

## A NEHÉZSÉGI ERŐTÉR IDŐBELI VÁLTOZÁSA

Földünk nehézségi erőtere három különböző erőhatás: a tömegvonzási erő, a forgási centrifugális erő és az árapálykeltő erők eredője. Bármely összetevő időbeli változása a nehézségi erőtér időbeli megváltozását eredményezi.

A nehézségi erőtér legismertebb és legfontosabb változása a Földön kívüli égitestek – elsősorban a Hold és a Nap – által okozott árapályhatás következménye. Az árapály sokfajta különböző periódusú és amplitúdójú hullámból tevődik össze és a nehézségi erőtér rövid periódusú változásait okozza.

Mivel a Föld tengely körüli forgásának szögsebessége nem egyenletes, ezért a centrifugális erő megváltozása miatt is változik a nehézségi erőtér. A forgási szögsebesség szekuláris, rövid periódusú (évszakos) és szabálytalan változásainak megfelelően beszélhetünk a nehézségi erőtér ennek megfelelő szekuláris, rövid periódusú és szabálytalan változásairól. A nehézségi erőtér ezen változásai a forgástengelytől mért távolság függvényei, ezért a Föld felszínén az egyenlítő mentén a legnagyobbak, ettől északra és délre haladva csökkennek, a pólusoknál pedig már nem észlelhetők.

A nehézségi erőtér domináns összetevője – a tömegvonzási erő – elsősorban az erőteret keltő tömegek átrendeződése miatt, és esetleg a gravitációs állandó értékének feltételezett csökkenése következtében változhat meg. Földünk külső részének tömegátrendeződési folyamatai jórészt közismertek (pl. a talajvízszint ingadozása, tektonikus mozgások, eróziós folyamatok, technogén hatások, meteorológiai folyamatok stb.); a Föld belsejében lejátszódó tömegátrendeződésekről azonban egyelőre még kevesebbet tudunk. Az átrendeződési folyamatokban résztvevő tömegek nagyságának, sűrűségviszonyainak és mozgási sebességének megfelelően kialakulhatnak a tömegvonzási, illetve a nehézségi erőtér helyi, regionális és globális változásai; a mozgások jellegének megfelelően pedig lehetnek szekuláris, rövidperiódusú és rendszertelen (egyszeri) változások.

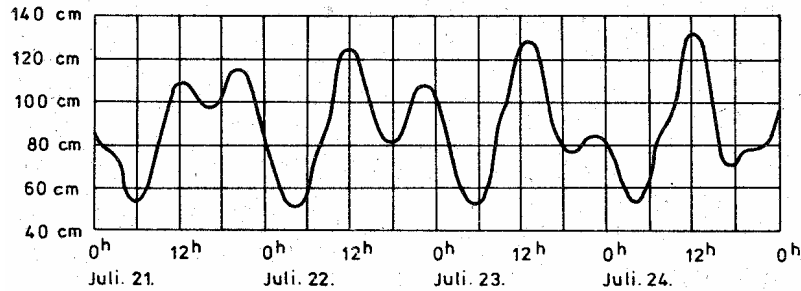
A nehézségi erőtér időbeli változásának vizsgálata a geodéziában azért rendkívül fontos, mert ez a Föld elméleti alakjának, a geoidnak az időbeli változását vonja maga után.

### A földi árapály

A tengerek régi idők óta megfigyelt jelensége a tengerszint szabályszerű változása: az *apály* és a *dagály* jelensége. A tengerszint emelkedése és csökkenése mintegy 12.5 órányi időközönként ismétlődik, így a legmagasabb szint, a dagály és a legalacsonyabb szint, az apály között kb. 6 és 1/4 órás időköz van. A földi árapályt elsősorban a Hold okozza, a Nap hatása ennek 50%-ánál is kisebb, a bolygók hatása pedig gyakorlatilag elhanyagolható. Újholdkor és holdtöltekor a Hold és a Nap hatása erősíti egymást – ekkor különlegesen nagy dagály, a *szökőár* jön létre; első és utolsó negyedkor viszont a hatások lerontják egymást – ez a *vakár*. A Hold és a Nap együttes hatása (a luniszoláris hatás) a tengereken elméletileg legfeljebb 50 cm-es vízszintingadozást eredményez. (Meg-

jegyezzük, hogy a tengerek egyes helyeken 10-20 métert is elérő dagályhullámai másodlagos jelenségek és keletkezésükhöz különleges partalakulat és mélységviszonyok szükségesek.)

A pontosabb vizsgálatok szerint az árapály jelenség igen bonyolult, mivel sokfajta különböző periódusú és amplitúdójú hullámból tevődik össze (1. ábra).



1. ábra. A tengerszint árapálymozgása

Ha az árapály időbeli alakulását műszerekkel folyamatosan regisztráljuk és így a folyamatát leíró  $f(t)$  függvényt tapasztalati úton meghatározzuk, akkor a harmonikus analízis módszerével az egyes összetevők – vagyis az árapály különböző hullámai – elkülöníthetők:

$$f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t + \varphi_i\right)$$

ahol  $A_i$  az egyes hullámok amplitúdója,  $T_i$  a hullámok periódusideje és  $\varphi_i$  a fázisuk. Jelenleg mintegy 370 különböző árapályhullámot tudunk azonosítani.

Egyszerűen kimutatható, hogy az árapály jelensége nem korlátozódik a tengerek víztömegére, hanem a Föld szilárd kérge is hasonló periódusos mozgást végez, csak kisebb amplitúdóval. Ezért a tengerek vízfelületének általunk észlelt árapály mozgása a vízszint mozgásának és a földkéreg elmozdulásának a különbsége.

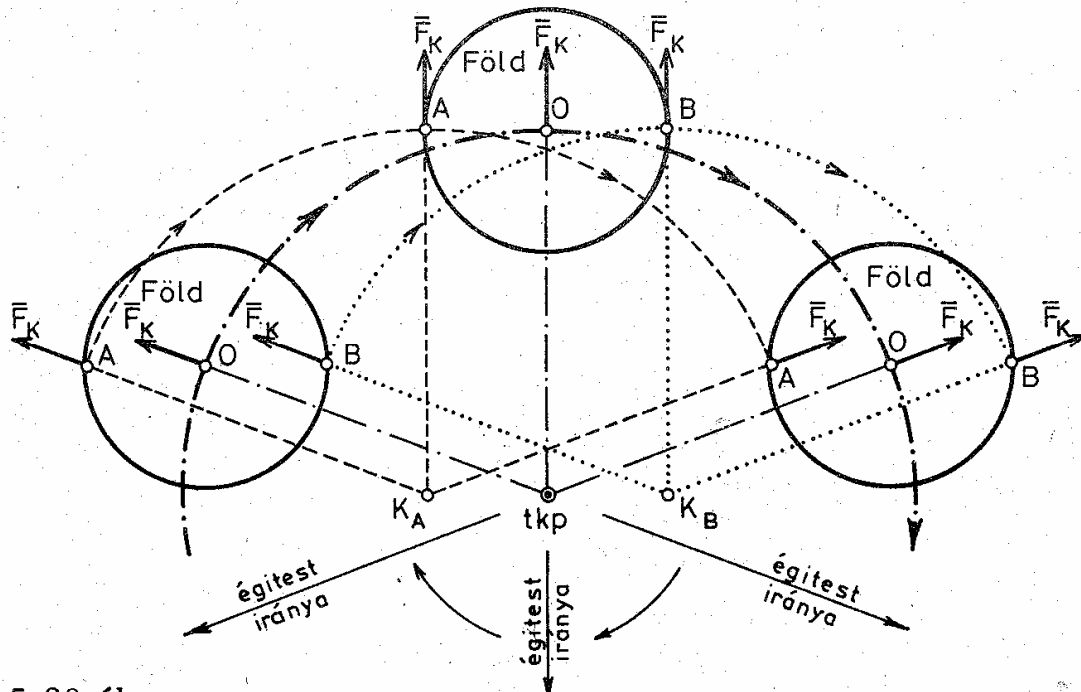
### Az árapálykeltő erő és potenciálja

Valamely égitest (pl. a Nap vagy a Hold) által okozott árapálykeltő erő az illető égitest és a Föld közös tömegközéppontja körüli keringésre vezethető vissza. Egyelőre csak egyetlen égitest hatását vizsgáljuk, több égitest esetén a hatások megfelelőképpen összegeződnek.

A Föld és valamely égitest közös tömegközéppontja körüli keringéskor kétféle erő játszik lényeges szerepet: az egyik a Föld és az égitest között fellépő tömegvonzási erő, a másik a keringés miatt fellépő centrifugális erő. A mechanika törvényei szerint egyensúly esetén a Föld tömegközéppontjában a kétfajta erő egymással egyenlő, de ellentétes irányú.

Vizsgáljuk meg, hogy mekkora e két erő a Föld többi pontjában!

Az égitest tömegvonzásából származó erő a Föld különböző pontjaiban eltérő nagyságú és irányú, mivel a vonzóerő az illető földi pontnak az égitest tömegközéppontjától mért távolságától és irányától függ.



2. ábra. A Föld keringéséből származó centrifugális erő

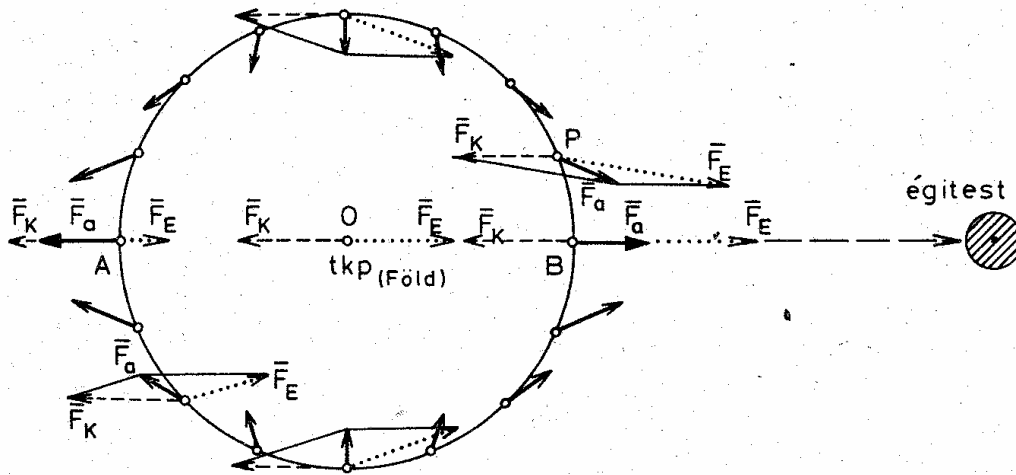
Ugyanakkor egyszerű belátni, hogy a közös tömegközéppont körüli keringésből származó centrifugális erő a Föld minden pontjában ugyanakkora. Ezt úgy érthetjük meg a legkönnyebben, ha eltekintünk a Föld tengelykörüli forgásától. Ekkor a Föld és az illető égitest a közös tömegközéppontjuk körül ún. excenter-mozgást végez. Az excenter-mozgás azt jelenti, hogy a Föld minden pontja (a 2. ábrán pl. az  $A$ ,  $B$ , és az  $O$  pont) azonos szögsebességgel azonos sugarú, de különböző ( $tkp.$ ,  $K_A$ ,  $K_B$  stb.) középpontú körökön úgy mozog, hogy eközben a térbeli irányítása nem változik meg; vagyis forgás nem következik be. Mivel a keringési centrifugális erő csak a pálya görbületétől, valamint a kérdéses pont szögsebességétől függ – és ezek az excenter-mozgás esetén minden pontban azonosak – ezért a Föld minden pontjában azonos nagyságú és irányú  $\mathbf{F}_K$  keringési centrifugális erő hat.

A Föld tetszőleges pontjában az  $\mathbf{F}_a$  árapálykeltő erő az adott égitest  $\mathbf{F}_E$  tömegvonzási erejének és a Föld  $\mathbf{F}_K$  keringési centrifugális erejének

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_K \quad (1)$$

vektori eredője. Ennek megfelelően az árapálykeltő erő földfelszíni eloszlása igen egyszerűen meghatározható; egyetlen égitest hatására a 3. ábrán látható erőrendszer alakul ki. Látható, hogy az  $O$  pontban  $\mathbf{F}_E = -\mathbf{F}_K$ , a Földnek az égitest felőli oldalán (pl. a  $B$  pontban)  $|\mathbf{F}_E| > |\mathbf{F}_K|$  míg az átellenes oldalon (pl. az  $A$  pontban)  $|\mathbf{F}_K| > |\mathbf{F}_E|$ . Ez magya-

rázza, hogy miért alakul ki egyetlen égitest hatására is a Föld két átellenes oldalán egyszerre dagály és rá merőlegesen apály.



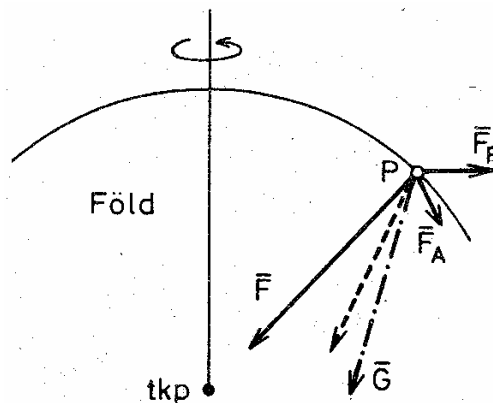
3. ábra. Az árapálykeltő erők meghatározása

Több vonzó égitest esetén az egyes égitestek által okozott  $\mathbf{F}_a$  árapálykeltő erők vektori eredője adja a teljes  $\mathbf{F}_A$  árapálykeltő erőrendszert:

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_a^H + \mathbf{F}_a^N + \mathbf{F}_a^{(bolygók)} \quad (2)$$

ahol  $\mathbf{F}_a^H$  a Hold és a  $\mathbf{F}_a^N$  a Nap hatását jelöli.

A Föld tengely körüli forgásának figyelembevétele az eddigieken csupán annyit változtat, hogy a Föld és az égitest tömegközéppontjához rögzített koordináta-rendszerben meghatározott árapálykeltő erők a forgás miatt minden időpillanatban a Földnek más-más pontjaira hatnak.



4. ábra. A nehézségi erő összetevői

Tetszőlegesen kiválasztott  $P$  földfelszíni pontban adott tömegelemre a 4. ábrán látható erők hatnak. Szaggatott vonallal az  $\mathbf{F}$  tömegvonzási és az  $\mathbf{F}_F$  forgási centrifugális erőnek az eredőjét, azaz a luniszoláris hatás nélkül számított nehézségi erő vektorát ábrázoltuk. Ennek és az időben gyorsan változó  $\mathbf{F}_A$  árapálykeltő erőnek az eredője adja a

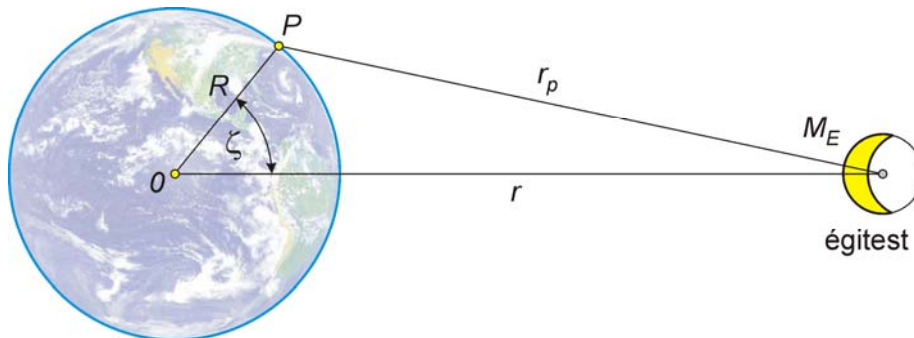
tényleges nehézségi erő (a  $\mathbf{G}$  súlyerő) vektorát. Az égitestek (elsősorban a Hold és a Nap) hatására tehát a földi nehézségi erőtérenk mind az iránya, mind a nagysága az időben folyamatosan változik.

Számítsuk ki ezek után az  $M_E$  tömegű égitest (a Hold, illetve a Nap) hatásából származó potenciált, vagyis az  $\mathbf{F}_a$  árapálykeltő erő  $V_a$  potenciálját! Tekintve, hogy az árapálykeltő erő az (1) szerint két erőhatás eredője, ennek  $V_a$  potenciálja is a két erő potenciáljának összegeként számítható:

$$V_a = V_E + V_K. \quad (3)$$

Az égitest vonzási potenciálja az 5. ábrán látható tetszőleges  $P$  földfelszíni pontban, az égitesttől  $r_p$  távolságban:

$$V_E = k \frac{M_E}{r_p}. \quad (4)$$



5. ábra. Az árapálykeltő égitest helyzetének jellemzése

Mivel a Föld tömegközéppontjában (az  $O$  pontban) az  $\mathbf{F}_K$  keringési centrifugális erő nagyságra éppen egyenlő az égitestnek az  $O$  pontra vonatkozó  $\mathbf{F}_E$  vonzóerejével, ezért az  $O$  pontban:

$$\mathbf{F}_K = -\mathbf{F}_E = -k \frac{M_E}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}.$$

Ennek megfelelően a keringési centrifugális erő potenciálja a Föld  $O$  tömegközéppontjában:

$$V_K^{(O)} = -k \frac{M_E}{r}. \quad (5)$$

Nekünk azonban nem az  $O$ , hanem a  $P$  pontban kell a potenciál; ezért ahhoz, hogy az  $\mathbf{F}_K$  erőnek a  $P$  pontra vonatkozó potenciálját megkapjuk, figyelembe kell még venni az  $\mathbf{F}_K$  erőnek az  $\overline{OP}$  úton végzett

$$F_K R \cos \zeta = -k \frac{M_E}{r^2} R \cos \zeta$$

munkáját és hozzá kell adnunk az (5)-höz. Így végül is a  $P$  pontban a keringési centrifugális erő potenciálja:

$$V_K = -k \frac{M_E}{r} \left( 1 + \frac{R}{r} \cos \zeta \right). \quad (6)$$

Végeredményben tehát az árapálykeltő erő potenciálja a  $P$  pontban a (3), (4) és (6) szerint:

$$V_a = k \frac{M_E}{r_p} - k \frac{M_E}{r} \left( 1 + \frac{R}{r} \cos \zeta \right)$$

vagy átrendezve:

$$V_a = k \frac{M_E}{r} \left( \frac{r}{r_p} - 1 - \frac{R}{r} \cos \zeta \right). \quad (7)$$

Próbáljuk meg ebben a kifejezésben az  $r/r_p$  értékét más formában felírni. Ehhez fejezzük ki az  $r_p$  értékét az 5. ábra alapján az  $OPM_E$  háromszögből a cosinustétel segítségével:

$$r_p^2 = R^2 + r^2 - 2Rr \cos \zeta$$

Ezt  $1/r^2$  -tel végigszorozva és átrendezve:

$$\frac{r_p^2}{r^2} = 1 - 2 \left( \frac{R}{r} \right) \cos \zeta + \left( \frac{R}{r} \right)^2.$$

Ha mindkét oldalból négyzetgyököt vonunk és a reciprokát vesszük, akkor

$$\frac{r}{r_p} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \left( \frac{R}{r} \right) \cos \zeta + \left( \frac{R}{r} \right)^2}}.$$

Így az  $r/r_p$  már felírható a Legendre-polinomok segítségével:

$$\frac{r}{r_p} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \left( \frac{R}{r} \right) \cos \zeta + \left( \frac{R}{r} \right)^2}} = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{R}{r} \right)^n P_n(\cos \zeta).$$

A  $P_n(t)$  Legendre polinomok (itt:  $t = \cos \zeta$ ) a már korábban megismert Rodrigues-képlettel állíthatók elő. Az alacsonyabb fokszámú tagok:

$$\begin{aligned} P_0(\cos \zeta) &= 1 \\ P_1(\cos \zeta) &= \cos \zeta \\ P_2(\cos \zeta) &= \frac{3}{2} \cos^2 \zeta - \frac{1}{2} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Ha csupán az  $n = 0, 1, 2$  tagokat vesszük, figyelembe, akkor

$$\frac{r}{r_P} = 1 + \frac{R}{r} \cos \zeta + \left(\frac{R}{r}\right)^2 \left(\frac{3}{2} \cos^2 \zeta - \frac{1}{2}\right) + \dots$$

Ezt a (7)-be helyettesítve:

$$V_a = kM_E \frac{R^2}{r^3} \left(\frac{3}{2} \cos^2 \zeta - \frac{1}{2}\right) + \dots \quad (8)$$

Ez tehát az  $r$  távolságban levő  $M_E$  tömegű égitest által okozott árapálykeltő erő potenciálja az 5. ábra értelmezése szerint a földfelszín tetszőleges  $P$  pontjában.

Valamennyi égitest hatását figyelembe véve:

$$V_A = V_a^H + V_a^N + V_a^{(bolygók)}. \quad (9)$$

A földi árapály kialakítása szempontjából legfontosabb égitestek adatai:

$$\begin{aligned} r_H &= 3.8444 \cdot 10^8 \text{ m} \\ M_H &= 7.35 \cdot 10^{22} \text{ kg} \\ r_N &= (1.471 - 1.521) \cdot 10^{11} \text{ m} \\ M_N &= 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}. \end{aligned}$$

Ennek megfelelően a  $\zeta = 0^\circ$  vagy a  $\zeta = 180^\circ$  esetében, – tehát a Földnek a vonzó égitesthez legközelebb és legtávolabb levő pontjában:

$$\begin{aligned} V_a^H &= 3.50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \\ V_a^N &= 1.53 - 1.69 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}. \end{aligned}$$

A nagyságrendi tájékozódás kedvéért megemlítjük, hogy a földi tömegvonzás potenciálja valamely földfelszíni pontban:

$$V = 6.26 \cdot 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}.$$

Ehhez képest a bolygók hatása elenyésző, ugyanis az árapály szempontjából legjelentősebb bolygók, a Vénusz és a Jupiter a Földközelen belül legfeljebb

$$\begin{aligned} V_a^{(Vénusz)} &= 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \\ V_a^{(Jupiter)} &= 2.1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \end{aligned}$$

potenciálváltozást okoznak.

## A rugalmas földtömeg árapályja

Az árapály jelensége nem csupán az óceánok és tengerek víztömegére hat, hanem a földtömeg rugalmassága miatt a teljes Föld tömege részt vesz az árapálymozgásban. A rugalmas földtömeg árapályja meglehetősen bonyolult, tárgyalása az Msc. Geofizika tanfolyamon kerül sorra. A földtömeg rugalmassága miatt a tengerpartokon megfigyelhető

árapálymozgást a valóságban úgy kell elképzelni, hogy a vízfelszín nem a nyugalomban lévő parthoz képest végzi az emelkedő és a süllyedő mozgását, hanem mivel maguk a kőzetek is ugyanabban az ütemben de kisebb amplitúdával vesznek részt az árapálymozgásban, ezért a parthoz viszonyított vízmozgás valójában a két mozgás különbsége. A valódi Föld esetében az árapálykeltő erő hatására az alakváltozás mértéke a földtömeg rugalmasságának fokától függ..

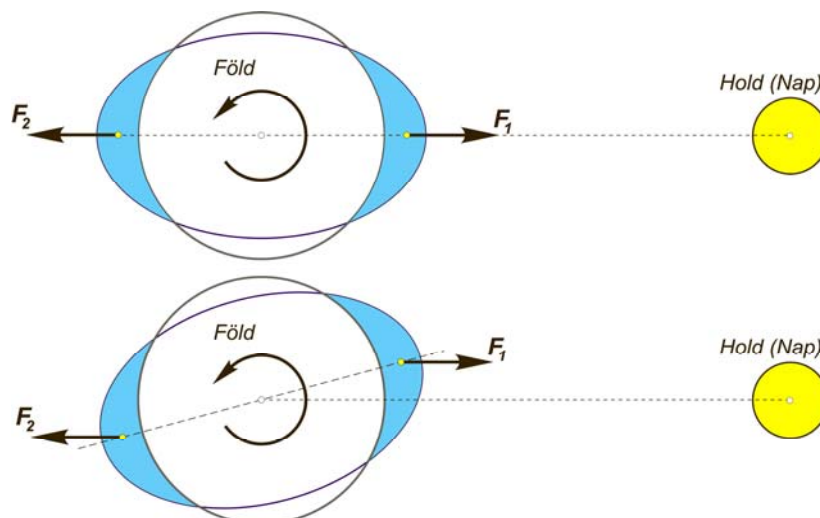
## A Föld forgási szögsebességének változása

A nehézségi erőnek nemcsak a Newton-féle tömegvonzásból származó része változhat az időben, hanem megváltozhat a forgási centrifugális erő is, ami a tengely körüli forgás szögsebességének megváltozásából ered. A szögsebesség időbeli változásának mértéke az

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varepsilon}{dt^2}$$

szöggyorsulással írható le; ahol  $\omega$  a forgási szögsebesség,  $\varepsilon$  pedig az elfordulás szöge.

A Föld forgási szögsebességének lehet szekuláris (paleoszekuláris), rövid periódusú és hirtelen bekövetkező, szabálytalan változása.



7. ábra. Az árapálysúrlódás kialakulása

A *szekuláris változás* az ún. *árapálysúrlódás* miatt lép fel. A tengerek, az atmoszféra és a rugalmas földtömeg árapályhulláma az elmozduló tömegek részecskéinek sűrűdése és tehetetlensége miatt késik, vagyis a Földnek az a meridiánja, amelyikben a dagályhullám maximuma bekövetkezik, időközben már elfordul a vonzó égitest (a Hold vagy a Nap) irányától. A 7. ábra felső részén a súrlódásmentesség feltételezése mellett Föld esete, alatta pedig a valódi állapot látható. Az ábra szerint a dagálypúpok tömegére ható  $F_1$  és  $F_2$  erő forgatónyomatéka a forgást gátolni igyekszik. A forgássebesség csökkenése igen lassú, csillagászati megfigyelések alapján:



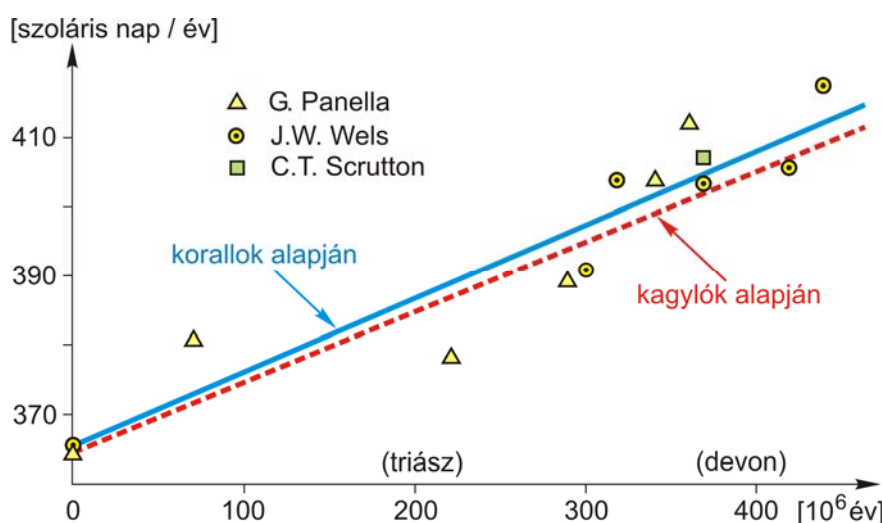
$$\dot{\omega} = -(5.2 \pm 0.5) \cdot 10^{-22} s^{-2}.$$

(Ennek megfelelően kiszámítható, hogy a nagyon pontosan járó atomórák jelenleg egy év alatt kb. 0,0035 másodperccel sietnek azokhoz az órákhoz képest, amelyeket a Föld forgásához igazítunk.)

A Föld forgássebességének szekuláris lassulását újabban geológiai bizonyítékokkal is sikerült alátámasztani és a földtörténeti korokra is kiterjeszteni. Erre egyes ősmaradványok vizsgálata nyújt lehetőséget. A melegvizű tengerekben élő bizonyos korallok és kagylók naponta mikroszkopikus vastagságú mészréteget választanak ki. A mészrétegek vastagsága az adott élőlények életkörülményeitől függ: melegebb időben a gyorsabb életműködés miatt vastagabb, hidegebb időben vékonyabb mészréteget fejlesztenek. Az ősi korallok és kagylók nap-, illetve évgűrűi alapján (a mészlemezek vastagságának periodikus változásából) az évek napjainak száma megállapítható. Néhány fontosabb vizsgálat eredményeit a 8. ábrán láthatjuk. Eszerint 200 millió évvel ezelőtt, vagyis a *triászban* az év napjainak száma kb. 380-390, míg kb. 400 millió évvel ezelőtt, a *devon* kor elején már 400-410 nap körül volt. A Föld tehát a régebbi korokban a mainál lényegesen gyorsabban forgott. A vizsgálatok szerint a forgási szögsebesség csökkenése az egész óriási időközben egyenletesnek tekinthető és a csillagászati megfigyelésekkel jó összhangban:

$$\dot{\omega} = -(5.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-22} s^{-2}$$

A Föld szögsebességének vannak *rövid periódusú* és hirtelen bekövetkező, *szabálytalan* változásai is. Ezeket a változásokat nagyon pontosan és egyenletesen járó atomórákkal lehet kimutatni úgy, hogy az általuk mutatott óraidőt összehasonlítjuk a csillagászati időmeghatározások eredményeivel, amelyek természetesen a Föld forgási sebességének ingadozásait is tartalmazzák. A vizsgálatok alapján négy jól elkülöníthető rövid periódusú változás mutatható ki: a kétéves periódusú kb. 9 msec amplitúdójú változás, az éves periódusú kb. 20-25 msec amplitúdójú-, a féléves kb. 9 msec amplitúdójú-, valamint a hónapos és a kéthetes periódusú kb. 2 msec amplitúdójú változás. Ezek közül az éves periódusú változás amplitúdója a legnagyobb, amelynek okát a (6.4) szerint a Föld tehetlenségi nyomatékának évszakos megváltozásában kereshetjük.



8. ábra. A napok évenkénti számának változása

A Föld tehetetlenségi nyomatókának évszakos ingadozásában olyan okok játszhatnak szerepet, mint pl. télen a hőtömegek megjelenése és eltűnése, nyáron a növényzet vegetációja (lombosodás és lombhullatás) stb.

A Föld forgási szögsebességének szabálytalan változásai markánsabban jelentkeznek; ezek elérhetik az  $\dot{\omega} = \pm 10^{-20} s^{-2}$  nagyságrendet, sőt az ugrásszerű, hirtelen változások akár  $\dot{\omega} = \pm 10^{-19} s^{-2}$  nagyságúak is lehetnek. Ezen változások valamennyi okát még nem ismerjük pontosan, de feltehetően nagy szerepet játszanak a különböző meteorológiai folyamatok, valamint az árapálykeltő és az egyéb erők hatására a Föld belső szerkezetében bekövetkező változások.

A tengelykörüli forgási szögsebesség változásának geodéziai szempontból első sorban azért van jelentősége, mivel a centrifugális erő megváltozása miatt a szintfelületek – tehát a Föld alakja is – időben változik. Ez a földtörténeti korok alatt a Föld lapultságának számottevő változását jelentheti. Emellett fontos tudni, hogy ha az időméréseinket a Föld forgásához kötjük, akkor ezáltal a földrajzi helymeghatározásainkban jelentős hiba léphet fel: a változásoknak megfelelően változnak a különböző időpontokban meghatározott szintfelületi koordináták; főleg a szintfelületi hosszúság értékek. – Ennek megfelelően ma már az idő mérését pontosabban és egyenletesebben ismétlődő jelenségekhez (pl. különféle atomórák járásához) kötjük.

## A Föld tömegátrendeződései

Korábban már láttuk, hogy a Földünk legkülső övében, a földkéregben a kőzetek sűrűségviszonyai térben gyorsan és szabálytalanul változnak. (A geofizikusok a gravitációs kutatómódszerekkel éppen ezeket a sűrűség-inhomogenitásokat igyekeznek felderíteni pl. a különféle ásványi nyersanyagok kutatása céljából.) A Föld anyagának sűrűségeloszlása nagyobb mélységekben sem homogén; a sűrűség a mélység függvényében is változik. A pontosabb vizsgálatok szerint azonban a gömbhéjanként homogén sűrűségeloszlás is csak közelítés, mivel a Föld belsejében vízszintes irányú inhomogenitások is léteznek.

A Föld nehézségi erőtere és ezen erőter potenciáljának szintfelületei a Föld adott sűrűségeloszlásának megfelelően alakulnak ki. Ezért nyilvánvaló, hogy a Földben bármiféle *tömegátrendeződés hatására* az eredeti sűrűségeloszlás megváltozása miatt *megváltozik a nehézségi erőter és ennek potenciálja is*.

Az okozott hatás kiterjedése szerint megkülönböztethetünk kis területekre kiterjedő lokális változásokat, nagy területeken érvényesülő regionális változásokat és az egész Földön tapasztalható globális változásokat.

A nehézségi erőter *lokális* változásait első sorban különböző helyi geológiai folyamatok (pl. kőzetkompakció, erózió stb.), a talajvízszint ingadozása és az ún. technogén hatások, vagyis az emberek által előidézett tömegátrendeződési folyamatok okozzák. Ilyen technogén hatások pl. a szilárd és a folyékony ásványi nyersanyagok kitermelése, óriási víztároló medencék és duzzasztó gátak létrehozása, hatalmas városok felépítése stb.

A nehézségi erőter *regionális* változásait a nagyobb területekre kiterjedő geológiai folyamatok és különféle tektonikus mozgások okozzák. Ilyenek pl. a vulkáni működések

során fellépő anyagáramlások, a nagy üledékgyűjtő medencékben az üledékes kőzetek képződése, a korábban megismert izosztatikussal kapcsolatos vertikális kéregmozgások, hegységek képződése stb.

A nehézségi erőternek az egész Földön tapasztalható *globális* változásait részben a Föld nagy szerkezeti egységeinek elmozdulásai (a globális tektonikai mozgások: a kontinensek vándorlása, az óceánfenék széttolódása), részben globális meteorológiai folyamatok idézhetik elő. (A globális tektonikai mozgásokkal a későbbiekben még részletesen foglalkozunk.) Az utóbbi idők vizsgálatai alapján a Föld belsejében is feltételezhetők tömegátrendeződések, ezért a nehézségi erőternek további globális változásai is lehetnek, amelyek mértéke akár nagyságrenddel is felülmúlhatja az eddig említetteket és hatásuk meghaladhatja az időközben rohamosan fejlődő mérési pontosságot.

Korábban már láttuk, hogy a földköpenyben levő hőmérsékletkülönbségek a felső köpenyben különböző irányú anyagáramlások előidézői lehetnek, sőt a későbbiekben azt is látni fogjuk, hogy a földkéreggel együtt a felső köpeny egy része is részt vesz a Föld globális tektonikai folyamataiban.