

## 1.6 A földmágneses tér időbeli változása

A földmágneses tér elemei nemcsak a helynek, hanem az időnek is a függvényei. A tapasztalatok szerint a mágneses tér időben minden más földfizikai erőtérenél gyorsabban változik. Ezért a Föld mágneses terének leírására csak ugyanazon időpontra (*epochára*) vonatkozó adatokat használhatjuk fel. Ez a magyarázata, hogy az eddigiekben a Föld mágneses terére vonatkozó számértékek megemlékezésekor minden esetben megadtuk azt az időpontot is, amelyre az adatok vonatkoztak. A változásokban sokféle hatás együttesen nyilvánul meg, ezek közül egyesek periódusos, mások nemperiódusos jellegűek.

A változások lefolyását tekintve megkülönböztethetünk:

1. rövid idejű (másodpercestől néhány napos periódusú),
2. évszázados, vagy szekuláris (néhány évestől néhány száz éves időtartamú),
3. és ún. paleoszekuláris (a földtörténeti korokra kiterjedő) változásokat.

A rövid idejű és a szekuláris változásokat a földmágneses obszervatóriumok folyamatos műszeres regisztrálása alapján elemezhetjük. Általában a mágneses térerősség vektorának három független komponensét regisztrálják. Már korábban láttuk, hogy három független térerősség összetevő egyértelműen jellemzi a mágneses teret, belőlük a többi mágneses elem kiszámítható. Magyarországon régebben Ógyallán majd Budakeszin, jelenleg pedig Tihanyban és Nagycenken folyik a mágneses elemek folyamatos regisztrálása. A regisztrált mágneses elemek a deklináció, valamint a térerősség vízszintes és függőleges összetevője.

A paleoszekuláris változások tanulmányozásának alapját a kőzetek ún. remanens mágnesezettsége szolgáltatja.

### 1.6.1 A földmágneses tér rövid idejű változásai

A föld mágneses tere felfogható, mint egy stacionárius (állandó jellegű) és egy változó mágneses tér szuperpozíciója, azaz a Föld stacionárius mágneses terére ún. földmágneses variációk tevődnek rá. A variációs tér nagyságrendekkel kisebb, mint a stacionárius tér.

Ha az egyes obszervatóriumok által regisztrált magnetogramokat (az egyes mágneses elemek időbeli változását leíró görbéket) megvizsgáljuk, akkor azt tapasztaljuk, hogy bizonyos napokon a mágneses elemek ugyanúgy periódusosan változnak mint pl. a hőmérséklet, vagy a légnyomás; más esetekben viszont ezek alig, vagy egyáltalán nem ismerhetők fel. Az első esetben nyugodt napi variációkról, a második esetben mágneses háborgásokról beszélünk.

### 1.6.1.1 A mágneses karakterszámok

Az egyes napok, illetve napnál rövidebb vagy hosszabb időszakok háborgatottsági fokát a mágneses aktivitással, vagy mágneses háborgatottsággal jellemzik.

A mágneses aktivitás helyi (egy obszervatóriumra vonatkozó) jellemzője a *helyi C karakterszám*. Az olyan napokat, amelyeken a szabályos napi változás mentes minden zavartól  $C=0$ -val, amelyeken a zavartság már jól észlelhető, de a napi menet még felismerhető  $C=1$ -gyel, végül azokat, amelyeken a napi menet a zavarok miatt már nem ismerhető fel  $C=2$ -vel jelöljük.

A helyi hatások és az önkényesség kiküszöbölése céljából a hollandiai de Bilt obszervatórium összegyűjti mintegy 50 földmágneses obszervatórium ugyanazon napra vonatkozó karakterszámait és ezek középértékét képezve megállapítják a *nemzetközi  $C_i$  karakterszámokat*, amelyeket egy tizedesre adnak meg. A  $C_i$  karakterszámok alapján választhatók ki a hónap nemzetközileg nyugodt, illetve háborgatott napjai. Megfigyelhető, hogy a nagy  $C_i$ -jű napok az egész Földön háborgatottak, a ki  $C_i$ -jű napok pedig mindenütt nyugodtak.

1.1 táblázat. Variációs amplitúdók és K-indexek a niemeck-i obszervatóriumra

amplitúdó [nT]	K-index
0 - 4	0
5 - 9	1
10 - 19	2
20 - 39	3
40 - 69	4
70 - 119	5
120 - 199	6
200 - 329	7
330 - 499	8
> 500	9

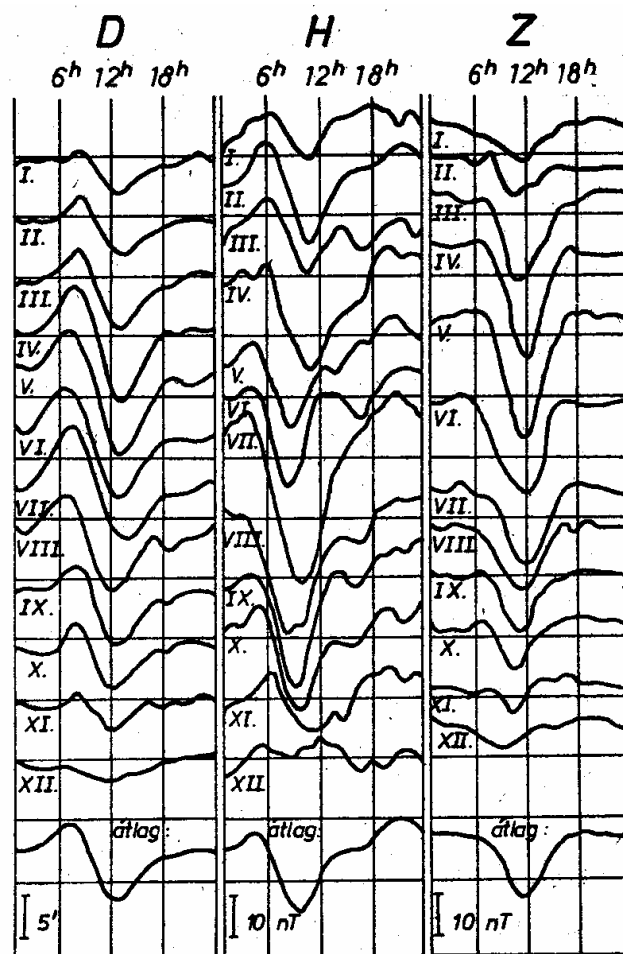
A napszél által létrehozott variációk aktivitásának jellemzésére szolgál a *háromórás K-index*, amelyet obszervatóriumonként állapítanak meg, három órás intervallumonként a leginkább háborgatott földmágneses elem amplitúdójának lemerésével. A kapott amplitúdó értékből a megfelelő nyugodt napi értéket levonják. A K-index 0-tól 9-ig terjedő egész értékeket vehet fel. Például a niemeck-i obszervatóriumra vonatkozó variációs amplitúdók és K-indexek az 1.1 táblázatban láthatók. A háborgatottság foka más-más földmágneses szélességeken különböző, ezért a szélességi hatás kiküszöbölése miatt minden obszervatórium maga választja meg a hozzátartozó K-index skálát 0-tól 9-ig, az előforduló legkisebb és legnagyobb amplitúdónak megfelelően. 12 alkalmasan kiválasztott obszervatórium K-indexeinek középértékéből áll elő a *planetáris K-index*, amelynek 28 lehetséges értéke van.

A mágneses aktivitás fokának megállapítására bevezetett mennyiségek, a földmágneses variációk és más fizikai jelenségek (naptevékenység, sarki fény, tellurikus áramok stb.) kapcsolatainak felismerésében, illetve analizisében szolgálnak hasznos segítséget.

### 1.6.1.2 Nyugodt napi variációk

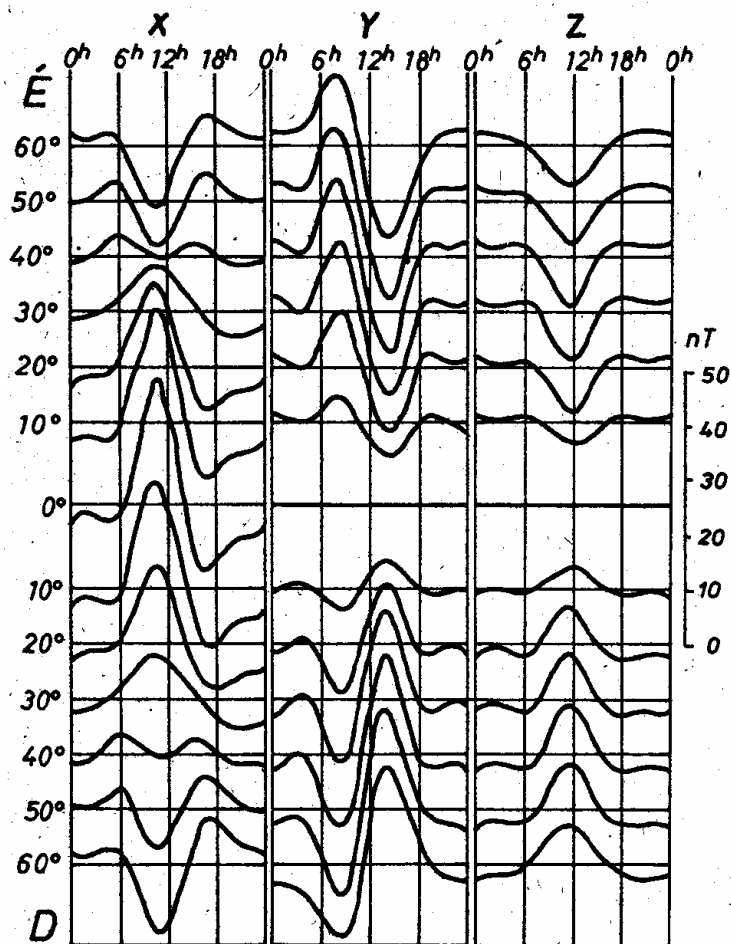
A mágneses szempontból nyugodt napokon a földmágneses elemek obszervatóriumi regisztrátumain jellegzetes napi menet figyelhető meg. Az 1.12 ábrán a D, H és a Z mágneses elemek napi változásai láthatók 1950 különböző hónapjaiban a Budakeszi Obszervatóriumban. A kisebb zavarok hatásainak csökkentése céljából a havonkénti legcsendesebb 5 nap átlagos változását fogadták el az illető mágneses elem nyugodt napi variációjának [7].

Az ábra megszemlélésekor feltűnő, hogy a napi menet jellege az évszaktól függ. Az átlagos napi változás a deklinációban 5-20 perc, a vízszintes és a függőleges összetevőben 10-40 nT.



1.12 ábra. A mágneses elemek napi változása Budakeszin

Az 1.12 ábra alsó részén látható görbék az egyes mágneses elemek változásának éves középértékét mutatják. Megfigyelhető, hogy a deklinációnak Budakeszin közép-európai időben 9 órakor maximuma és 12 óra körül minimuma van. A vízszintes összetevőnek 5-6 óra körül van maximuma és 11 órakor minimuma, majd 17 óra körül a reggelineél kissé magasabb, újabb maximumot ér el. A függőleges összetevő görbéje éjjel egy átlagszintet vesz fel, ebből kiindulva 7 óra körül csökkenni kezd, a legkisebb értéket 12 óra tájban éri el, ezután 18 óráig emelkedik és ott eléri az átlagos éjszakai szintet, ami másnap reggelig közel azonos szinten marad.



1.13 ábra. A mágneses elemek napi változásának szélességfüggése

A jelenségnek az egész Földre kiterjedő analízise alapján azonban azt tapasztaljuk, hogy az átlagos napi menet a helyi időn kívül a földrajzi szélességnek is függvénye. A különböző szélességeknek megfelelő normális változást az 1.13 ábrán mutatjuk be. Látható, hogy a mágneses térerősség északi  $X$  összetevőjének az egyenlítő körül és a sarkokon legnagyobb, míg  $45^\circ$  szélességek körül legkisebb a változása. Az  $Y$  keleti összetevő változása – amely főként a deklináció megváltozását eredményezi – az egyenlítőnél minimális és a sarkok felé növekedő tendenciájú, de a két féltekén ellentétes irányú. A  $Z$  függőleges összetevő a legerőteljesebben a  $45^\circ$  szélesség körül változik és szimmetrikus az egyenlítőre.

A változások görbéinek alaposabb vizsgálata alapján feltűnő, hogy az egyes napok kezdeti és végső (0 órai és 24 órai) adatai között eltéréseket találunk, amelyek hosszabb időn keresztül állandó jellegűek. Ennek egyik oka, hogy a nyugodt napok tartalmazhatják a háborgások utóhatásait, mivel a mágneses tér csak lassan tér vissza eredeti állapotába. Emellett az évszázados változások is okozzák a napi változások lassú, állandó jellegű eltolódását, ez azonban az előbbinél sokkal egyenletesebb és csekélyebb mértékű. Valójában ezeknek az állandó jellegű hatásoknak a kiküszöbölése után kapjuk meg a mágneses elemek valódi nyugodt napi variációját.

Végül megemlítjük, hogy a mágneses elemek variációjának nemcsak a Nap által okozott napi, hanem a Hold által okozott holdnapi (24 óra 50.5 perces) periódusa is van. Ennek az amplitúdója azonban a nyugodt napi menet amplitúdójának alig 1/15-öd része.

### 1.6.1.3 A földmágneses tér háborgásai

A magnetogramokon megjelenő szabályos napi változásoktól eltérő mágneses zavarokat összefoglalóan mágneses háborgásoknak nevezzük.

Ezeknek a háborgásoknak a tartama néhány perctől néhány napig terjed. A K-indexek alapján kimutatható, hogy a mágneses háborgások 27 napos ismétlődési hajlamot mutatnak, ami a Nap tengely körüli forgásával és a napfolttevékenységgel kapcsolatos.

A földi mágneses tér háborgásait időtartamuk, intenzitásuk és lefolyásuk alapján osztályozzuk. Így megkülönböztetünk: pulzációt, öbölháborgást és mágneses vihart.

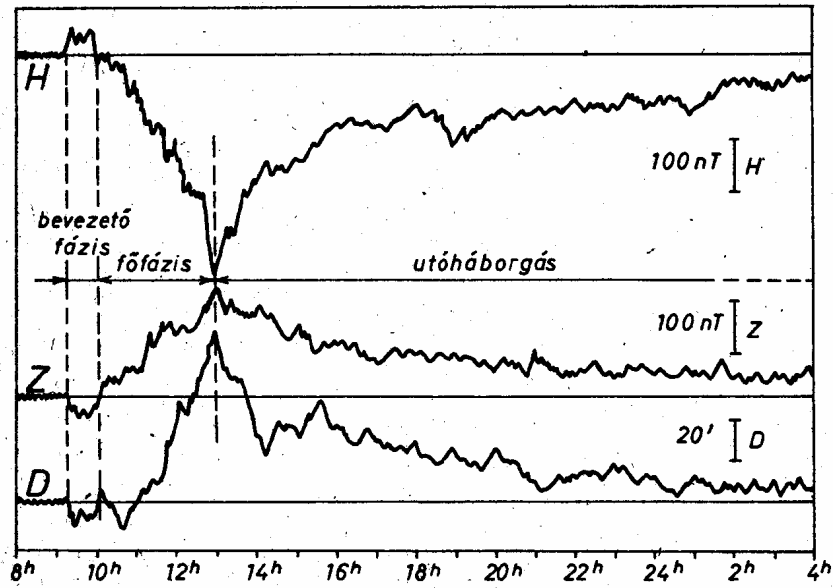
A **pulzáció** a földmágneses térnek néhány perc periódusú általában 10 nT-nál kisebb amplitúdójú szabályos szinuszhullám szerű lüktetése. A pulzációk leggyakrabban éjfél tájban lépnek fel, gyakoriságuknak délben gyenge másodlagos maximuma van. Amplitúdójuk az éjjeli oldalon nagyobb, mint a nappalin; a változás sokszor igen távoli obszervatóriumokban egyidejűen jelentkezik. Fellépésük a mágneses háborgásokkal kapcsolatban gyakori.

Az **öbölháborgás** a mágneses térnek néhány órás időtartamú 100 nT-nál kisebb amplitúdójú helyi jellegű változása. Nevét onnan kapta, hogy a magnetogramokon egyoldalú kiöblösödés formájában jelentkezik úgy, hogy a mágneses elemek értéke fokozatosan nő, vagy csökken egy szélső értékig, majd fokozatosan visszatér az eredeti normális értékhez. Egyes öbölháborgások több napon át ugyanabban az időben jelentkezők. A visszatérési hajlam télen nagyobb mint nyáron és gyakoriságukban a 27 napos periódus is megállapítható. Az öbölháborgások a magasabb szélességeken és éjjel erősebbek. Mindebből arra lehet következtetni, hogy az öbölháborgásokat a Nap korpuszkuláris sugárzásával és az ionoszférában levő áramlásokkal hozhatjuk kapcsolatba. - Ezekkel a későbbiekben még foglalkozunk.

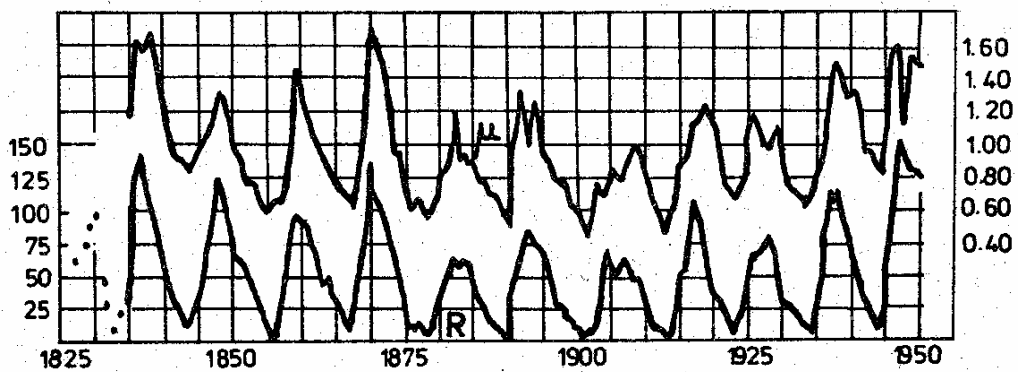
A **mágneses vihar** a mágneses elemek viszonylag hosszú ideig (néhány napig) tartó nagy változásokban megnyilvánuló háborgása. Amplitúdójuk több 100 nT nagyságrendű, esetleg 1000 nT is lehet. Rendszerint nyugodt mágneses állapotból az egész Földön egy időben, robbanásszerűen törnek ki. A mágneses vihar magnetogramja a mágneses vektor gyors, látszólag szabálytalan lüktetését jelzi. Figyelmesebb vizsgálattal azonban megállapítható, hogy ennek is jellegzetes menete van és három jól elkülöníthető fázisból áll. Ezek: a bevezető fázis, a fő fázis és az utóháborgás (a megszűnési fázis). – Például egy világméretű mágneses vihar esetén a *bevezető fázis* során a mágneses térerősség vektor vízszintes összetevője hirtelen megnövekedik. A növekedés 10 percen belül véget ér és bizonyos ideig nem jelentkezik számottevő változás. Ez a "csendes" kezdeti fázis kb. 20 percig, de legfeljebb néhány óráig tart. A vihar *fő fázisában* a vízszintes összetevő nagysága fokozatosan csökkenni kezd és kb. 6-12 órán keresztül mélyen a normális érték alá esik. Az *utóháborgás* során a mágneses elemek kezdetben gyorsan, majd egyre lassabban visszatérnek a normális értékhez. Ennek az időtartama több nap, esetleg néhány hét is lehet.

Az 1.14 ábrán egy tipikus magyarországi mágneses vihar lefolyását mutatjuk be. A részletesen ismertetett vízszintes térerősség változásán kívül a függőleges térerősség és a deklináció változása is látható.

A földmágneses tér háborgásainak gyakoriságát vizsgálva szoros korreláció adódik a háborgások és a napfolttevékenység között. Az 1.15 ábrán a mágneses aktivitást jellemző m index és az R relatív napfoltszám összefüggését láthatjuk [46].



1.14 ábra. Tipikus mágneses háborgás Magyarországon



1.15 ábra. A háborgások gyakoriságának kapcsolata a naptevékenységgel

Megállapítható, hogy napfoltmaximum idején a háborgások gyakorisága és erőssége megnő. Az aktivitásnak évi periódusa is van olyan formán, hogy maximumok vannak a tavaszi és az őszi napéjegyenlőség idején, minimumok vannak télen és nyáron a napfordulókor. Megállapítható az is, hogy az aktivitás észak felé a  $67^\circ$  szélességig nő, majd ismét csökken, a legnagyobb aktivitás öve tehát megfelel a sarki fény maximális gyakorisági övének. A nagyobb földmágneses háborgások 26-31 napos visszatérési hajlama a Nap 27 napos tengelykörüli forgásával kapcsolatos. (Az ingadozás azzal magyarázható, hogy a napfoltoknak saját mozgásuk is van.)

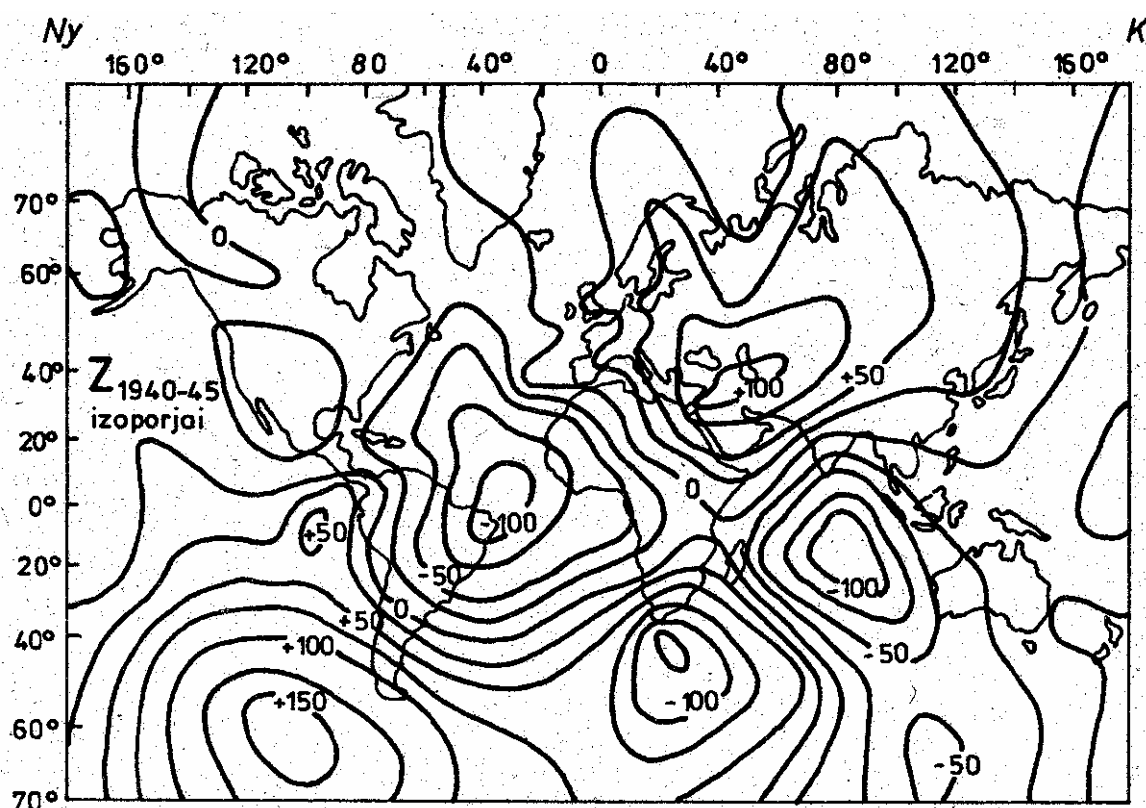
A földmágneses tér háborgásainak magyarázatára a későbbiekben még visszatérünk.

## 1.6.2 A földmágneses tér szekuláris változásai

Egy-egy földmágneses obszervatórium regisztrátumai alapján a mágneses elemek évi középértékeit időbeli sorba rendezve a mágneses elemek lassú, egyirányú változását figyelhetjük meg. Ezt a jelenséget a földmágneses tér évszázados, vagy szekuláris változásának

nevezzük. Nagyon valószínű, hogy ezek a változások is periódusosak, de egy-egy periódus igen nagy – esetleg több évszázad – így a rendelkezésre álló értéksorozatok ma még nem elég hosszúak valamennyi periódus felismeréséhez.

A mágneses tér évszázados változásainak térbeli eloszlását, azaz a változások területi függését jól áttekinthetjük, ha a különböző időpontokra vonatkozó mágneses térképeket összehasonlítjuk. Ekkor azt tapasztaljuk, hogy a mágneses teret jellemző izogörbék rendszere az idő folyamán elfordul, eltolódik és eltorzul. Ha összekötjük a térképen azokat a pontokat, amelyekben egy-egy mágneses elem évi változása ugyanakkora, akkor az illető elem *izopor* görbéit kapjuk. Az izopor görbék egy-egy ország területén belül lapos ívek, világviszonylatban azonban zárt görbék, amelyek a legnagyobb negatív és pozitív változás helyeit: az ún. izopor központokat veszik körül. Az *1.16 ábrán* a földi mágneses térerősség függőleges összetevőjének izoporjait mutatjuk be az 1940 és 1945 közötti időtartamra. Magyarországon a mágneses elemek 1950 és 1965 közötti időtartamra vonatkozó görbéit az *1.9*, az *1.10* és az *1.11 ábrán* szaggatott vonalakkal jelöltük.



*1.16 ábra.* A függőleges térerősség izoporjai 1940 és 1945 között

Az egyes mágneses elemek évszázados változásairól úgy kaphatunk hű képet, ha megvizsgáljuk az obszervatóriumoknak a különböző mágneses elemekre vonatkozó értékso-rait. Így természetesen egy-egy obszervatórium adatsora nem ad az egész Földre jellemző képet, de sok obszervatórium adatsorainak összességéből mégis meg lehet állapítani a földmágneses tér évszázados változásának helyi sajátosságait.

Ha a földmágneses obszervatóriumokban észlelt mágneses elemek évi átlagos értékeit koordináta-rendszerben ábrázoljuk, akkor különböző alakú görbéket kapunk. Ezekből az adott obszervatórium területére vonatkozó jellegzetes mágneses változásokat hatvány- polinomokkal közelítve kaphatjuk meg.

A tapasztalat azt mutatja, hogy a vizsgált néhány évtizedes időközben az évszázados periódusos változás jól helyettesíthető egy legfeljebb harmadfokú

$$E|_{\varphi, \lambda = \text{áll.}} = E_0 + a\Delta t + b\Delta t^2 + c\Delta t^3 \quad (1.15)$$

hatványpolinommal, – ahol  $E$  az adott obszervatórium ( $\vartheta, \lambda$ ) helyén valamely ( $T, H, Z, D, I$ ) mágneses elemet jelöli,  $E_0$  az illető mágneses elem értéke a  $Dt = 0$  időpontban, az  $a, b, c$  a hatványsor tapasztalati úton meghatározandó együtthatói, a  $\Delta t = t - t_0$  pedig valamely  $t_0$  kezdeti időponttól számított időtartam. /Az (1.15) hatványsorban elvileg maguk a  $t$  időpontok is szerepelhetnének, azonban számítástechnikai szempontból ez célszerűtlen lenne./ Mivel harmadfokú hatványpolinom alkalmazása esetén csupán 4 ismeretlen együtthatónk van ( $E_0, a, b, c$ ) és mivel valamely mágneses elem adatsorának minden egyes  $E_i$  értéke egy-egy egyenletet ad az ismeretlen együtthatók meghatározására, ezért lényegesen több egyenlet írható fel, mint ahány ismeretlenünk van. Így az ismeretlen együtthatók legalkalmassabb értékeit a legkisebb négyzetek elve alapján kiegyenlítéssel határozzuk meg.

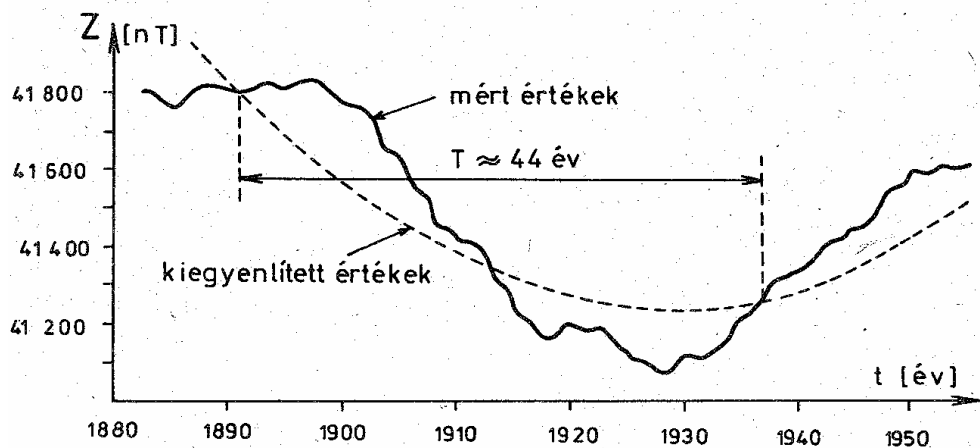
A különböző mágneses elemek 1870 és 1955 közötti adatsorát a *Budakeszi Obszervatóriumra* vonatkoztatva az alábbi hatványpolinomokat kapjuk:

$$\begin{aligned} D_{\text{Budakeszi}} &= -9^{\circ}24.78' + 2.014\Delta t + 0.10071\Delta t^2 - 0.000508\Delta t^3 \\ I_{\text{Budakeszi}} &= 62^{\circ}56.76' - 2.240\Delta t + 0.03402\Delta t^2 \\ H_{\text{Budakeszi}} &= 20766.8nT + 23.964\Delta t - 0.30242\Delta t^2 \\ Z_{\text{Budakeszi}} &= 40626.5nT - 15.264\Delta t + 0.37123\Delta t^2 \end{aligned}$$

Ezekben az összefüggésekben a kezdeti időpont éve 1870, tehát

$$\Delta t = t - 1870,$$

ahol  $t$  a kérdéses időpont éve.



1.17 ábra. 44 éves periódus a  $Z$  adatsora alapján

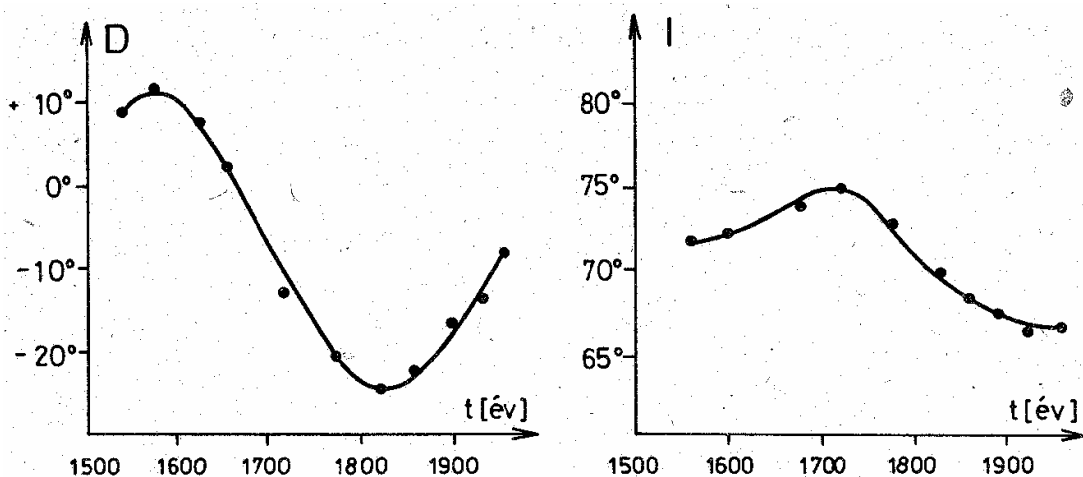
Ha ezek után a kiegyenlítéssel kapott  $E = f(t)$  függvényt rárajzoljuk a mérési adatok alapján megrajzolt görbére, akkor jól láthatjuk a mért és a kiegyenlített értékek különbségének alakulását. Az 1.17 ábrán például a függőleges térerősség változását láthatjuk a franciaországi Chambon la Forêt-i obszervatórium adatsora alapján. A kiegyenlített és a mért értékek különbségeiben részben a kisebb mérési hibák, részben pedig az évszázados változások helyi sajátosságai nyilvánulnak meg.



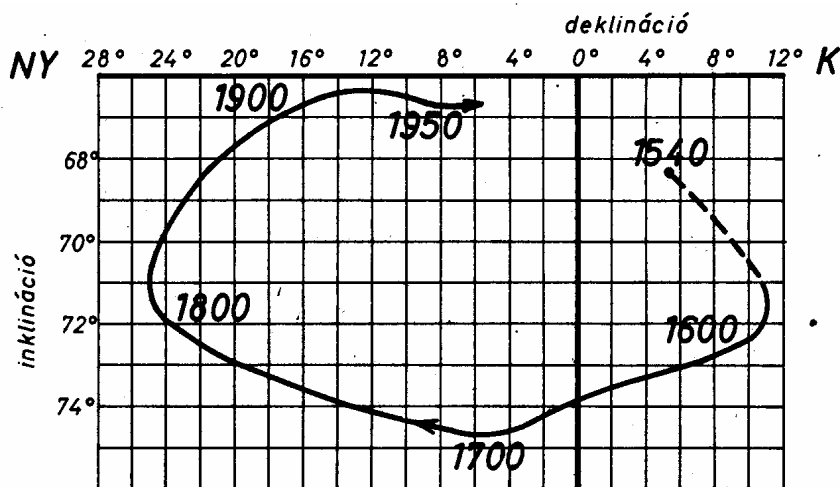
Ha ilyen módon több obszervatórium adatsorát feldolgozzuk, akkor a mérsékelt égövben a mágneses elemek változásában kb. *fél évszázados* periódusú hullámot tudunk kimutatni. A hullám amplitúdója obszervatóriumonként különböző, de a mérési pontosságnál nagyságrenddel nagyobb, tehát reálisnak kell tekinteni. A deklinációban ugyanis  $10\text{-}20'$ , a térerősség összetevőiben pedig  $200\text{ nT}$  körül van az amplitúdó. Érdekes, hogy az egyenlítő közelében fekvő obszervatóriumok adatsorában a fél évszázados periódusú hullám kb. feleződik. A földmágneses obszervatóriumok kevés száma és egyenlőtlen területi eloszlása miatt ma még nem tudjuk pontosan megállapítani, hogy miként történhet az átmenet a két periódus között.

A földmágneses tér évszázados változásának kutatása a felhasználható adatsorozatok rövidege miatt sok nehézségbe ütközik. A hosszabb periódusú változások vizsgálata céljából nagyon hasznos lenne, ha az egyes obszervatóriumokra hosszabb adatsorok állnának rendelkezésünkre.

A leghosszabb adatsor Londonra vonatkozik, ahol a deklinációra 1540-től, az inklinációra 1576-tól, a vízszintes térerősségre pedig 1846-tól állnak rendelkezésre adatok (1.18 ábra). Különösen a mágneses elhajlás változásának periódusos jellege igen feltűnő, azonban más obszervatóriumok hasonló sorai eltérő alakú görbéket adnak, így a londoni adatsor legfeljebb az európai évszázados változásokra lehet jellemző, a Föld más helyein a változás jellege más is lehet.



1.18 ábra. A  $D$  és az  $I$  évszázados változása Londonban



1.19 ábra. A térerősség irányának évszázados változása Londonban

Néha a deklináció és az inklináció változását közös koordináta-rendszerben tüntetik fel olyanképpen, mintha annak a görbének a síkvetületét rajzolnák meg, amelyet a minden irányban szabadon elforduló mágnesű csúcsa írna le az idő folyamán. Ilyen diagramot láthatunk az 1.19 ábrán. Ezeknek a görbéknek a menete a Föld különböző helyein mindenütt megegyezik az óramutató járásával.

Amint a londoni adatokból kiolvashatjuk, az évszázados változásnak van egy közel 500 éves periódusú összetevője. Ennyi, (pontosabban 480 év) adódik más adatsorokból is, viszont a kezdeti adatok bizonytalansága miatt ettől lényegesen eltérő értékek is előfordulnak. Egyenértékűnek és megbízhatónak csak az utóbbi 70-80 év adatait tekinthetjük.

A földmágneses tér évszázados változásainak tanulmányozása a teret leíró gömbfüggvény-sor együtthatóinak vizsgálata alapján is lehetséges [63].

A vizsgálatok alapján legszembetűnőbb a *dipólnyomaték csökkenése*. Az 1958-1962 közötti időszakban a dipólus nyomatéka  $4.2 \cdot 10^{12} \text{ Tm}^3 / \text{év}$  sebességgel csökkent. Ha ez a csökkenés állandó maradna, akkor kb. 2000 év múlva zérusra csökkenne a dipólusnyomaték értéke.

Érdekes még a nondipólus tér  $0.2^\circ / \text{év}$  sebességű *nyugati irányú driftje*, a földmágneses dipólus északi irányú elmozdulása... stb.

### 1.6.3 A földmágneses tér változásai a földtörténeti korok folyamán

A Föld mágneses terének egészen a földtörténeti korokig visszanyúló tanulmányozása a paleomágnesség módszerével lehetséges [99]. A történelmi, történelem előtti idők égetett agyagtárgyait, tűzhelymaradványait vizsgáló módszert gyakran *archeomágneses módszernek*, a földtani képződményekkel foglalkozó módszert pedig *paleomágneses módszernek* nevezik. Mindkét módszer fizikai alapjai és mérési eljárásai azonosak, ezért gyakran egyetlen elnevezést: a paleomágneses vizsgálati módszer elnevezését használják.

A paleomágneses módszer fizikai alapja a kőzetmágnesség (beleértve az égett és égetett anyagok mágnességét is). A földi mágneses térben levő kőzetek mágnesezettsége remanens és indukált mágnesezettségből tevődik össze. A paleomágneses módszer a kőzetek remanens mágnesezettségét vizsgálja. Kőzetekben remanens mágnesezettség különféle módon alakulhat ki; paleomágneses szempontból legfontosabb a *termoremanens mágnesezettség*.

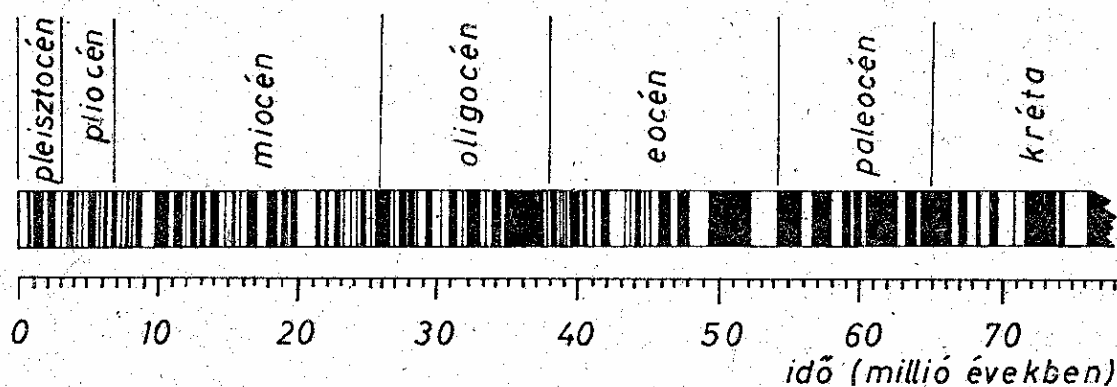
Ismeretes, hogy minden ferromágneses anyag a rá jellemző *Curie-hőmérséklet* felett csak paramágneses tulajdonságokat mutat, azaz elveszti makroszkópikus mágnesezettségét. Fordított folyamat esetén, amikor valamely forró vulkáni anyag kihülése során a kőzet ferromágneses tulajdonságú elegyrészei eléri a kritikus Curie-hőmérsékletüket ( $300-600^\circ\text{C}$ ), akkor ferromágneses tulajdonságúvá válnak, mivel az elemi mágneses alkotórészeik (domének) az aktuális mágneses tér  $\mathbf{T}$  irányába rendeződnek. Ily módon a megszilárdult és kihűlt kőzet makroszkópikus mágnessé válik, mágnesezettségének iránya megegyezik a keletkezésének (megszilárdulásának) helyén és időpontjában uralkodó mágneses tér irányával és mágnesezettségének nagysága arányos lesz az akkori mágneses tér nagyságával. Az így kialakult termoremanens mágnesezettség igen stabil, azaz a kőzet kialakulása utáni mágneses térváltozások nem változtatják meg a kőzetbe "fagyott" mágnesezettség irányát. Ezek a körülmények teszik lehetővé a mágneses tér földtörténeti korokban történt változásainak tanulmányozását.

Ha a megfelelően kiválasztott és az erre alkalmas kőzetmintákat laboratóriumban megvizsgáljuk [49] – vagyis meghatározzuk az adott korú és helyzetű minta mágnesezettségének irányát, akkor feltételezve, hogy a tér dipólszerű (azaz elhanyagolva a tér nondipól részét) megállapítható a kőzet keletkezésének pillanatában a mágneses É-i vagy D-i pólus helyzete.

A paleomágneses vizsgálatok alapján a mágneses tér legfontosabb paleoszekuláris változásai a következők:

**1.** A földmágneses pólus a Föld forgástengelyével mintegy  $5^\circ$ -ot bezáró tengely körül *precessziós mozgást* végez közel *100000 éves periódussal* és  $15^\circ$ -nál nem nagyobb amplitúdóval.

**2.** Miközben a dipólus tengelye az **1.** pont alatti mozgását végzi, bizonyos időközönként a *dipólus polaritása az ellenkezőjére változik*, azaz a földmágneses É-i és D-i pólus felcserélődik. A dipólus polaritásváltozása a Föld minden pontján a térerőségek irányának  $180^\circ$ -os változását eredményezi, emiatt ezt a jelenséget *mágneses térfordulásnak* is nevezik. A dipólmomentum "átbillenése" a földtörténeti időskálán igen gyorsan, 1000-10000 év alatt zajlik le. A kontinensek és az óceánok fenekének kőzetei alapján az utóbbi 76 millió évben 171 mágneses térfordulást sikerült igen pontosan meghatározni. Az **1.20 ábrán** a pólusváltozások 76 millió évre visszaterjedő időskálája látható.



**1.20 ábra.** A mágneses térfordulások időrendisége

Fehér színnel a jelenlegi mágneses térnek megfelelő normál polaritású, feketével pedig a fordított polaritású állapotot jelöltük. Az eddigi adatok alapján a mostani mágneses térnek megfelelő normál polaritású állapot átlagos időtartama kb. 420 000 év, míg a fordított polaritású állapot időtartama 480 000 év körüli. A két szám közeli értéke azt jelenti, hogy a földmágneses tér kb. ugyanakkora valószínűséggel található normál-, vagy fordított polaritású állapotban. A jelenlegi normál polaritás kora már csaknem 700000 évre tehető. (Elképzeltető, hogy egy közeli térfordulásra kell számítanunk.) Az elmúlt időkben a normál intervallumoknak csupán 15%-a tartott hosszabb ideig, mint a jelenlegi, - igaz ugyan, hogy néhány igen hosszú ideig, kb. 3 millió évig is elhúzódott. Az eddigi legrövidebb időtartam valamivel kevesebb, mint 50 000 év volt.

**3.** Az utóbbi 1000 millió évben az időben visszafelé haladva a polaritás változások mellett a dipólus tengelye a jelenlegi helyzetétől fokozatosan az egyenlítői területek felé fordult. Ez azt jelenti, hogy a paleozoikum elején az északi és a déli mágneses pólus a mostani egyenlítői területek közelében volt. (Az északi vagy a déli mágneses pólus földfelszíni

nyomvonalát, mint az idő függvényét, *mágneses pólusvándorlási* görbének hívjuk.) Mivel a mágneses pólus és a csillagászati pólus helyzete között kapcsolat van, ezért valószínűleg mindkét pólus hasonló pályát ír le.