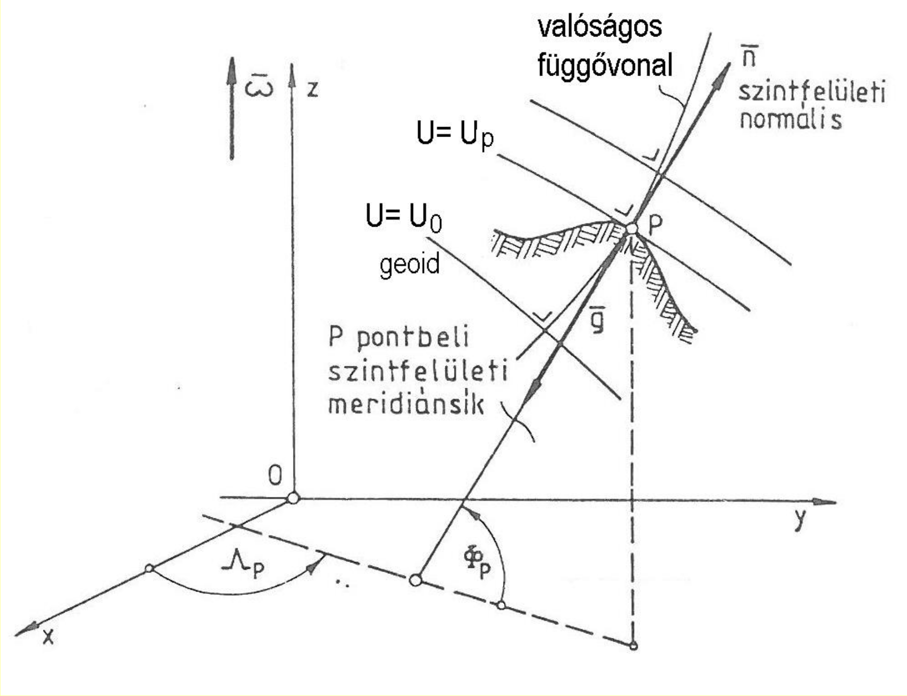
Az ábra a földrajzi szélességi körök mentén összegzett geoid undulációk eltéréseit mutatja be.
Az eredmények egy 1974-ben készült geoid undulációs térképen alapulnak. Az alkalmazott referencia ellipszoid lapultsága: 1/298.255
(Az undulációk ábrázolása nem méretarányos.)
undulació=hullámosság, hullámzás

# Geoid unduláció és függővonal-elhajlás

A Föld felszínének bármely pontján meghatározható a helyi vízszintes sík, amely a nehézségi erőtér ponton átmenő ekvipotenciális felületét érintő sík. A helyi függőleges egyenes pedig merőleges az érintősíkra az adott pontban. A helyi függőleges egyenes a ponton átmenő ún. valóságos függővonalat érintő egyenes, és egybeesik a nehézségi erő pontbeli hatásvonalával. A valóságos függővonal olyan görbe, amely a nehézségi erőtér ekvipotenciális felületeit a felületi normálisoknak megfelelő irányokban metszi át, tehát a helyi függőleges egyenesek képezik az érintőit. Természetesen az ekvipotenciális felületek rendszere egyértelműen meghatározza a valóságos függővonalak rendszerét és ez fordítva is igaz.
Bármely felszíni ponton felvehetünk azonban egy másik síkot is, amely a normál nehézségi erőtér ponton áthaladó ekvipotenciális felületét érinti. Az erre merőleges pontbeli egyenest nevezzük elméleti függőlegesnek. A fentiekhez hasonló elvek szerint definiálhatjuk az elméleti függővonalak rendszerét is, amelyek a normál nehézségi erőtér ekvipotenciális felületeit metszik a felületi normálisok irányában, és az elméleti függőleges egyenesek érintik minden egyes pontjukban.

# Geoid unduláció és függővonalelhajlás

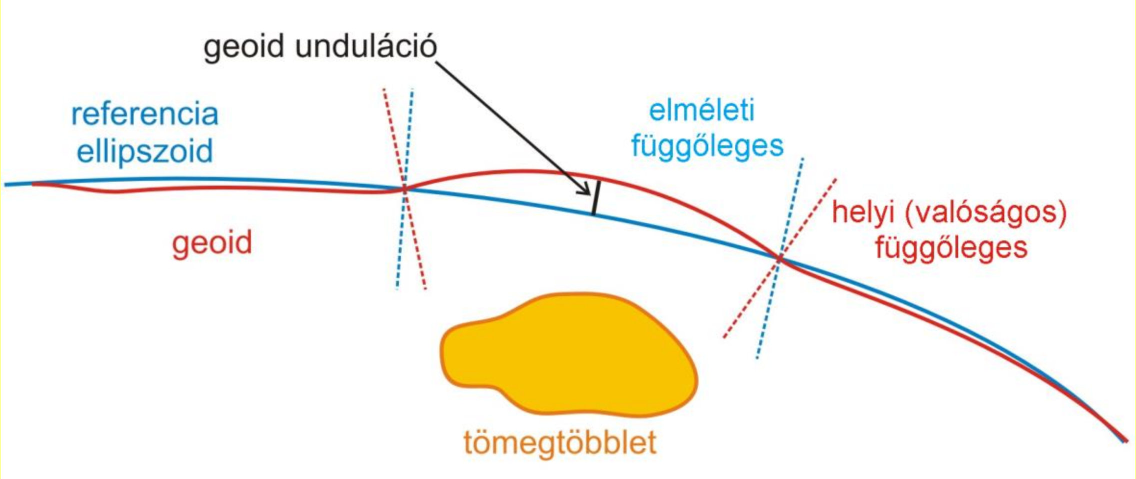
A pontra értelmezhető helyi függőleges és elméleti függőleges egyenesek által bezárt szöget nevezzük a valóságos és elméleti függővonalak adott pontra érvényes elhajlásának, röviden függővonalelhajlásnak.
A függővonalelhajlás értéke természetesen pontról-pontra változhat. Minél jobban illeszkedik a ponton és környezetében a kétféle ekvipotenciális felület, annál kisebb a függővonal elhajlás. A geoid felülete a nehézségi erőtér ekvipotenciális felülete. A Föld normál alakja pedig a normál nehézségi erőtér ekvipotenciális felülte.




x: a greenwich-i kezdőmeridián síkjával párhuzamos tengely, z: a Föld tengelyével párhuzamos tengely, $\phi_p$ a P pont földrajzi szélessége, $\Lambda_p$ a P pont földrajzi hosszúsága, $U_0$ a nehézségi erőtér potenciálja a geoidon (nem mérhető), $U_p$ a nehézségi erőtér potenciálja a P ponton átmenő ekvipotenciális felületen (nem mérhető), $\vec{g}$ a nehézségi gyorsulás vektor a P pontban.

(Krauter A. 1995: Geodézia, Műegyetemi Kiadó)

# Geoid unduláció és függővonalelhajlás




Az ábra a geoid és a normál alak (itt referencia ellipszoid) viszonyát mutatja be egy felszínalatti tömegtöbblet (a környezetéhez képest nagyobb sűrűségű térfogatrész) környezetében.

A tömegtöbblet hatására a két nevezetes ekvipotenciális felület eltér egymástól és pozitív geoid unduláció lép fel.
Ahol a két felület érinti vagy metszi egymást, a pontbeli elméleti és valóságos függővonalak érintői, az elméleti és a helyi (valóságos) függőleges egyenesek közötti szög, az ún. függővonalelhajlás jellemzi a geoid és a normál alak illeszkedését. A tömegtöbblet hatása miatt a két felület nem illeszkedik jól, ami a jelentős nagyságú függővonalelhajlásban is megnyilvánul.

# Geoid unduláció és függővonalelhajlás

Felszínalatti tömeghiány (a környezetéhez képest kisebb sűrűségű térfogatrész) negatív geoid undulációt és ellentétes értelmű függővonal elhajlást eredményez.
A helyi (valóságos) függőleges egyenes mindig a nagyobb sűrűségű térfogat felé tart.
A geoid nagyobb undulációval és függővonalelhajlással jellemezhető pontjai a felszín alatt oldalirányú sűrűségváltozást okozó földtani szerkezetek jelenlétét jelzik, amelyek anomáliákat okoznak a nehézségi erőtérben. Az ilyen szerkezetek legfőképpen a geodinamikailag aktív zónákhoz, lemeztektonikai egységek határaihoz, az izosztatikus egyensúly hiányát mutató nagyobb területrészekhez társulnak.

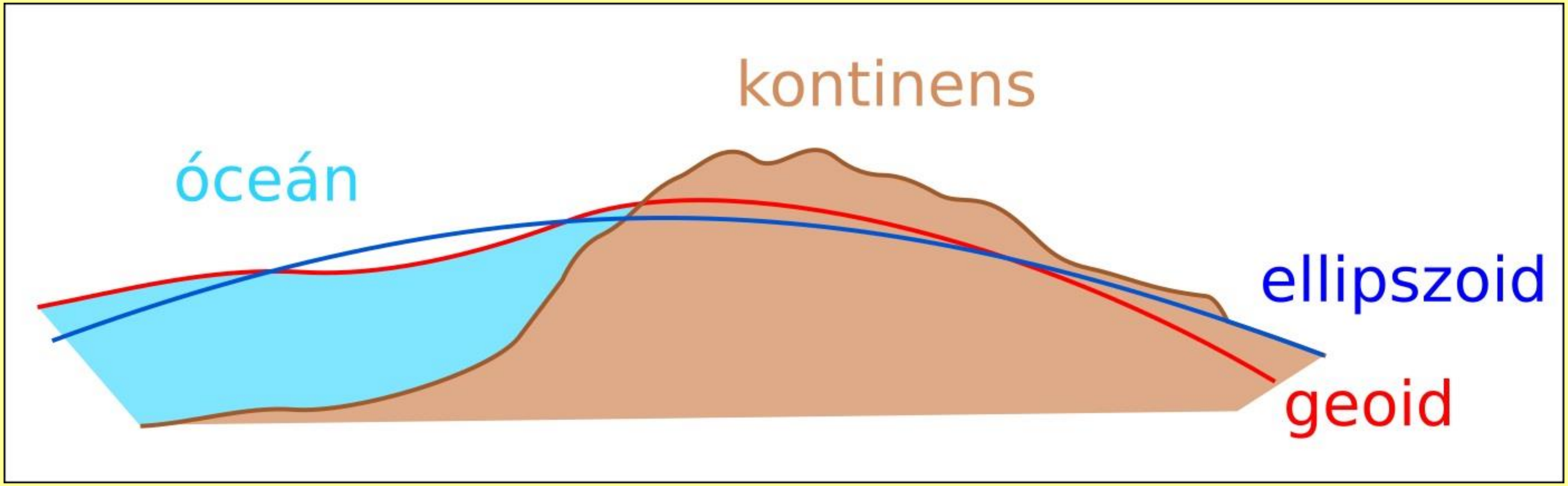
# Geoid unduláció jelentősége

A Földön mért magassági adatokat a nyugalmi tengerszinthez, azaz a **geoidhoz**, képest adjuk meg.

Ugyanakkor a műholdas helymeghatározási rendszerek - így a GPS is - a **WGS84** referencia ellipszoidhoz viszonyítva adja meg a kérdéses pont magasságát.

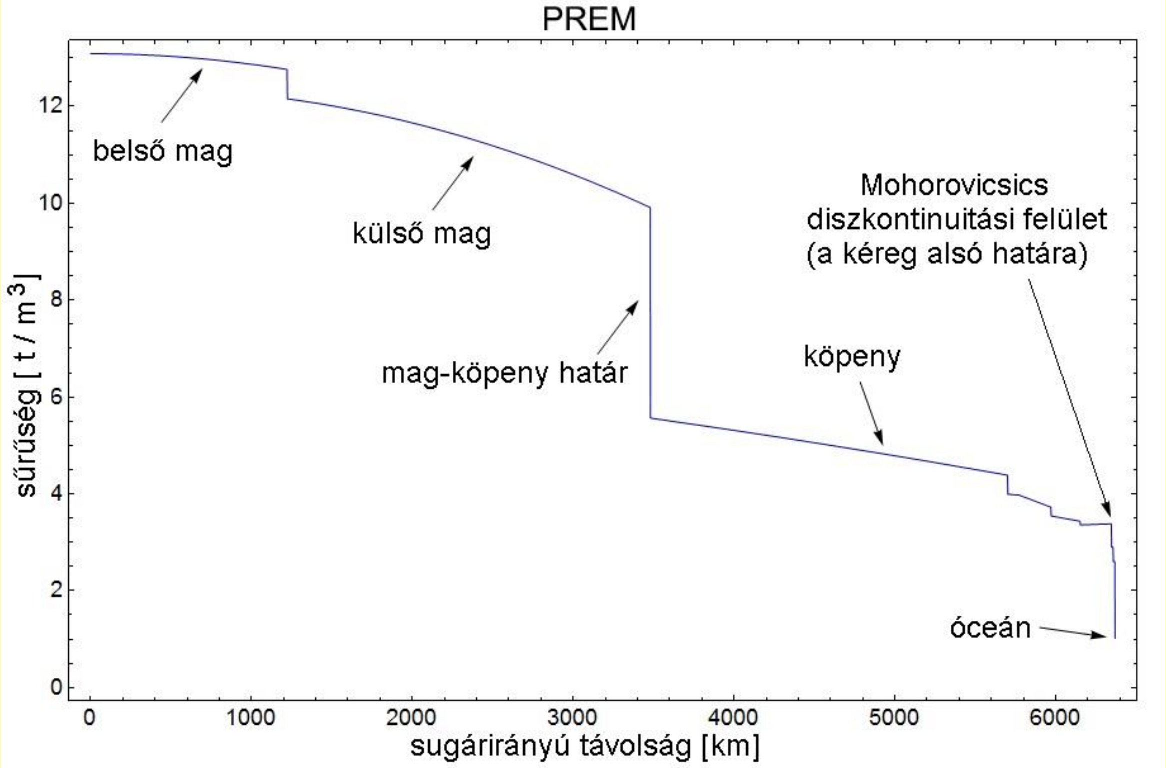
Ahhoz, hogy a GPS vevő a tengerszint feletti magasság adatot szolgáltassa, a GPS vevőnek korrigálnia kell a mért a magasság adatot a **geoid unduláció** mértékével.
Minél pontosabban ismert a **geoid unduláció**, annál nagyobb a magassági adat pontossága.

# Ellipszoid, geoid és a Föld valódi alakja




Gábris, Marik, Szabó: Csillagászati földrajz, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991

# A Föld belső sűrűségeloszlása a PREM modell szerint

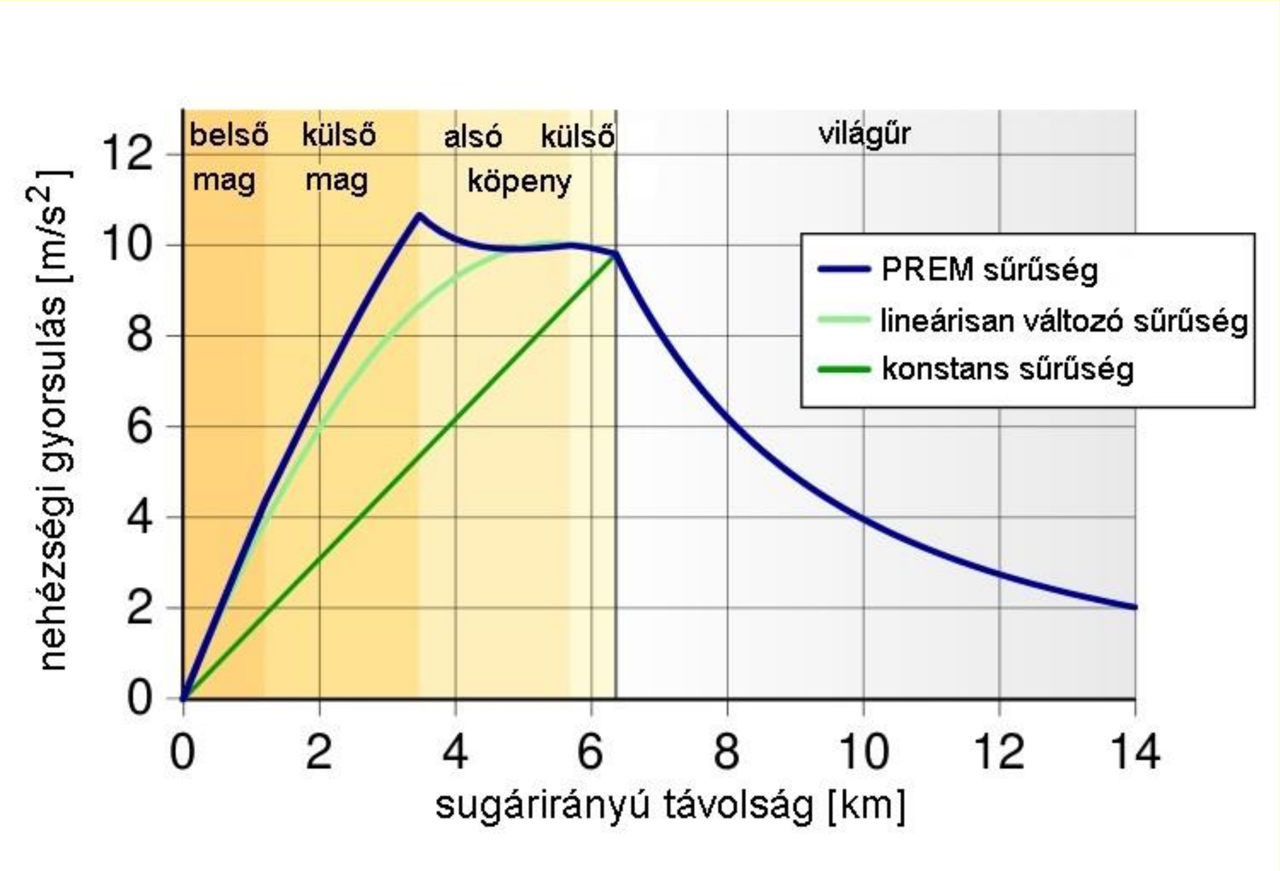



A Föld belsejére vonatkozó nehézségi gyorsulás számításakor azzal a közelítéssel élnek, hogy a Föld gömb alakú, és a sűrűségeloszlás gömbszimmetrikus, azaz csak a sugárirányú távolságtól függ (egydimenziós modell).

A sűrűségeloszlást a szeizmikus hullámutak és terjedési idők adatainak feldolgozása útján számítják.
Az ún. PERM modell (Preliminary Reference Earth Model, A. M. Dziewonski, D. L. Anderson,1981) a Föld fontosabb anyagi jellemzőinek egydimenziós eloszlását leíró modell (rugalmassági jellemzők, sűrűség, nyomás stb.).

https://en..wikipedia.org/wiki/Gravity_of_Earth#cite_note-prem-11

# A nehézségi gyorsulás alakulása a Föld belsejében, a PREM modell alapján




A PREM sűrűségeloszlás alapján számított nehézségi gyorsulás a Föld középpontjától kezdődő sugárirányú távolság függvényében.

https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_of_Earth#cite_note-prem-11

## Fontosabb témák, szakkifejezések jegyzéke

A gravitációs tér, a gravitációs tér forrása
A gravitációs kölcsönhatás és jellemzői jellemzői
A gravitációs mező jellemző tulajdonságai
Homogén összetételű, gömb alakú test gravitációs tere
gravitációs gyorsulás, mértékegységei
Gravitációs (v. tömegvonzási) potenciál függvény, mértékegysége
A gravitációs térerősség és a potenciál közötti kapcsolat
Ekvipotenciális felület (nívófelület), jellemzői
Homogén tömegeloszlású gömb gravitációs ekvipotenciális felületei
Homogén tömegeloszlású, tengelye körül állandó szögsebességgel forgó gömbalakú test felületén ható erők
Nehézségi erő, nehézségi gyorsulás, a földrajzi szélességtől függésük

## Fontosabb témák, szakkifejezések jegyzéke

A Föld normál alakja, normál nehézségi erőtér, normális nehézségi gyorsulás
Referencia ellipszoid, WGS84 modell
A geoid, helyi vízszintes sík és függőleges vonal, geoid unduláció, valóságos és elméleti függővonal, függővonal-elhajlás
A geoid unduláció jelentősége
Hogyan változik a nehézségi gyorsulás egy konstans sűrűségűnek feltételezett Föld modell esetében a Föld belseje felé?