

# Geofizički praktikum

## Izvori geomagnetskog polja i geomagnetska mjerenja

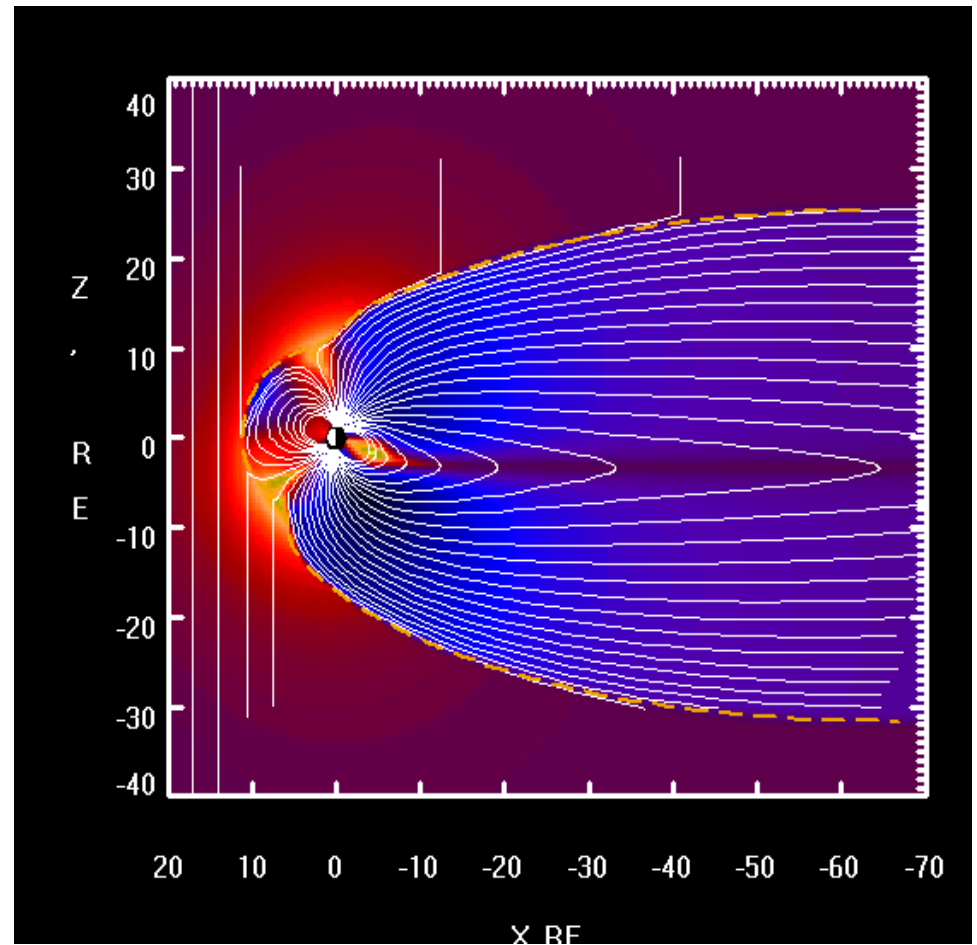
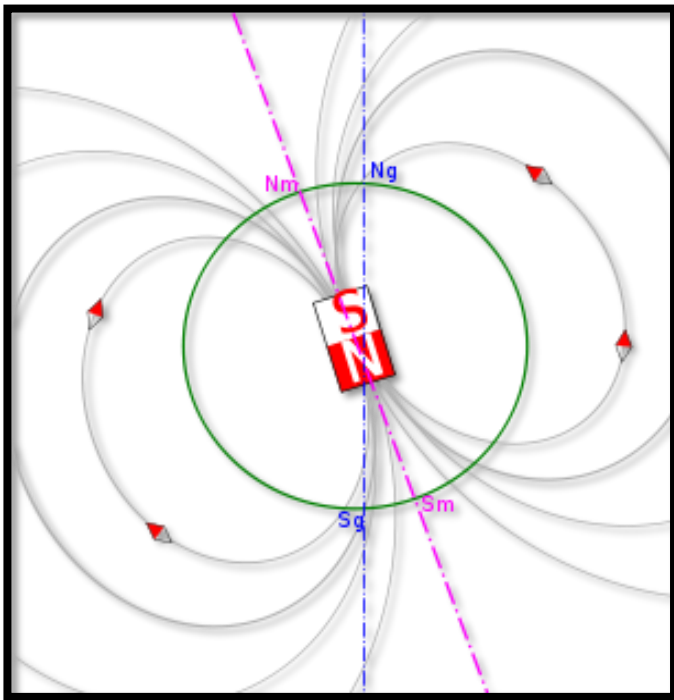


Igor Mandić  
Geofizički odsjek PMF-a



# Uvod: Zemljino magnetsko polje

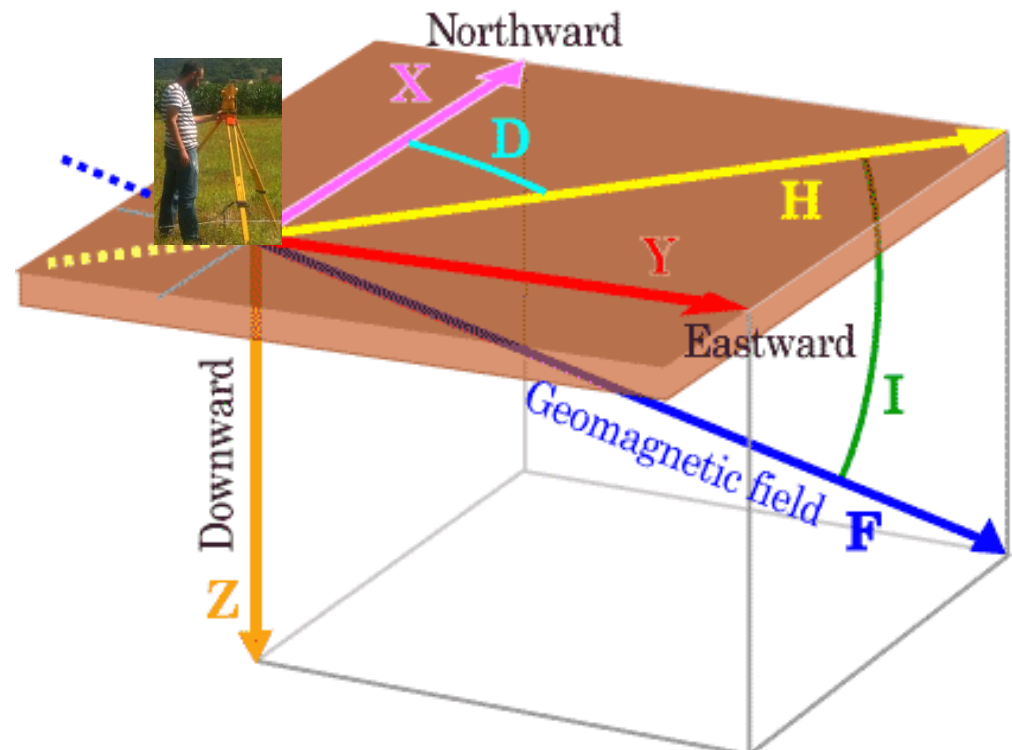
- Na površini Zemlje magnetsko polje je približno dipolarno
- U svemiru ono se proteže oko 10-ak radijusa Zemlje (dnevna strana) i preko 100-ak radijusa Zemlje (noćna strana)



# Uvod: Zemljino magnetsko polje

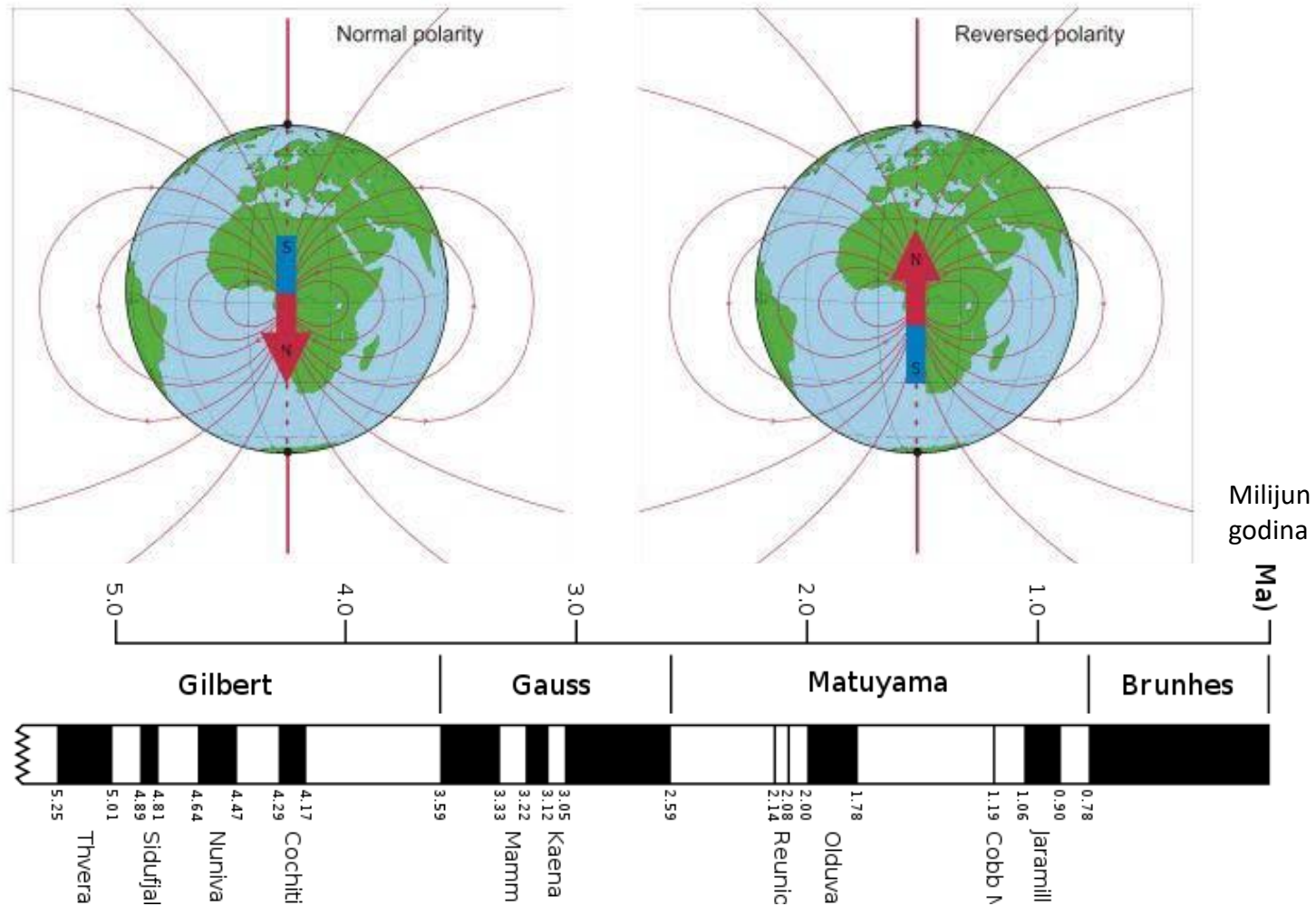
- Štiti Zemlju od kozmičkog zračenja
- Zemljino magnetsko polje je posljedica izvora koji se nalaze izvan i unutar Zemlje
- Magnetsko polje Zemlje je vrlo promjenjivo na različitim prostornim i vremenskim skalama (pulsacije, solarna varijacija, geomagnetske oluje, sekularna varijacija, reverzija geomagnetskih polova,... itd.)

- Definira se preko geomagnetiskih elemenata:  
 $H, D, Z, X, Y, I, F$



# Glavno polje: U prvoj aproksimaciji – polje mag. dipola

- Reverzije magnetskih polova

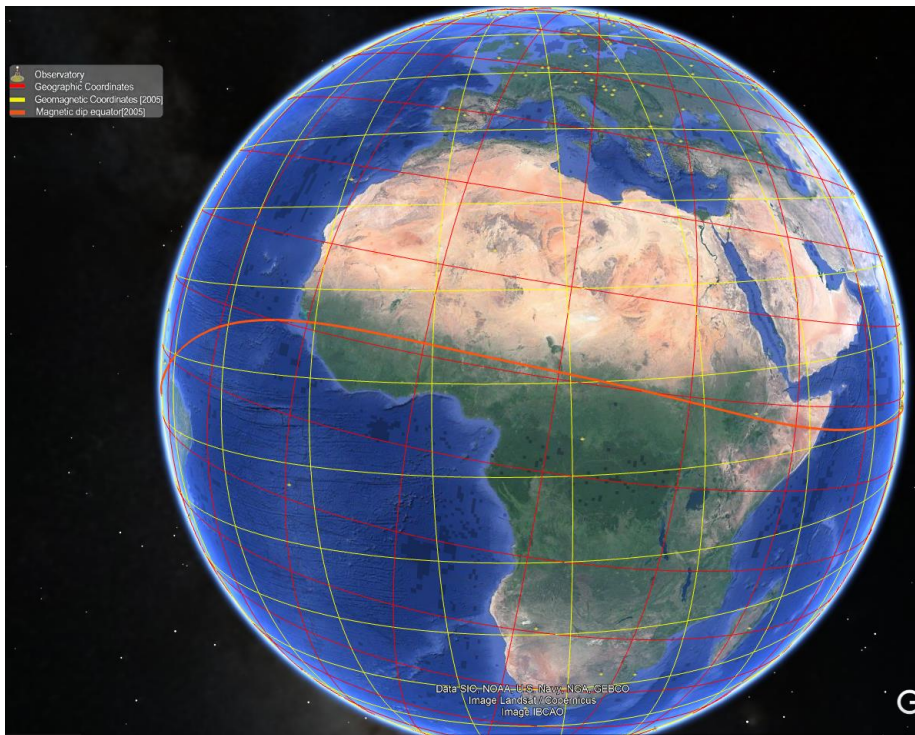


- Promjene geomagnetskog polja u geološkoj prošlosti Zemlje baziraju se na paleomagnetnim mjerenjima



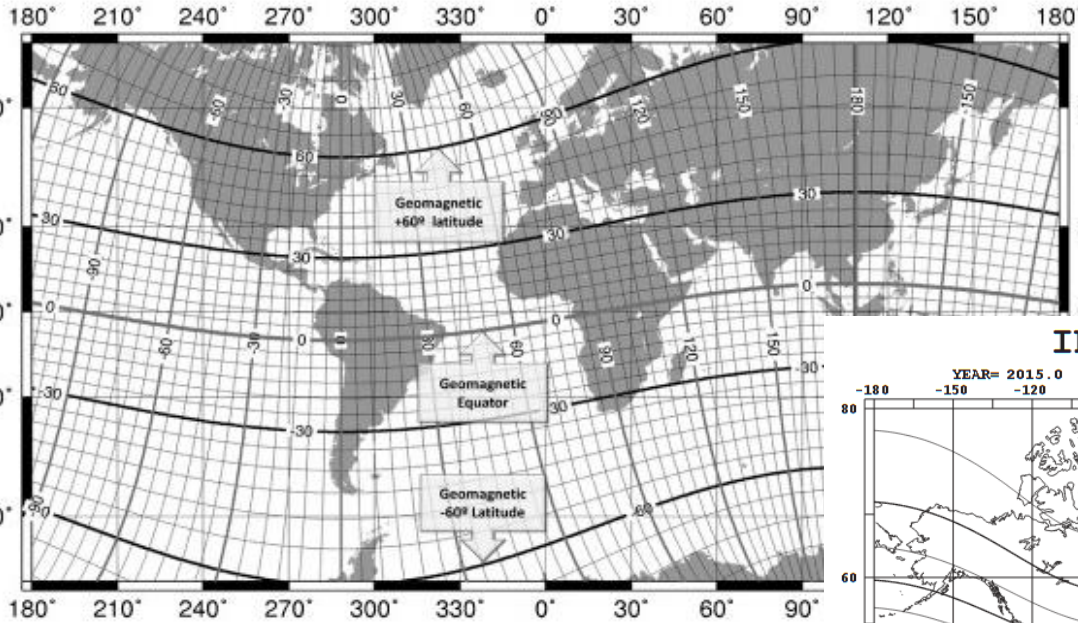
# Glavno polje: U prvoj aproksimaciji – polje mag. dipola

- Geomagnetske koordinate – definiraju se u odnosu na geomagnetski dipol



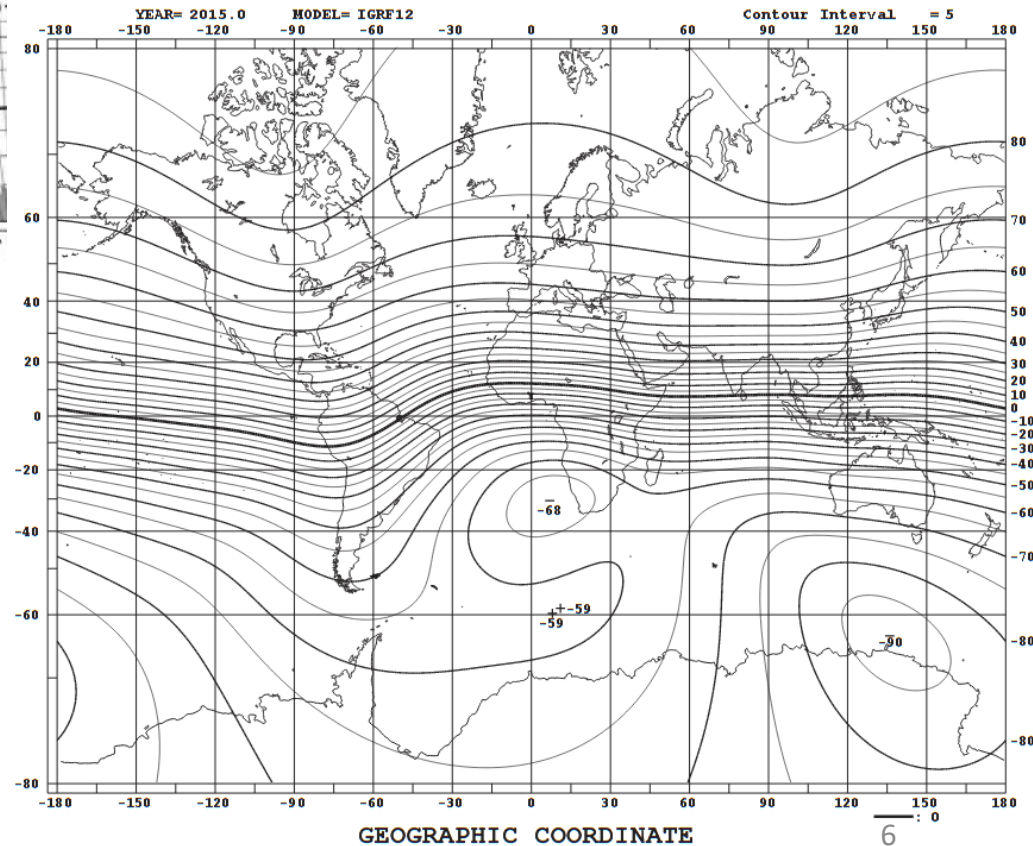
- Danas, globalni modeli glavnog polja dobivaju se pretežito iz opservatorijskih i satelitskih mjerenja

# Glavno polje: U prvoj aproksimaciji – polje mag. dipola



Izo-linije iste geomagnetske širine odnosno inklinacije – dipolna aproksimacija

## INCLINATION (DEGREES)

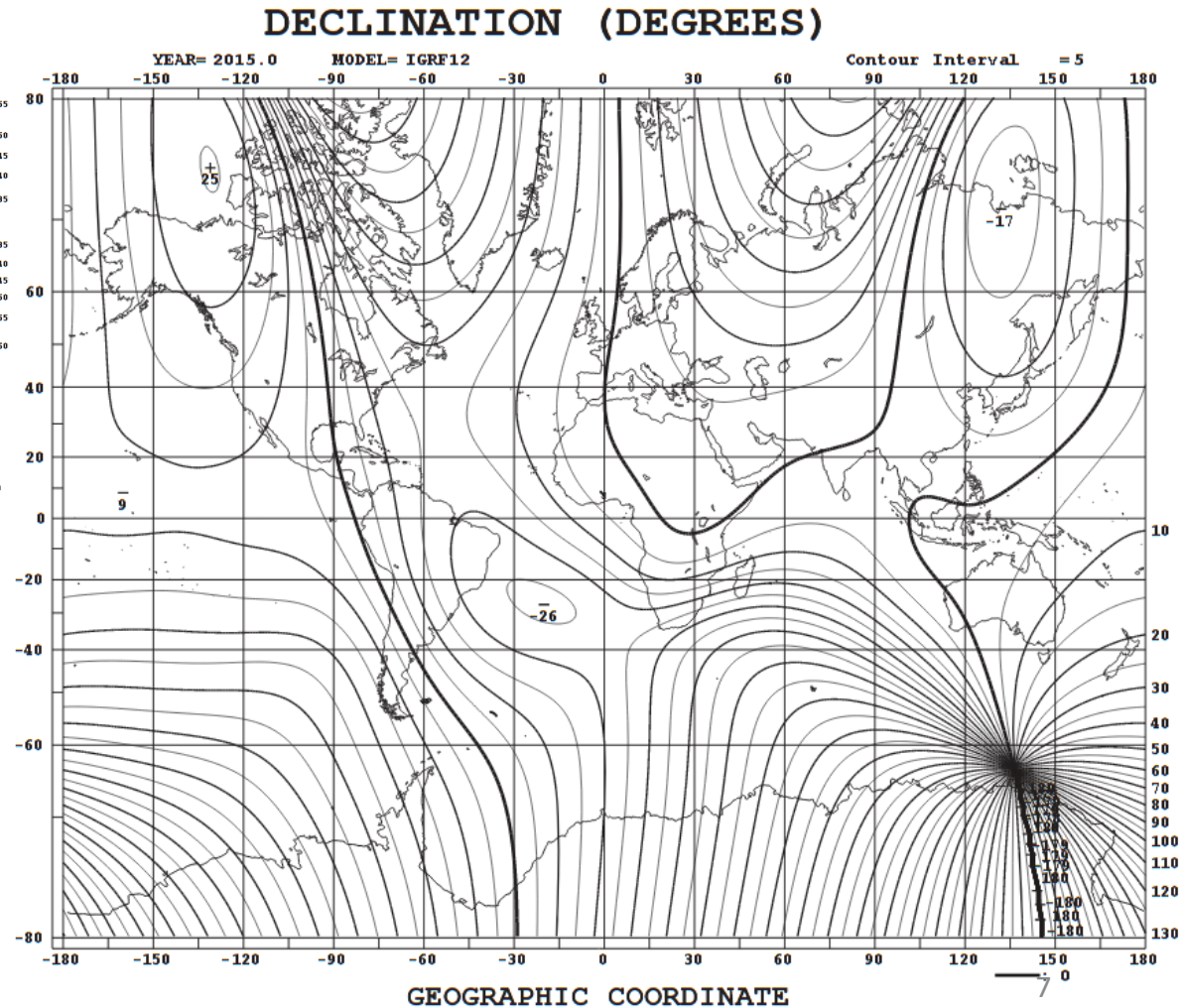
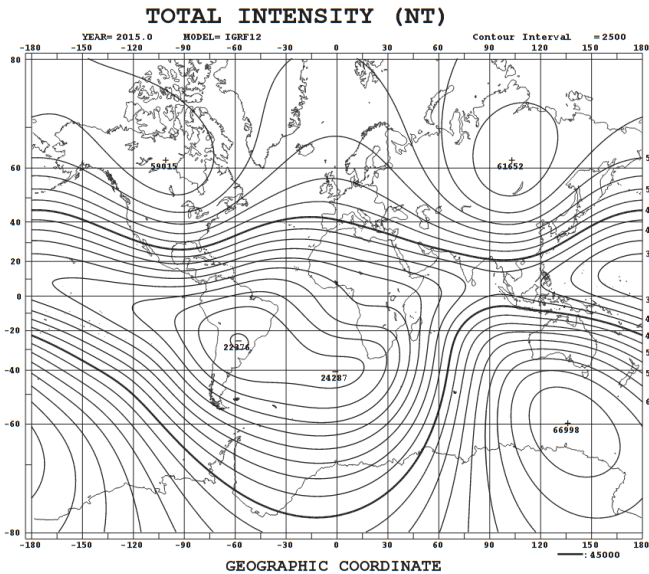


Izo-linije iste (geo)magnetske širine odnosno inklinacije – IGRF model glavnog polja, SHE do stupnja i reda 13 – puno realnija situacija



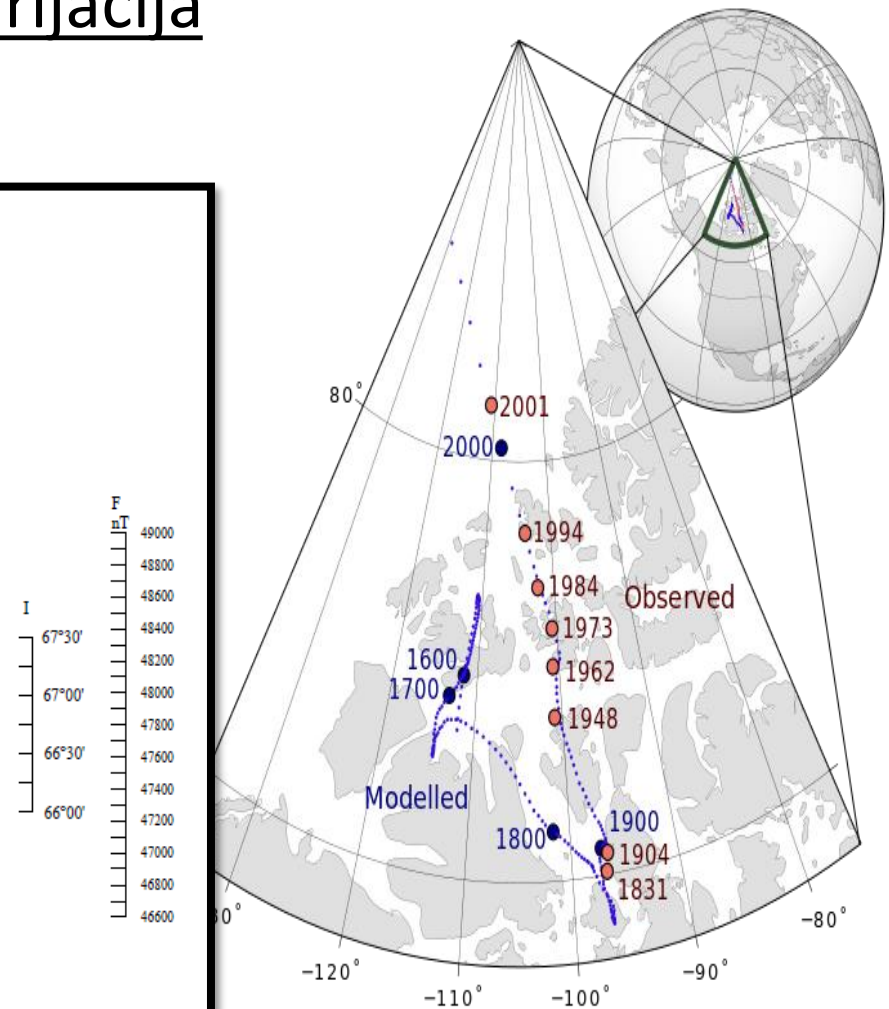
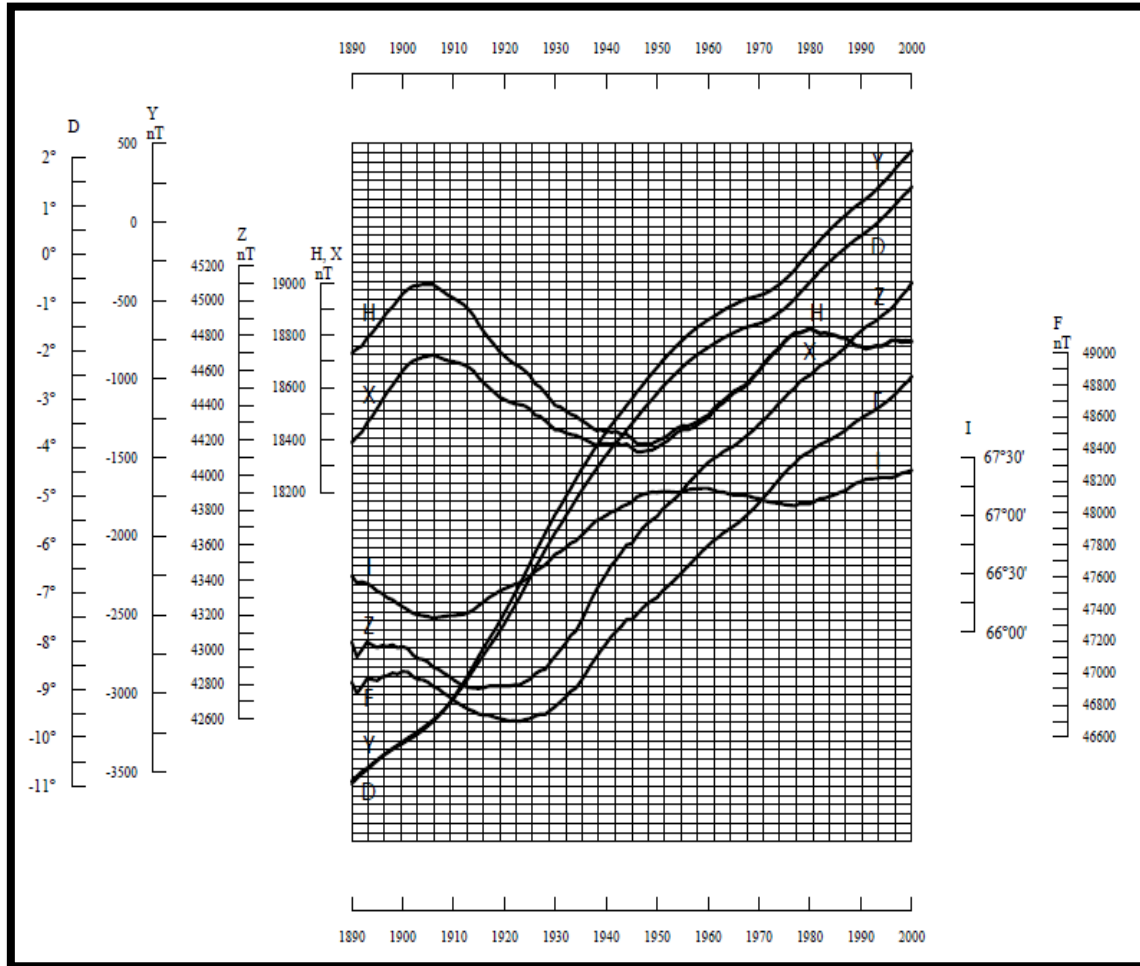
# Glavno polje: IGRF model, D i F

- IGRF model glavnog polja, totalni intenzitet  $F$  (lijevo) i deklinacija  $D$  (desno). Deklinacija je kut između (geo)magnetskog i geografskog meridijana.



# Glavno polje: Sekularna varijacija (dugoperiodičke varijacije)

Niemegk



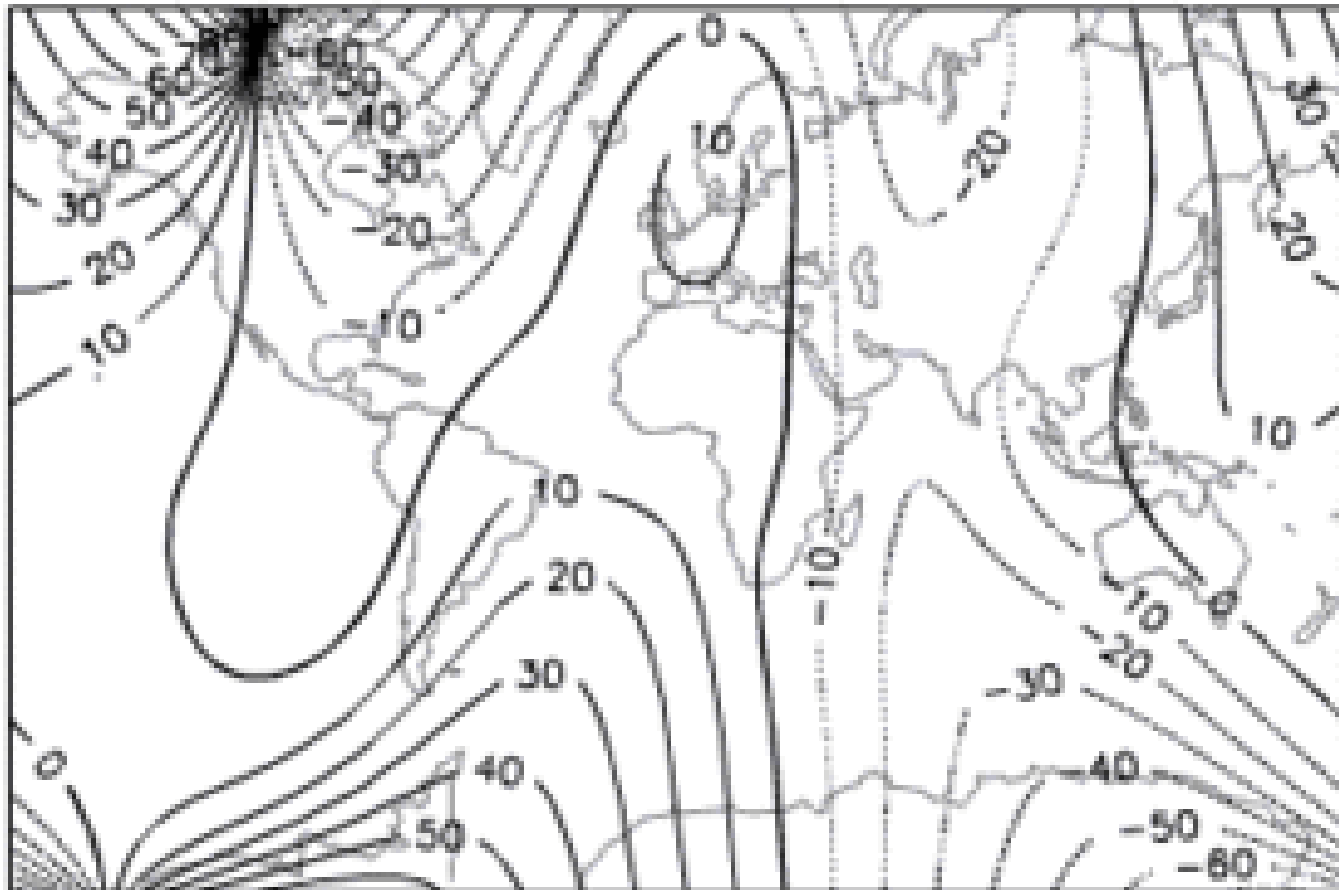
„Lutanje“ magnetnih polova

- Jedino iz višegodišnjih opservatorijskih mjerenja dobivamo pouzdanu informaciju o recentnoj sekularnoj varijaciji

# Glavno polje: Sekularna varijacija

(dugo-periodičke varijacije)

1590  
Declination (degrees east)



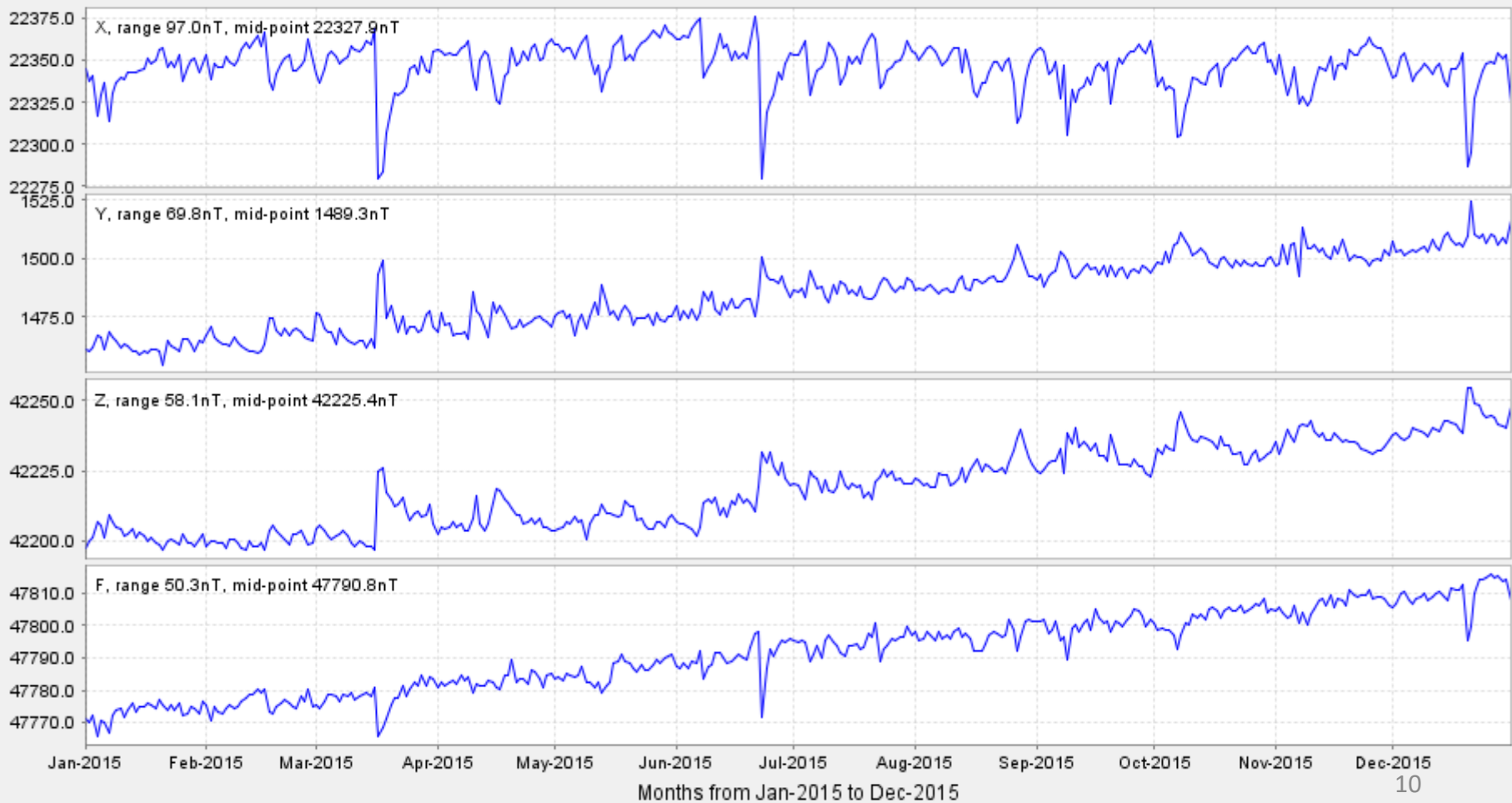
<http://geomag.usgs.gov>

Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,  
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

# Glavno polje: Sekularna varijacija

(dugoperiodičke varijacije)

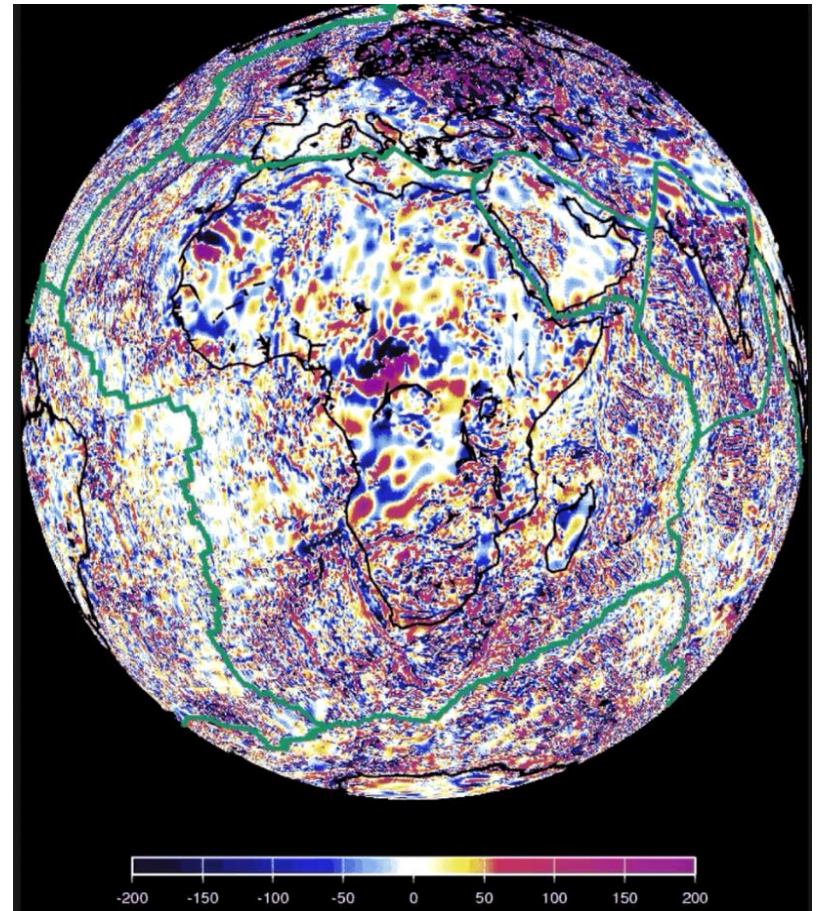
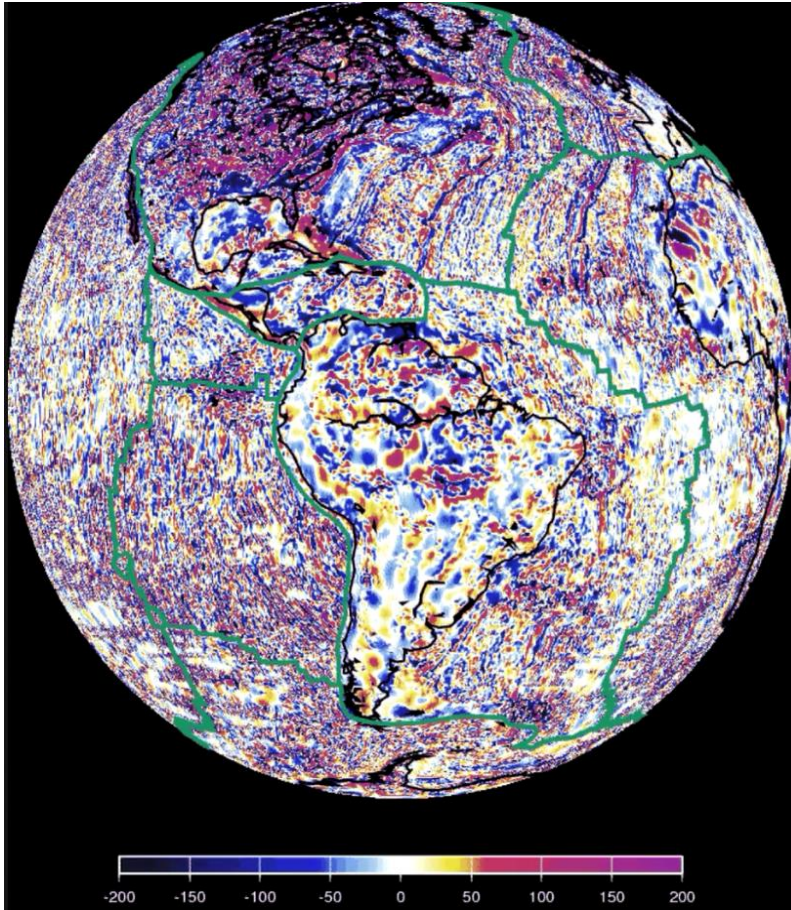
- Na godišnjem nivou sekularne promjene su gotovo linearne
- Dnevne srednje vrijednosti geomagnetskih elemenata zabilježenih u geomagnetskom opservatoriju Lonjsko polje u 2015.





# Polje kore (litosfere)

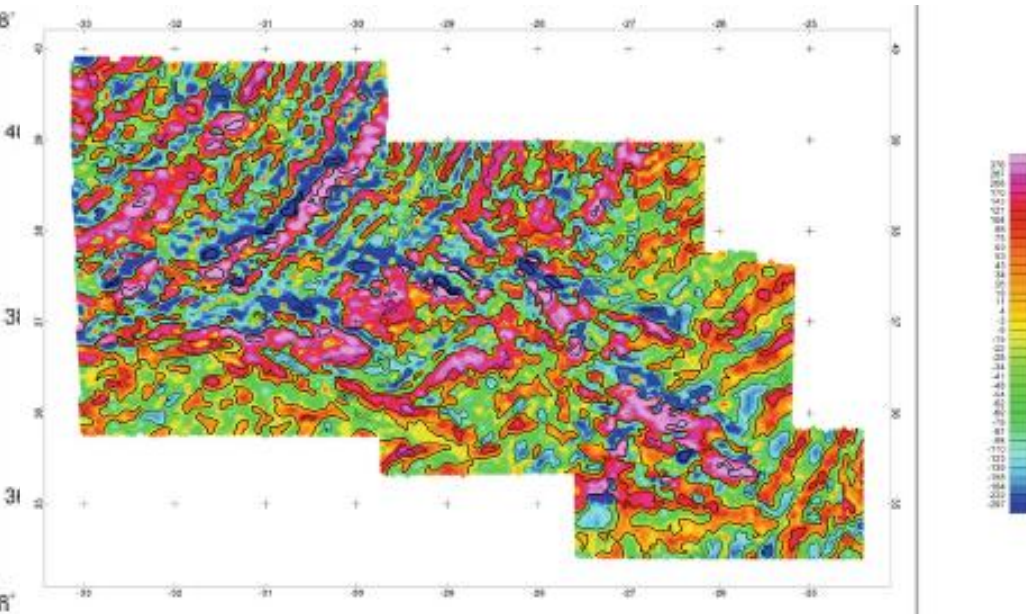
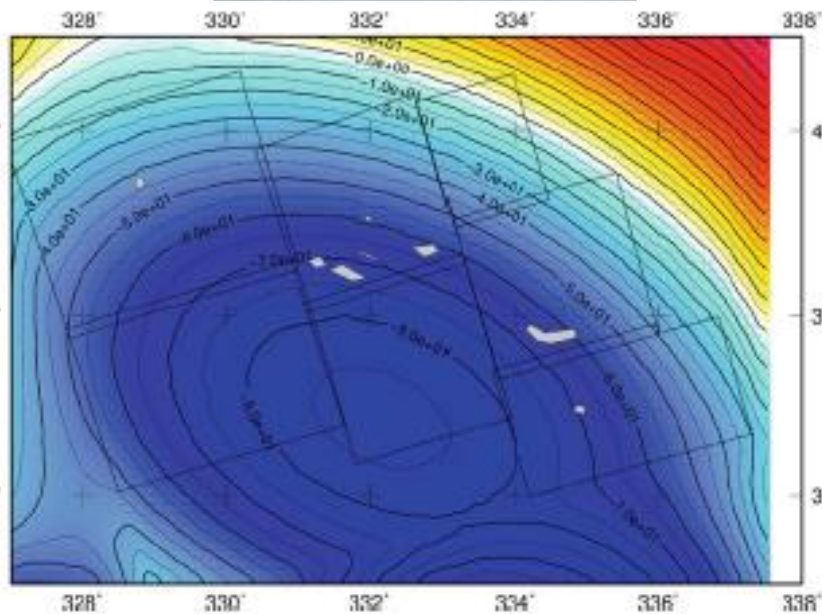
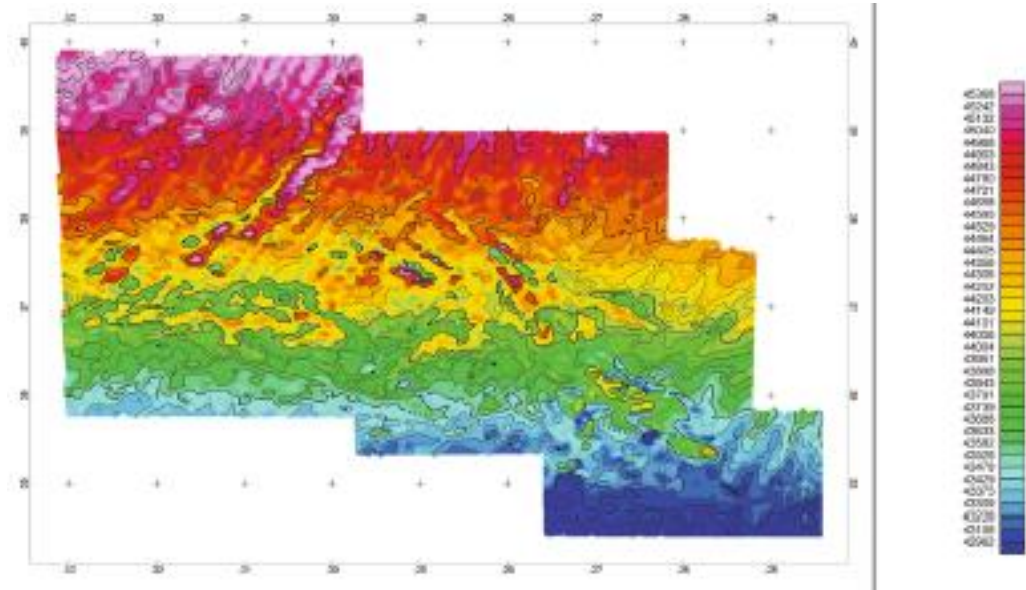
- Prostorna varijabilnost geomagnetskog polja (lokalne i regionalne anomalije) posljedica su nehomogene distribucija magnetičnih stijena i minerala u Zemljinoj kori



- Ovakve globalne model polja kore omogućuju satelitska mjerenja



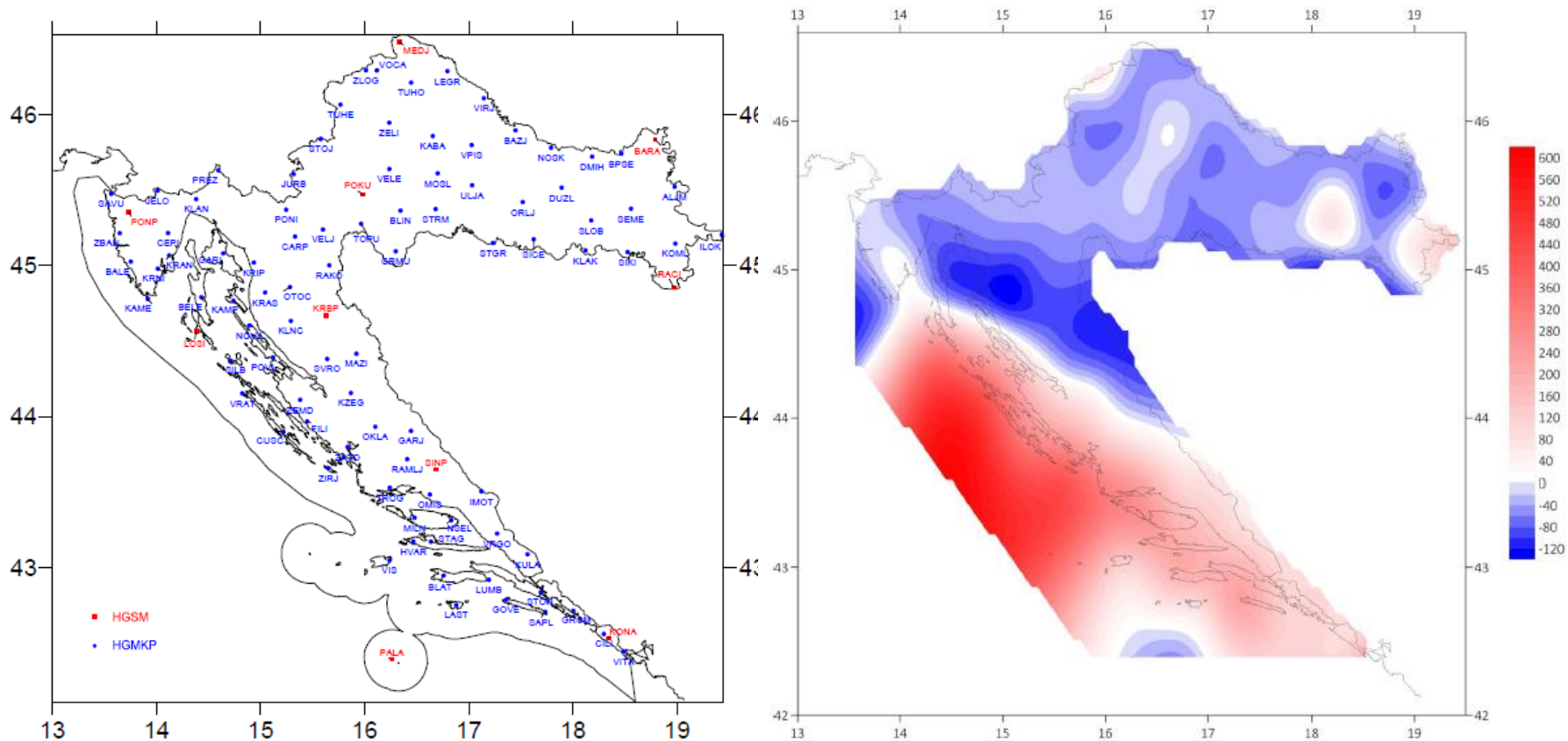
# Regionalno/lokalno polje kore – aeromagnetska i marinska mjerenja





# Lokalno polje kore

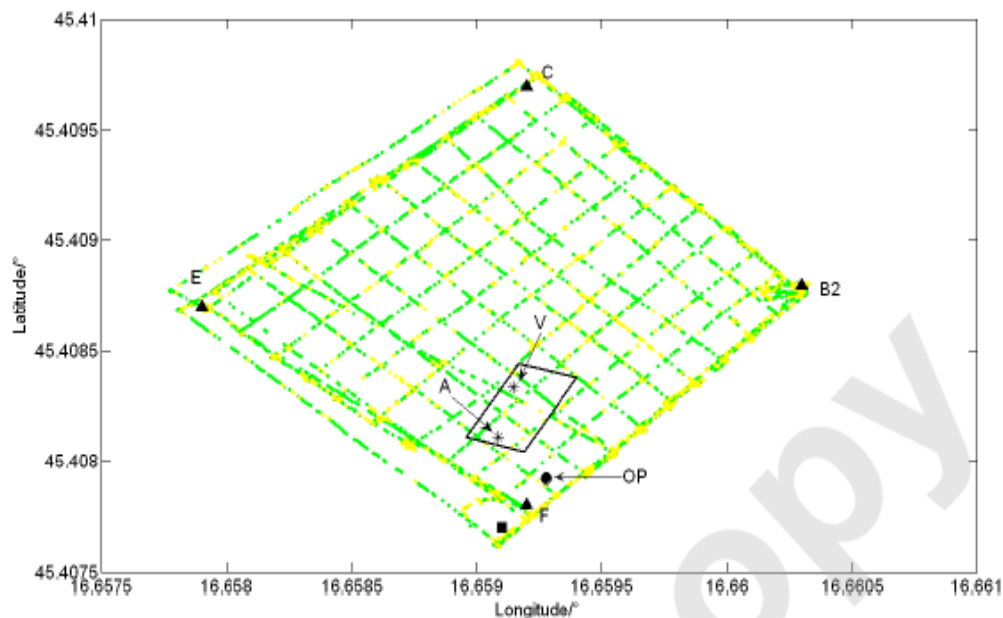
- Primjer: izmjere na sekularnim i točkama za mapiranje litosferskog polja



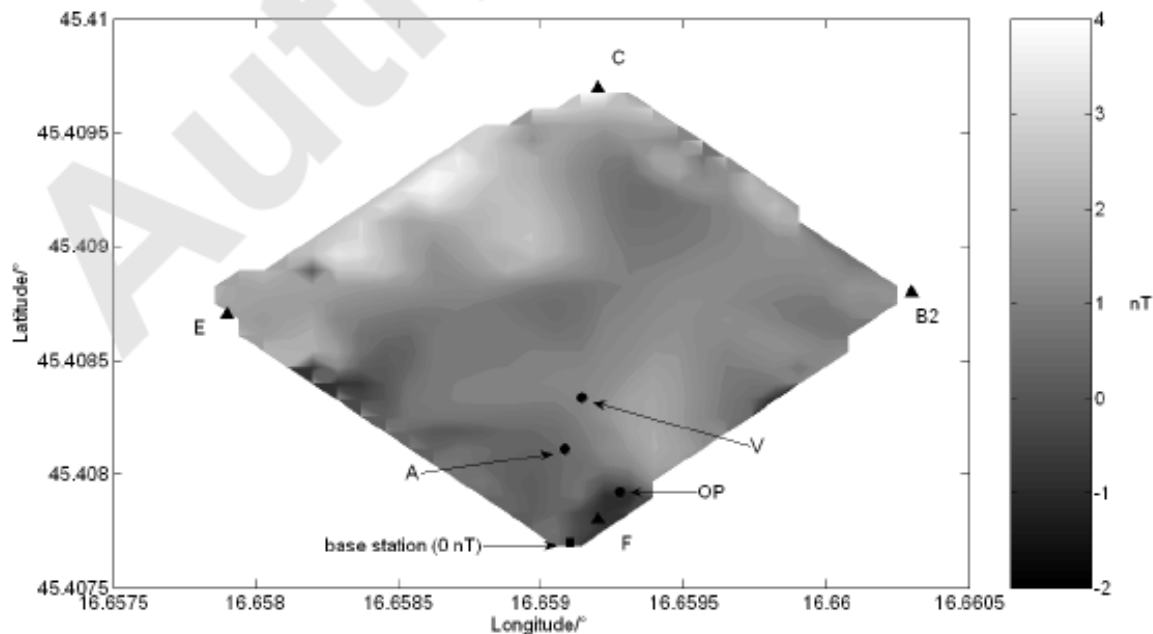
Geomagnetsku kartu (desno, Z komponenta) možemo dobiti na dva načina:

- 1) Mjerenja – model glavnog polja; mapu dobiti sa već postojećim alatima za interpolaciju i ekstrapolaciju
- 2) Mjerenja – model glavnog polja; mapu dobiti modeliranjem – npr. ASHA

# Lokalno polje kore (na ciljanim područjima, specifične lokacije)

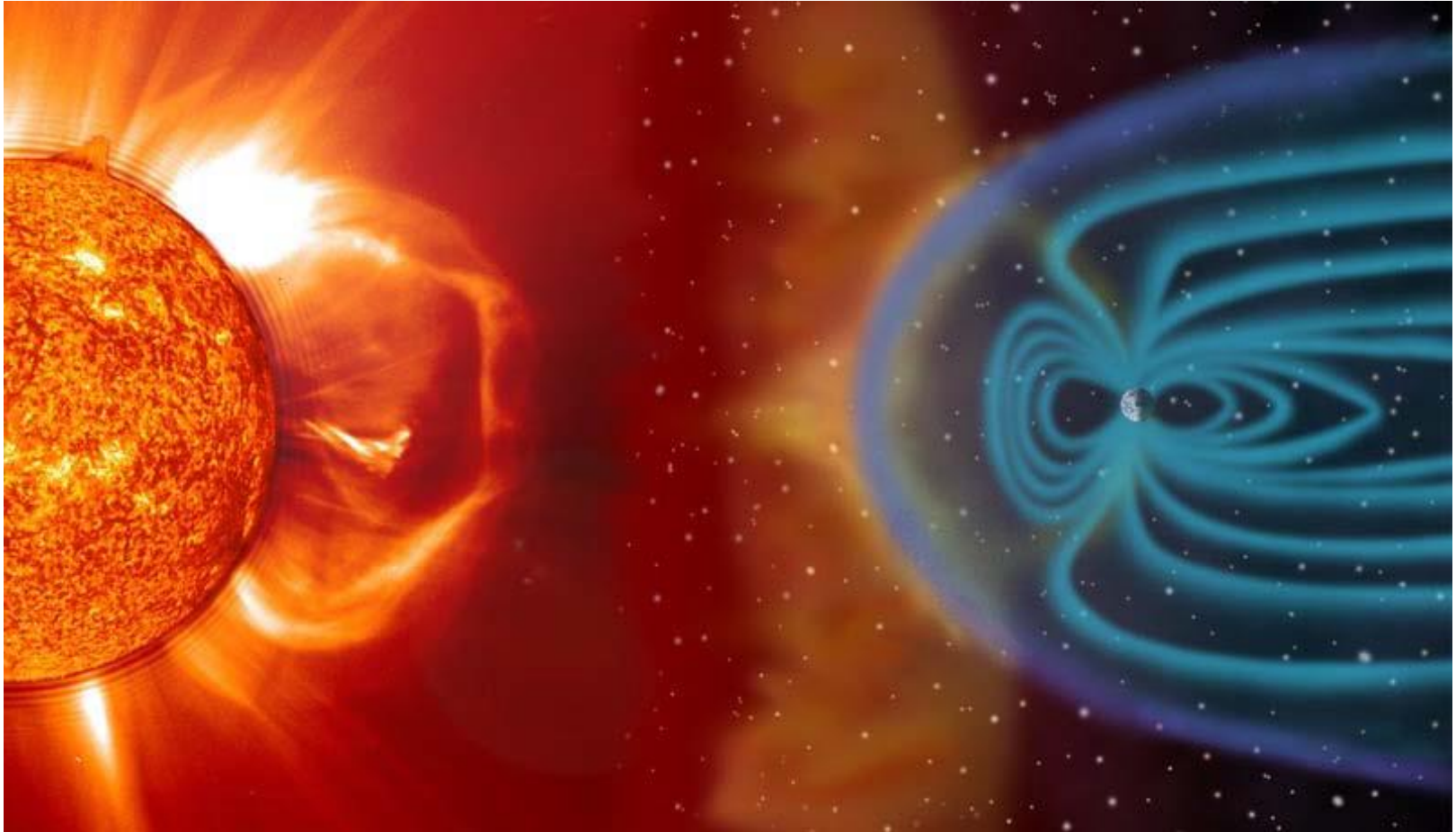


- Primjer: određivanje lokacije opservatorija u Lonjskom polju - nalaženje adekvatnih lokacija (s najmanjim gradijentima) za postavljanje instrumenata
- Premjereno područje je cca 150x150 m
- Ovakva se ispitivanja mogu vršiti u svrhu istraživanja ugljikovodika, rudarstvu, arheologiji, geologiji i sl.



# Vanjsko polje

- Varijacije vanjskog polja uglavnom su povezane s aktivnošću sunca

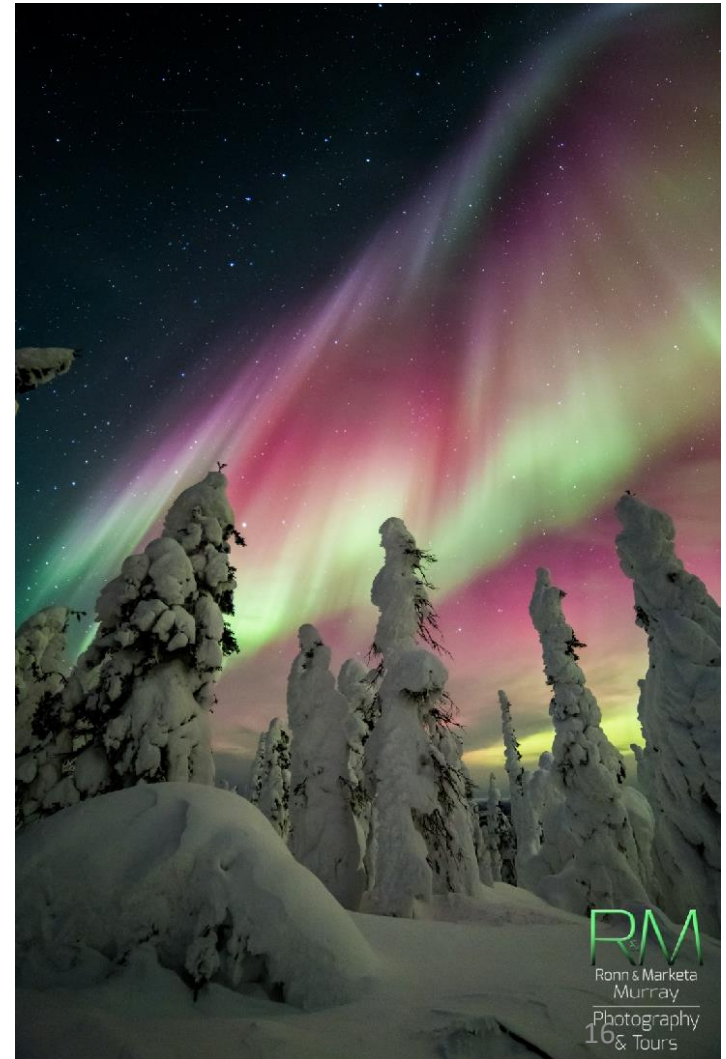




# Vanjsko polje

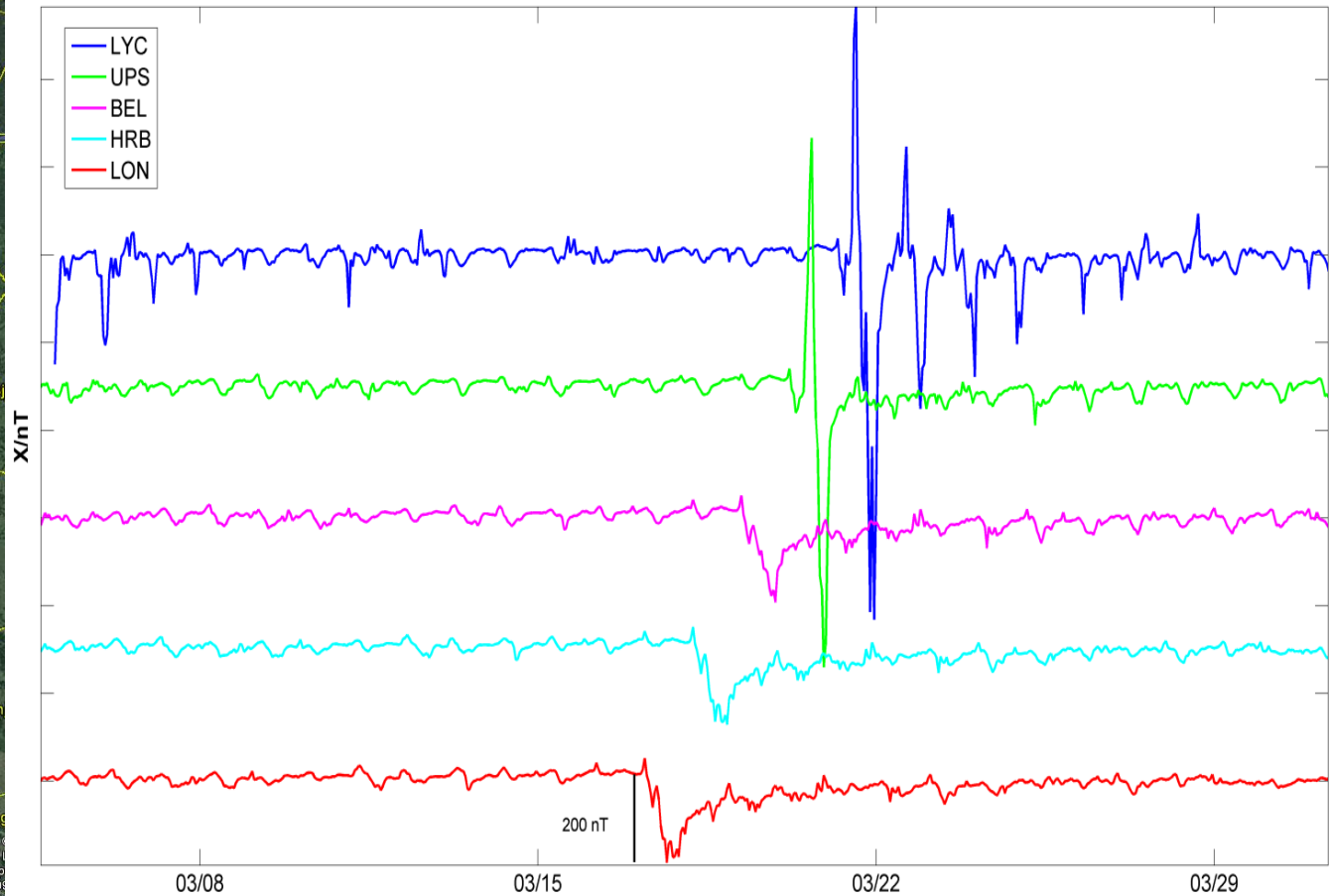
Geomagnetske oluje – najpoznatije i najintenzivnije varijacije polja, posljedica su tzv. Sunčevih CME-ova. U široj javnosti su poznate zbog lijepe pojave – polarne svjetlosti.

Primjer: 17-18. 03.  
2015 –  
geomagnetska oluja  
na dan Svetog  
Patrika



# Vanjsko polje

- St. Patrick's geomagnetska oluja zabilježena na nekoliko europskih opservatorija, 17. 03. 2015. (Zbog bolje preglednosti nizovi su posmaknuti u desno u odnosu na LON)



# Vanjsko polje

Geomagnetske oluje – direktna posljedica sunčeve aktivnosti i 11-godišnjeg sunčevog ciklusa (primjer: Nurmijarvi, Finska)

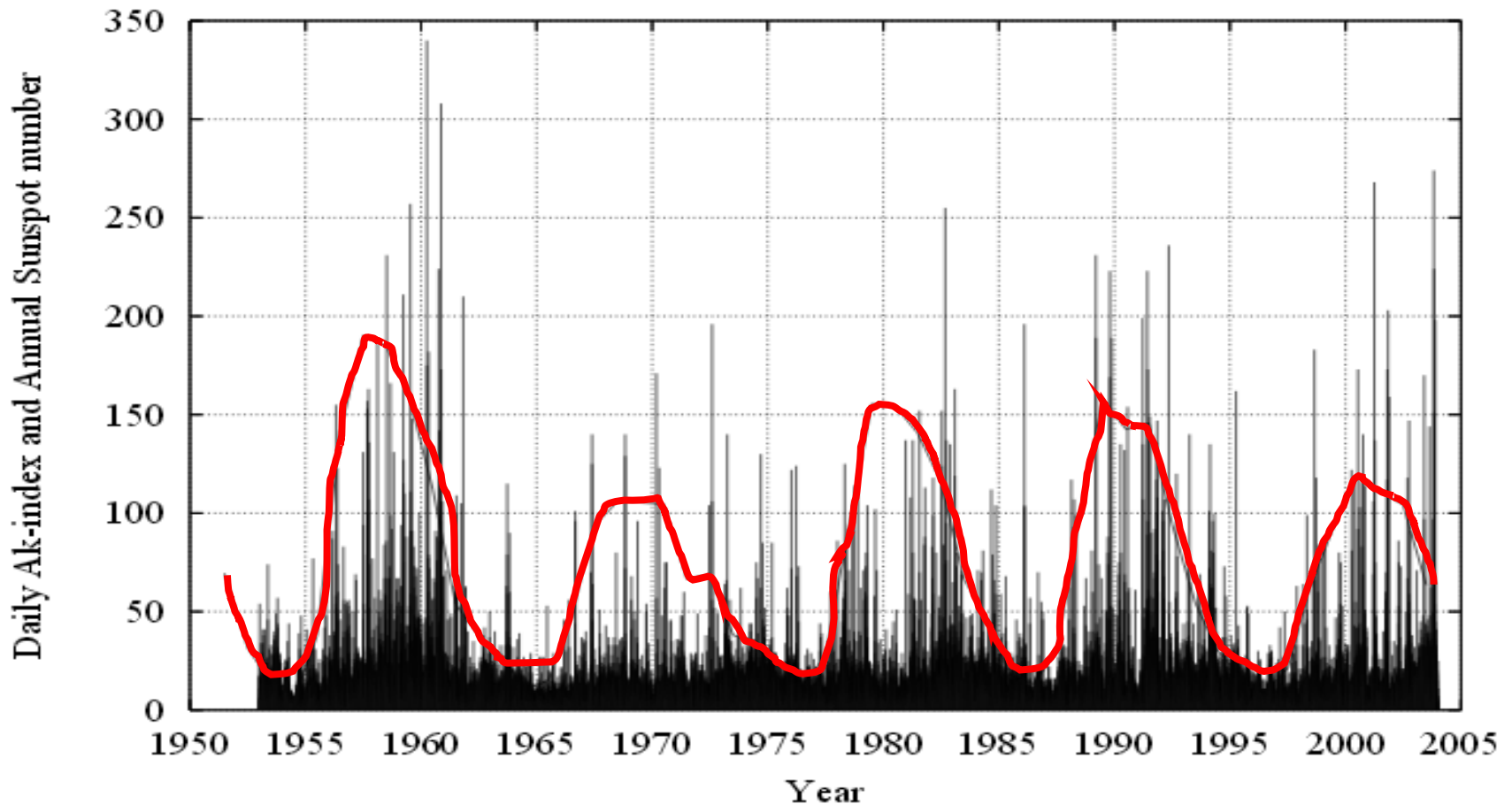
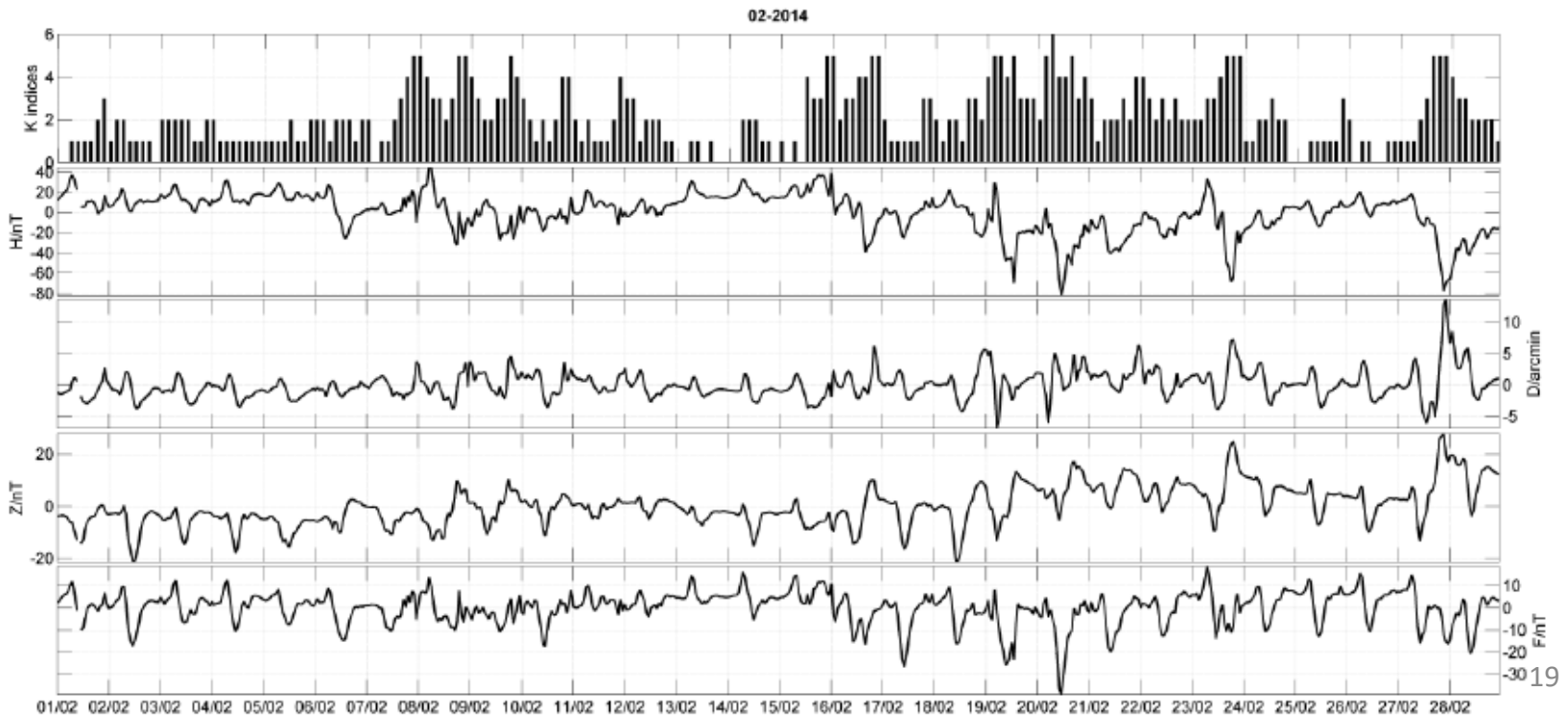
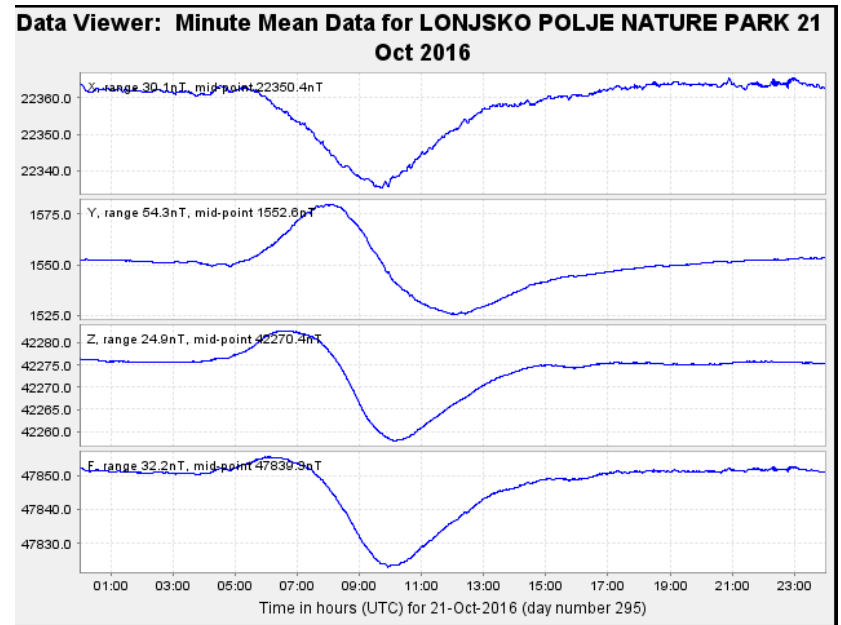
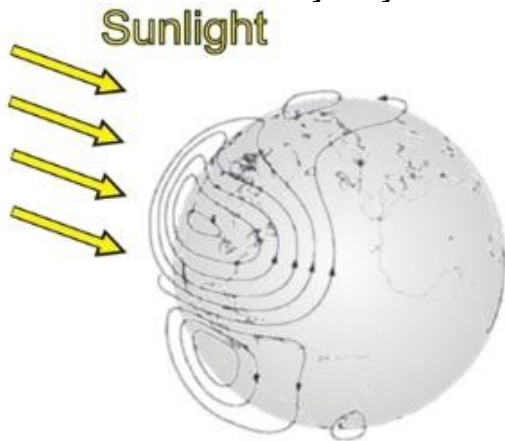


Figure 7: Daily Ak-indices (vertical lines) and sunspots (solid line)<sup>18</sup>



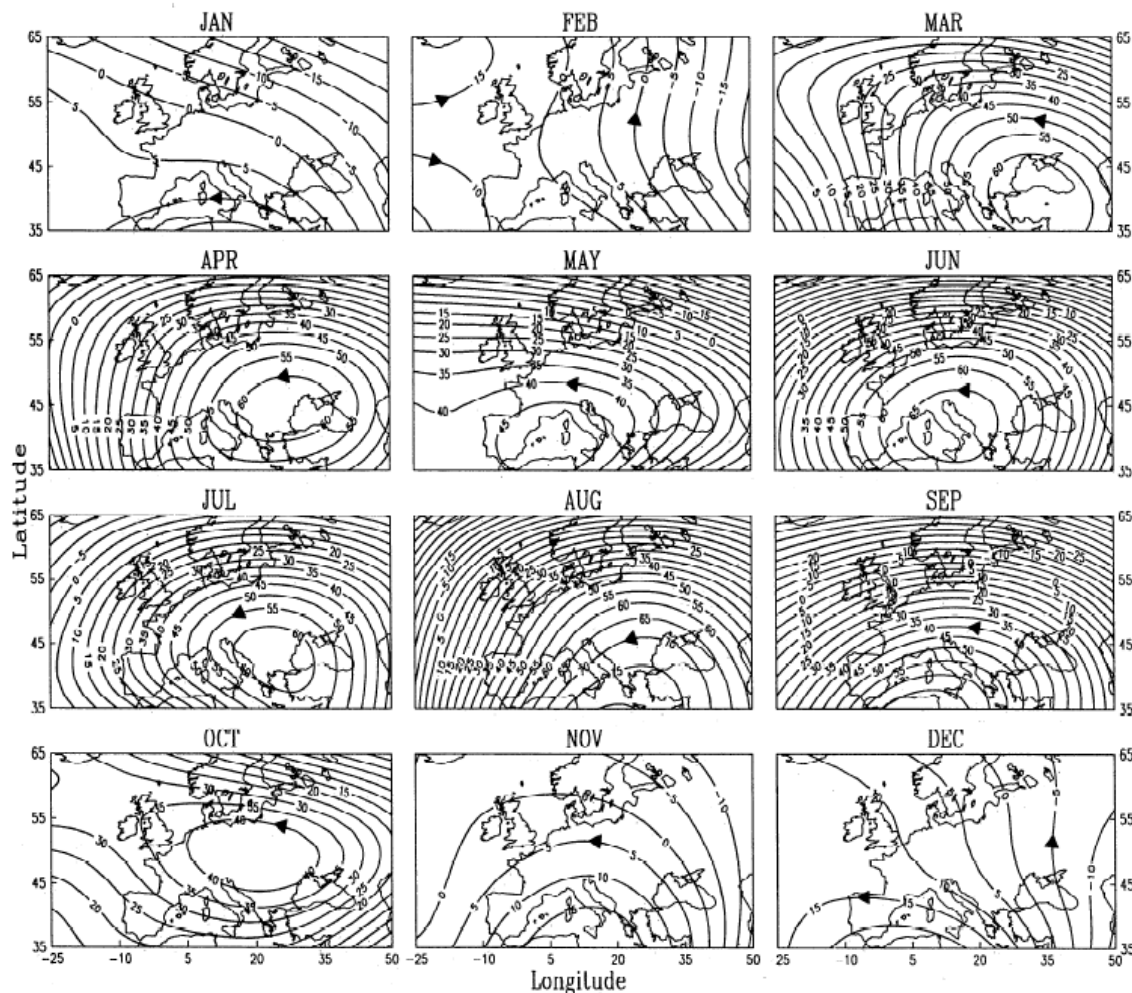
# Vanjsko polje

Dnevne varijacije – za vrijeme geomagnetski mirnih dana  $S_q$  ima dominantan utjecaj

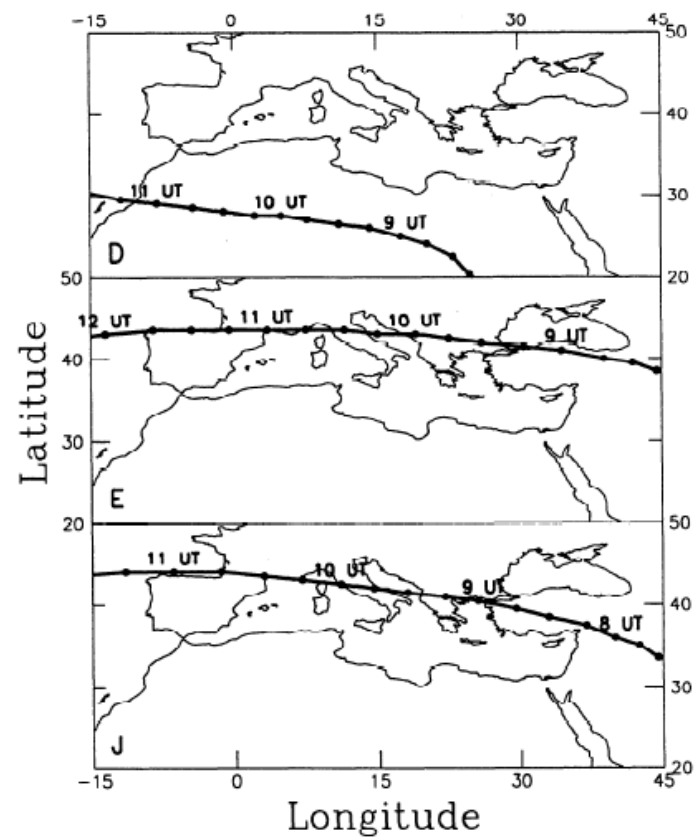


# Vanjsko polje

Primjer: na temelju srednjih vrijednosti mirnih dana mogu se modelirati i odrediti neke karakteristike  $S_q$  strujnog sistema u ionosferi



**Figure 4.** Contours of ionospheric equivalent current function evaluated at 0930 UT for the averages of quiet days (listed in Table 1) in the 12 months of 1987. Contour spacing is 5 kA. Arrowheads indicate direction of the current flow.

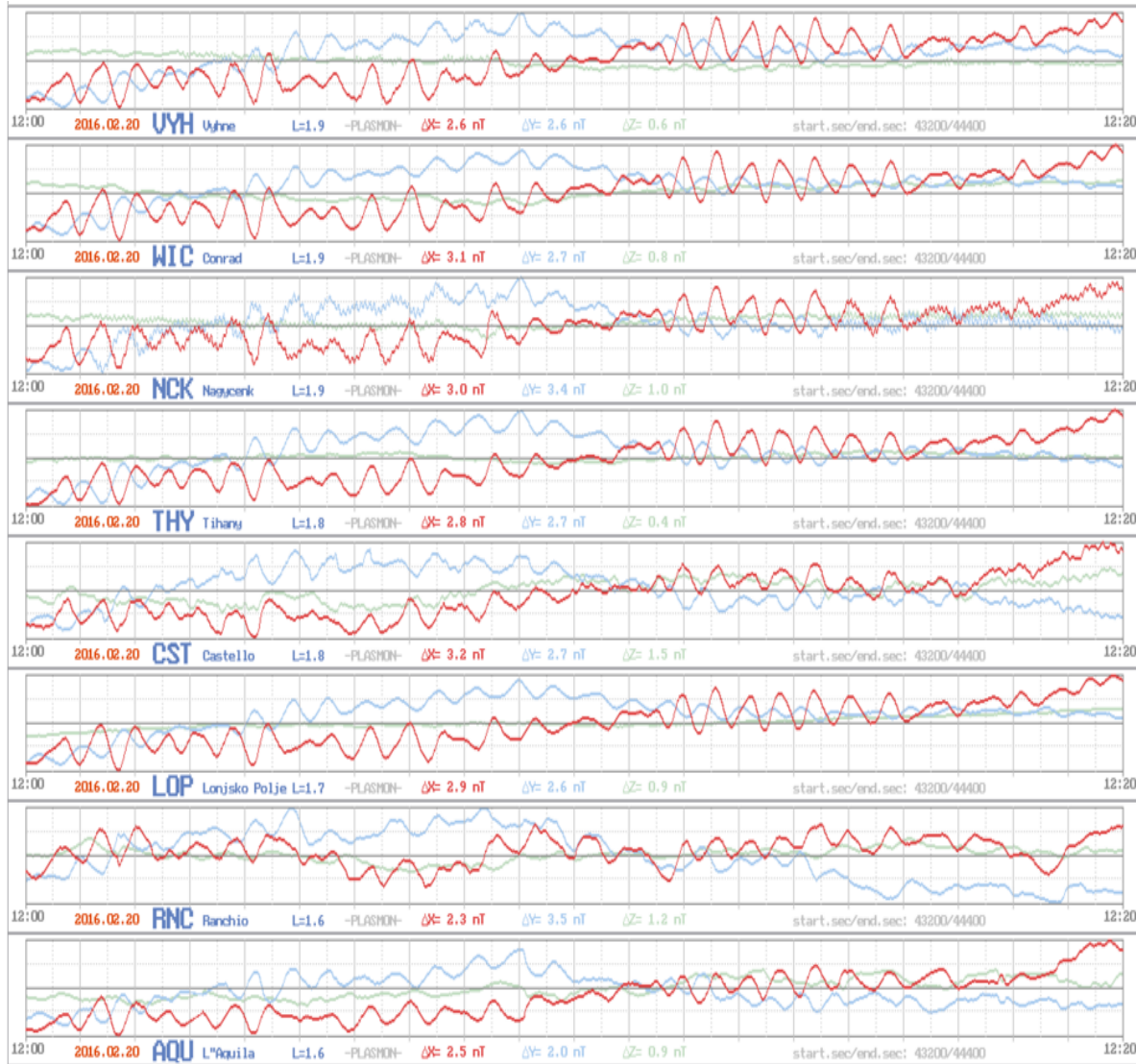


**Figure 8.** Seasonal evolution of the focus position of the external current system for the averages of quiet days of 1987. The positions are shown at every 15 min, upper labels indicate the positions at universal time hours.



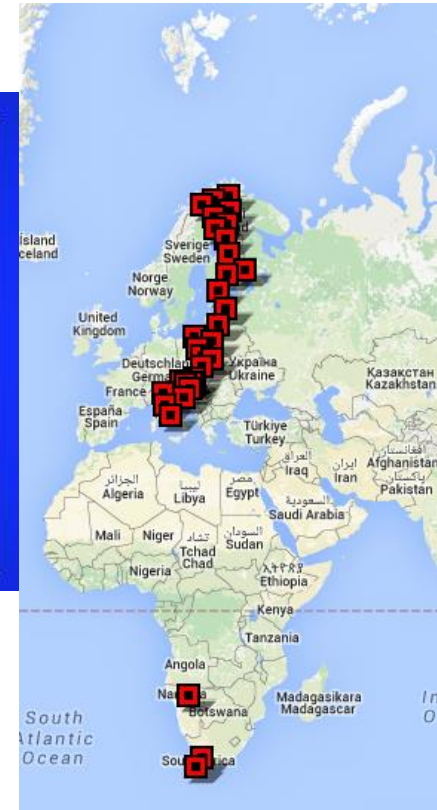
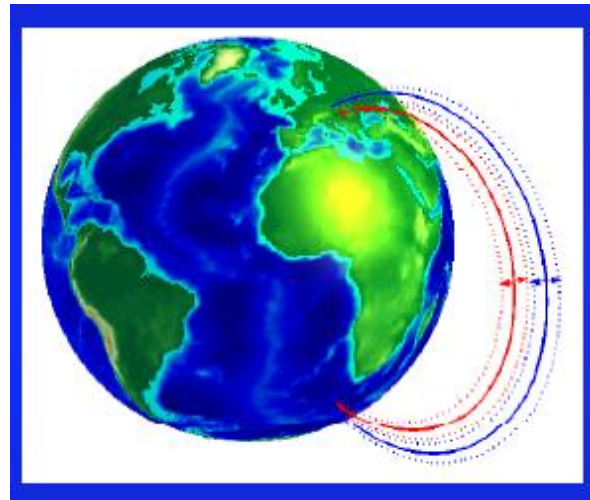
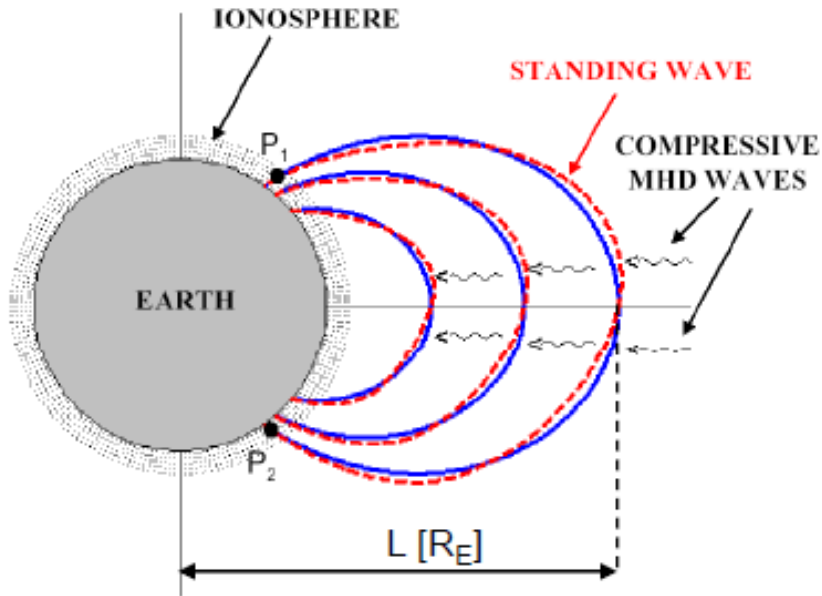
# Vanjsko polje

## Geomagnetske pulsacije



# Vanjsko polje

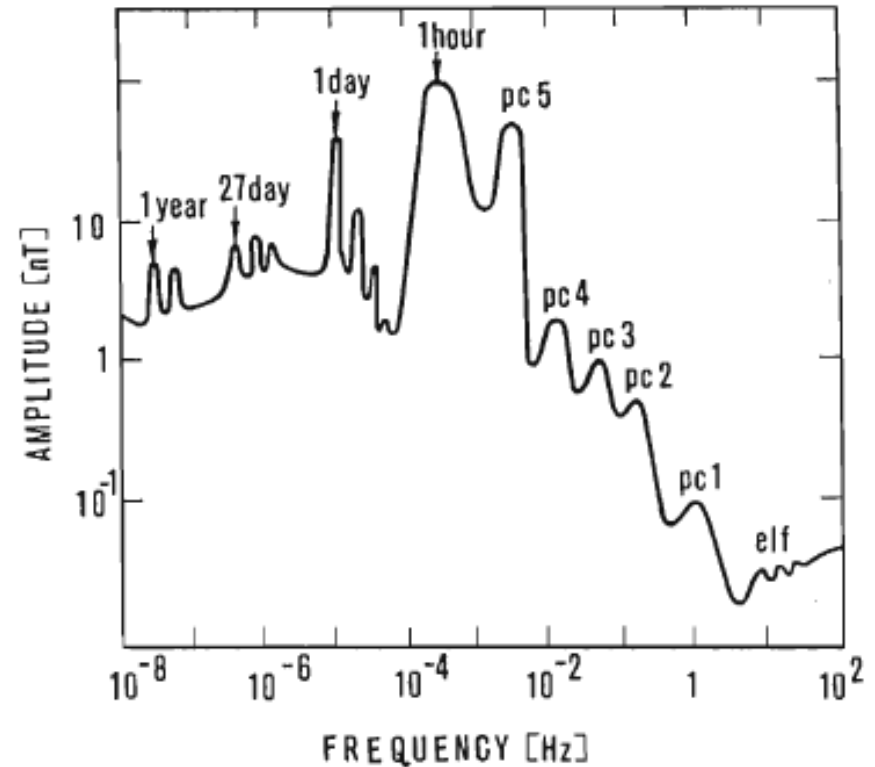
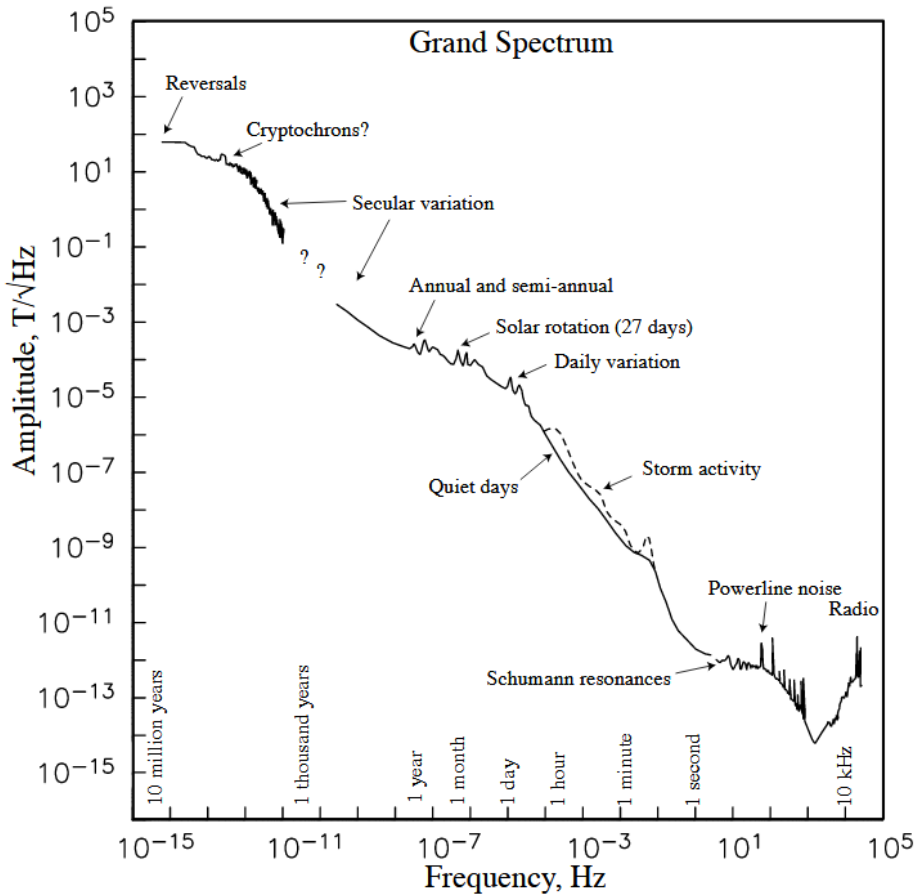
Geomagnetske pulsacije – primjena u motrenju i predikciji svemirskog vremena



- Motrenjem geomagnetskih pulsacija mogu se odrediti **rezonantne frekvencije** magnetskih silnica
- Iz rezonantnih frekvencija možemo dobiti informaciju o **gustoći plazme** na maksimalnim udaljenostima do koje silnice sežu - **plazmosfera**
- Sastav i gustoća plazme su bitan ulazni parametar za modele koji prognoziraju svemirsko vrijeme

# Ukupno geomagnetsko polje

- Sadrži doprinose glavnog polja (oko 95%, potječe iz Zemljine jezgre), polja kore i vanjskog polja (ionosfera i magnetosfera)
- Vrlo je promjenjivo na različitim vremenskim i prostornim skalama



# Osnovni tipovi mjerenja geomagnetskog polja

- **Opservatorijska mjerenja:** vrše se dugoročna, kontinuirana, apsolutna vektorska mjerenja visoke kvalitete s vremenskom rezolucijom manjom od minute
- **Satelitska mjerenja:** globalna mjerenja koja služe kao komplement globalnoj mreži opservatorija
- **Mjerenja sekularne varijacije:** mjerenja koja vršimo na prije definiranim točkama (sekularne stanice) u pravilnim vremenskim intervalima (npr. 2-5 godina)
- **Aeromagnetska i marinska mjerenja:** svrha im je detaljno mapiranje lokalnog/regionalnog litosferskog magnetskog polja.
- **Terenska istraživanja („surveys“):** ciljana mjerenja kojom dobivamo detaljan uvid u strukturu geomagnetskog polja na određenoj lokaciji – plitke anomalije



# Terenski i opservatorijski instrumenti i mjerenja

DIM

Dvije glavne kategorije instrumenata:

- 1) Apsolutni
- 2) Variometri

## 1) *Apsolutni (ops. + razne terenske izmjere):*

- **Skalarni magnetometri (PPM):** kontinuirano mjerenje totalnog intenziteta ( $F$ ) geomagnetskog polja
- **Geomagnetski teodoliti (DIM):** njime se vrše povremena manualna mjerenja deklinacije ( $D$ ) i inklinacije ( $I$ )

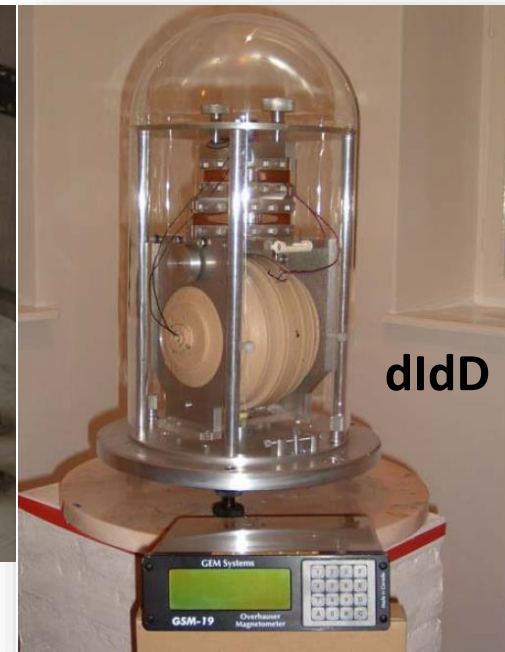
## 2) *Variometri (ops., variometarske postaje, satelitska mjerenja, rjeđe u terenskim izmjerama):*

- **Fluxgate variometri** (orijentacija  $X, Y, Z$  ili  $H, D, Z$ ): kontinuirana mjerenja varijacije g.m. elemenata
- **dIdD magnetometri:** kontinuirana mjerenja totalnog intenziteta ( $F$ ), te varijacije inklinacije ( $dI$ ) i deklinacije ( $dD$ )

PPM



FGE



dIdD

# Primjer: Vektorska izmjera na terenu

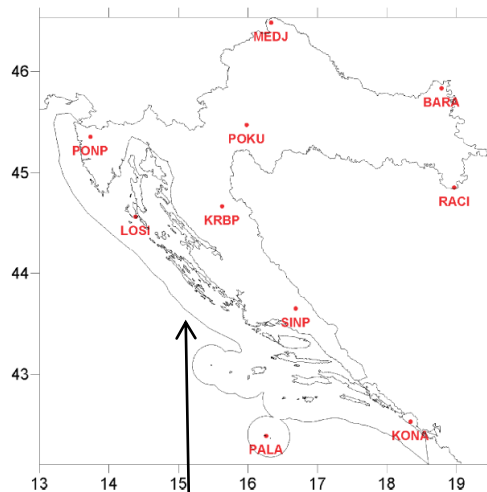
- Opažanjima prethodi (gradiometarska) križna izmjera
- Umjesto na pilar (u opservatoriju) DIM se postavlja na stativ
- Mjerenja se vrše na isti način kao u opservatoriju DIM + PPM (moguće je i korištenje mobilnog variometra)



- Ovakav tip izmjere tipičan je za izmjeru na sekularnoj mreži ili nacionalnoj mreži za mapiranje polja kore (gušća mreža)



# Primjer: Reprezentacija tzv. lokalnog normalnog polja

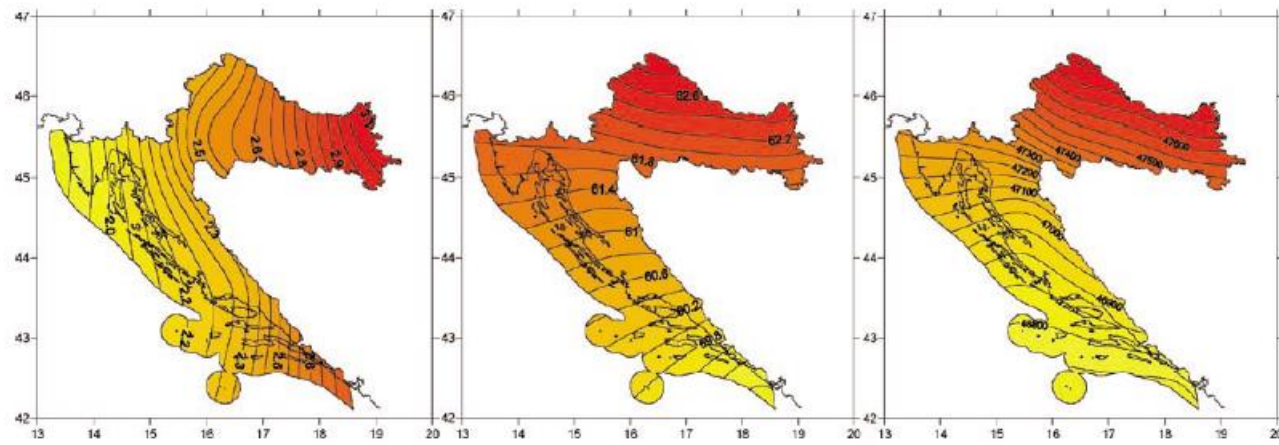


Hrvatska mreža  
geomagnetskih  
sekularnih točaka

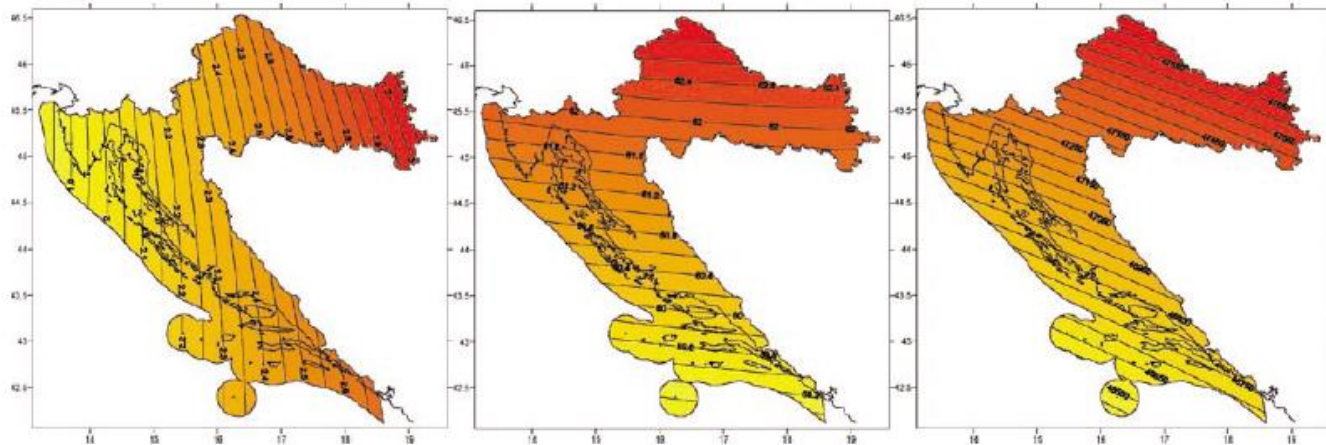
Normalno polje =  
referentno (glavno)  
polje za područje  
neke regije/države

$$E = a_0 + a_1(\varphi - \varphi_0) + a_2(\lambda - \lambda_0)$$

Polinomna prilagodba – za HR dovoljan je  
polinom I. stupnja

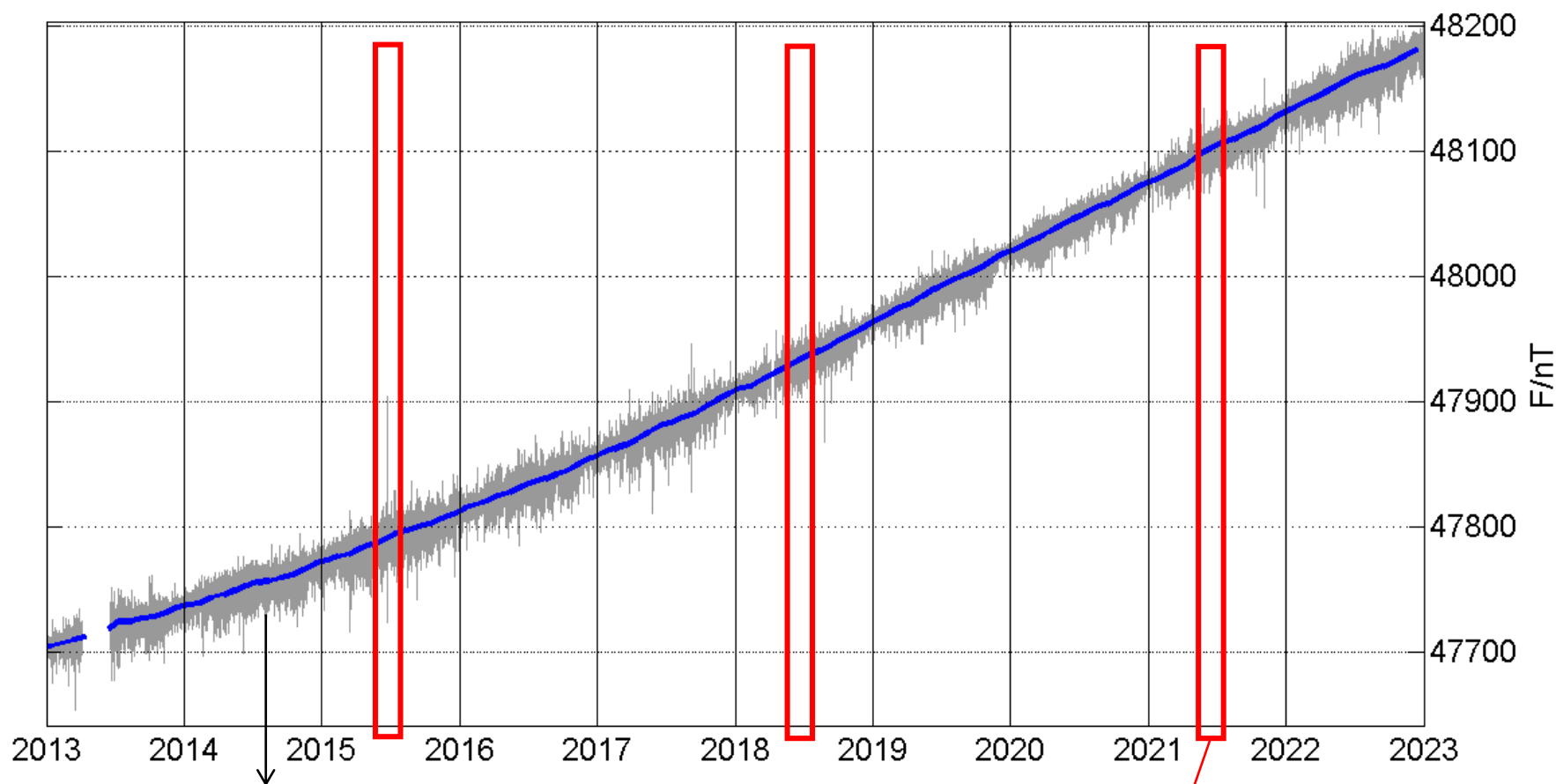


Slika 1. Reducirana deklinacija, inklinacija i totalni intenzitet za epohu 2004,5.



Slika 2. HGMRP2004,5 za D[dec.st.], I[dec.st.] i F[nT].

# Primjer: Informacija sa sekularna postaje i opservatorija



Kontinuirana mjerenja u geomagnetskom opservatoriju (primjer: Lonjsko polje)

- „Diskretna” periodična mjerenja. Informacija koju dobivamo sa sekularne mreže koristi se za izradu modela normalnog polja i sekularne varijacije (promjena glavnog polja).
- Sva mjerenja na sekularnoj mreži se obično reduciraju na epohu YYYY.5 (centar godine).
- Mjerenja na sekularnoj mreži se vrše ciklički u periodu od 2 do 5 godina, ne češće iz razloga jer su sekularne promjene u periodu  $> 2$  god. dovoljno velike u odnosu na pogreške mjerenja na sekularnoj postaji.



# Primjer: Lokalno normalno polje i sekularna varijacija

$$SV = (E^{2007.5} - E^{2004.5})/\Delta t \quad [\text{nT/god}]$$

$$SV(\lambda, \varphi) = e_{00} + e_{10}(\varphi - \varphi_0) + e_{01}(\lambda - \lambda_0)$$

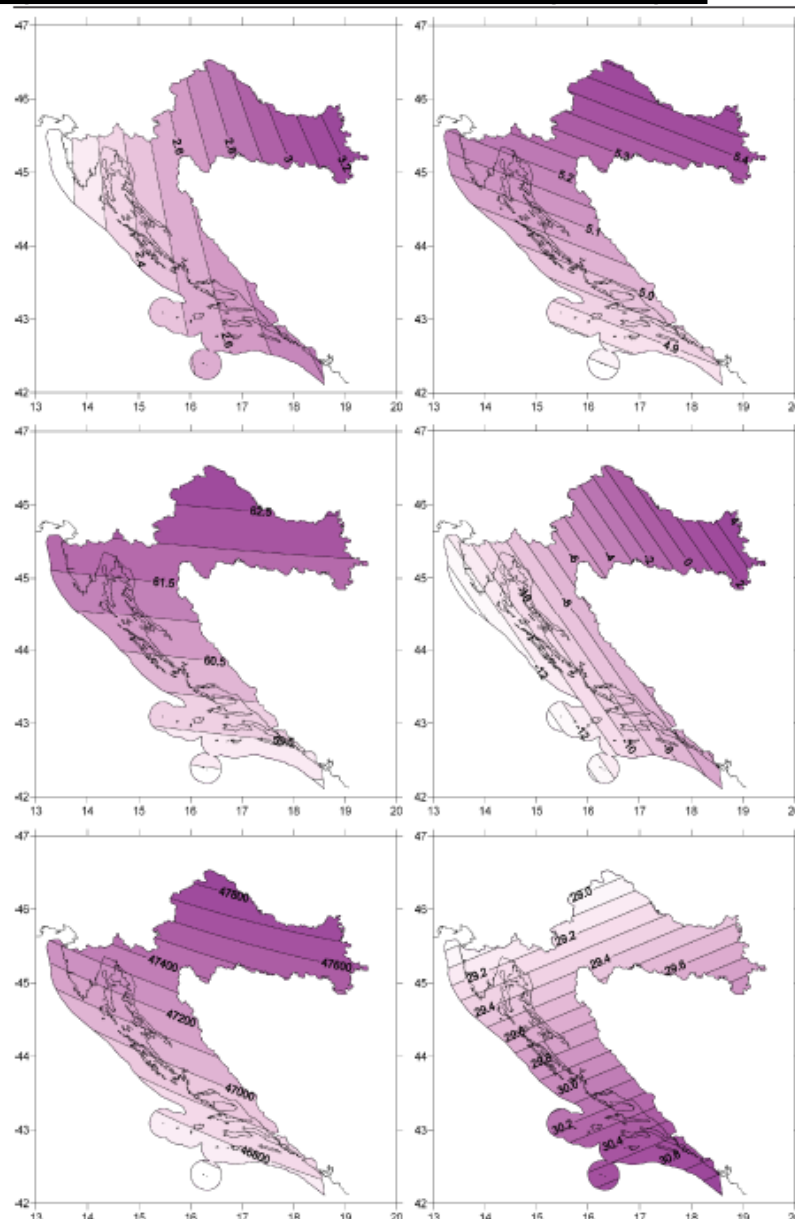
Tablica 4. Koeficijenti sekularne varijacije HGMRP-a za 2004,5 – 2007,5.

$SV$	$e_{00}$	$e_{01}$	$e_{10}$
$D$ [°/god.]	5,25	0,047	0,171
$I$ [°/god.]	-4	2,73	2,57
$F$ [nT/god.]	29,6	0,11	-0,38

Tablica 3.  $D$ ,  $I$  i  $F$  koeficijenti HGMRP-a za 2007,

$E$	$e_{00}$	$e_{01}$	$e_{10}$
$D$ [°]	2,76	0,1852	0,0837
$I$ [°]	61,54	0,0600	0,9440
$F$ [nT]	47386	66,6	302

Poznavanjem koeficijenata normalnog polja i sekularne varijacije za neku Epohu možemo procijeniti iznos polja u bilo kojem trenutku, pouzdanost procijene je unutar nekoliko godina.



Slika 2. Lijevo: HGMRP 2007,5 za  $D$  [°],  $I$  [°] i  $F$  [nT]. Desno: sekularna varijacija  $D$  [°/god.],  $I$  [°/god.] i  $F$  [nT/god.] normalnog polja za 2004,5 – 2007,5.

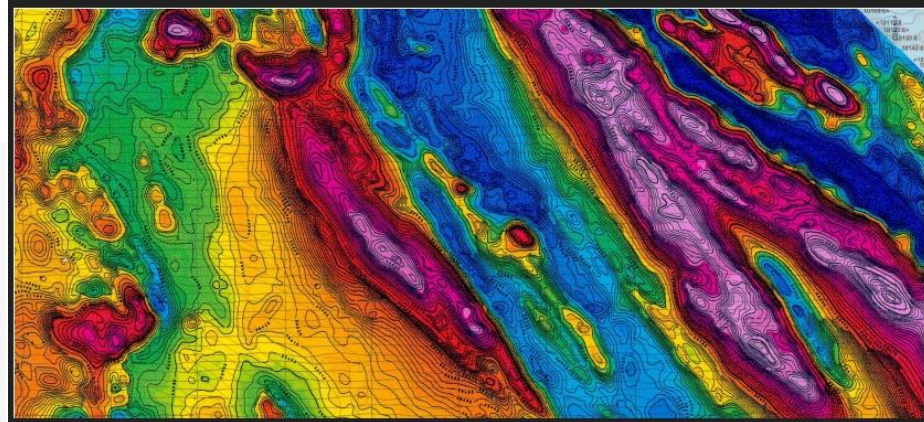
# Još nekoliko primjera...



GEM 2 Sensor Gradiometer



GEM 3 sensor Triaxial Gradiometer



Eagle Geophysics' Multi sensor Gradiometer, measures 10 vertical Gradients and several combinations of horizontal gradients.



# ➤ Opservatorij u Lonjskom polju (LON)



-napajanje iz solarnih panela <sup>31</sup>



# ➤ Ops. LON: Magnetometer LEMI-018

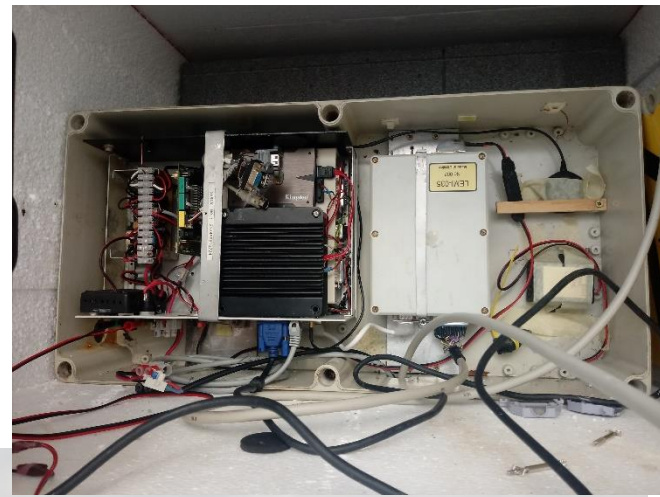




# ➤ Ops. LON: V (variometarska) kuća



**VM: LEMI-035**





➤ Ops. LON: V kuća VM: dIdD



## ➤ Ops. LON: A (apsolutna) kuća

Tu vršimo mjerenja apsolutnim magnetometrima DIM i PPM





## ➤ Ops. Lonjsko polje: C kuća

- Napajanje
- Sustavi za prikupljanje i transmisiju podataka





## ➤ PPM: princip mjerenja

<https://www.youtube.com/watch?v=10-aWh5c3yU>



Magnetski moment protona razmjeran je njegovoj kutnoj količini gibanja:

$$\mu = \gamma_p \cdot L \quad (1)$$

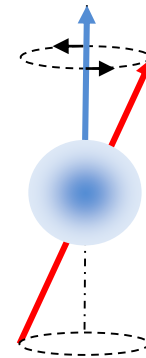
gdje je  $\gamma_p = 2.675\ 152\ 55\ 10^8\ T^{-1}s^{-1}$  žiromagnetski omjer protona, omjer magnetskog momenta i kutne količine gibanja protona.

Kutna frekvencija slobodne precesije protona u magnetskom polju je

$$\omega_p = \frac{\mu}{L} \cdot B \quad (2)$$

Mjerenjem frekvencije može se odrediti magnetsko polje Zemlje

$$B = \frac{2\pi}{\gamma_p} \cdot f \quad (3)$$

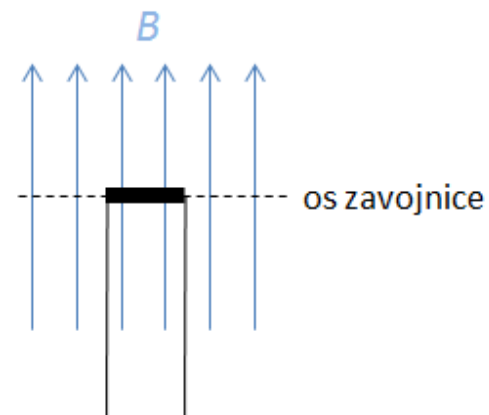


## ➤ DIM: princip mjerenja

Zavojnica senzora se postavlja okomito na magnetsko polje – traži se nul-pozicija



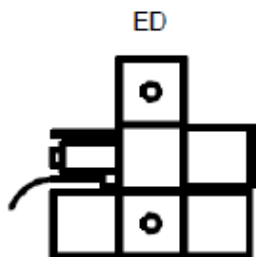
Nemagnetični teodolit koristimo za precizno očitavanje kutova



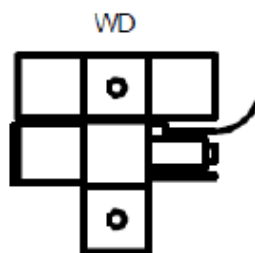
Inducirana EMS  $\approx 0$ , zaslon magnetometra prikazuje  $\approx 0$  nT

Opazanja Deklinacije i Inklinacije se vrše u četiri položaja

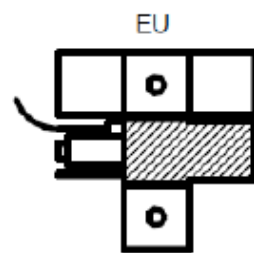
Npr. D:



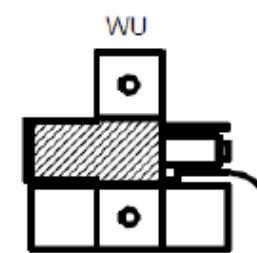
$V = 270$



$V = 270$



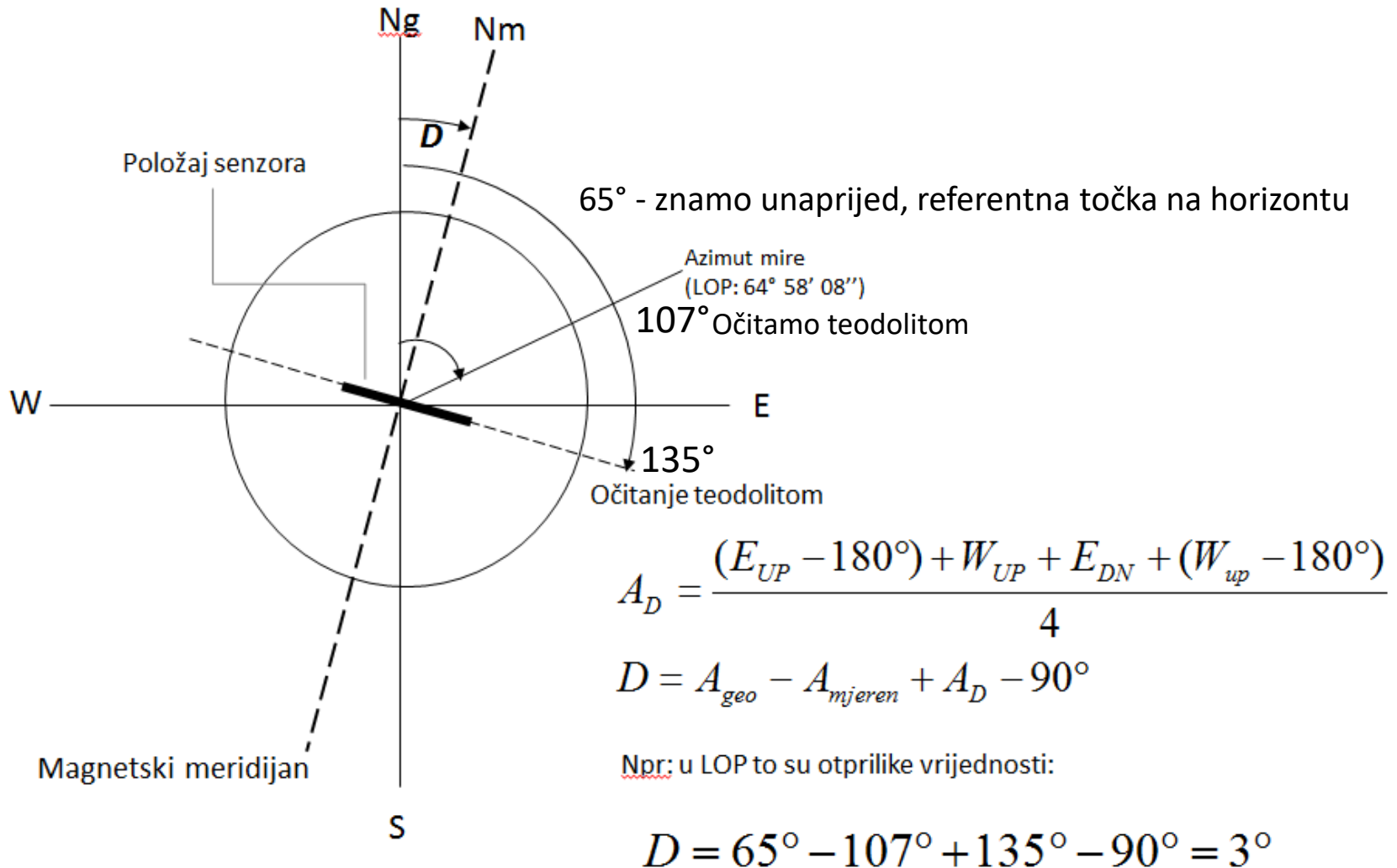
$V = 90$



$V = 90$

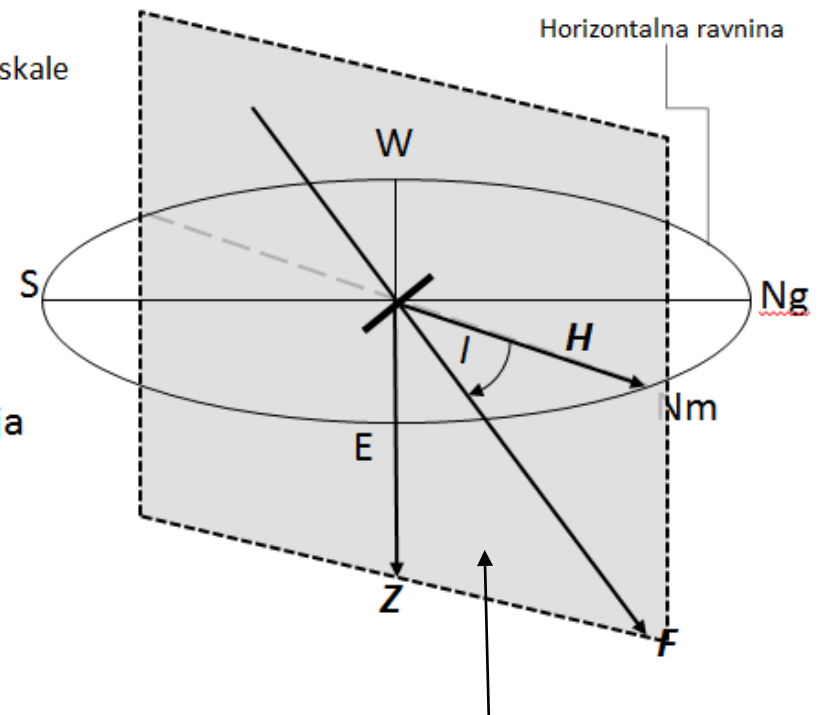
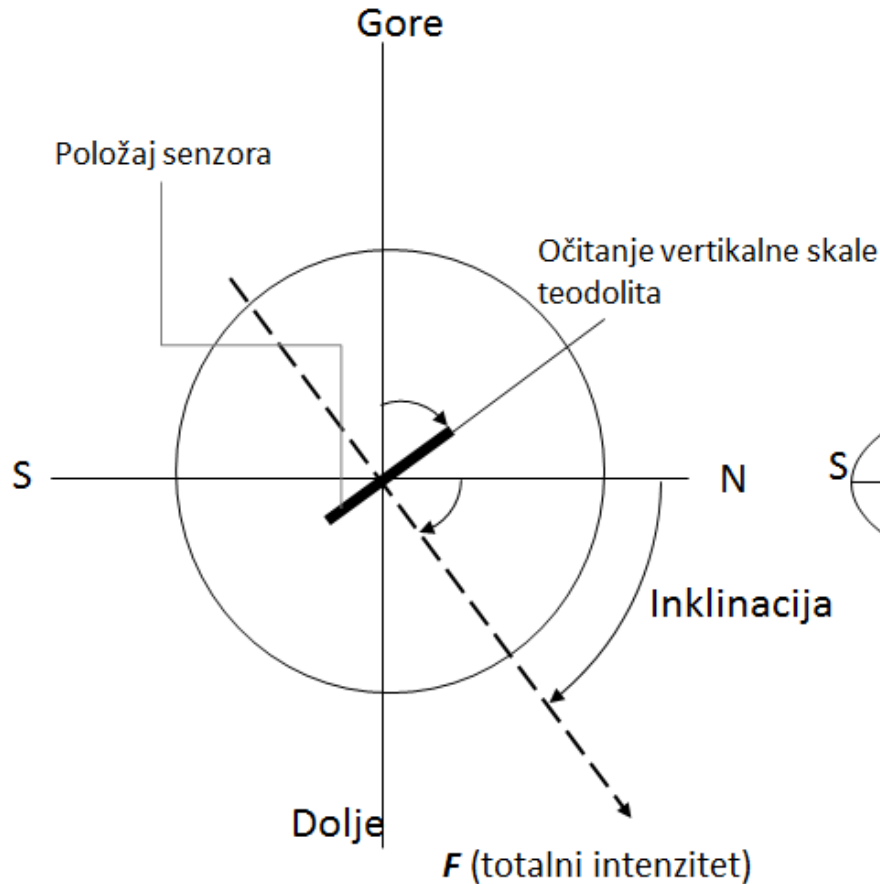
## ➤ DIM: princip mjerenja

Apsolutna DI mjerenja teodolitom - **DEKLINACIJA** (u horizontalnoj ravnini)



# ➤ DIM: princip mjerenja

Apsolutna DI mjerenja teodolitom - **INKLINACIJA** (u vertikalnoj ravnini)



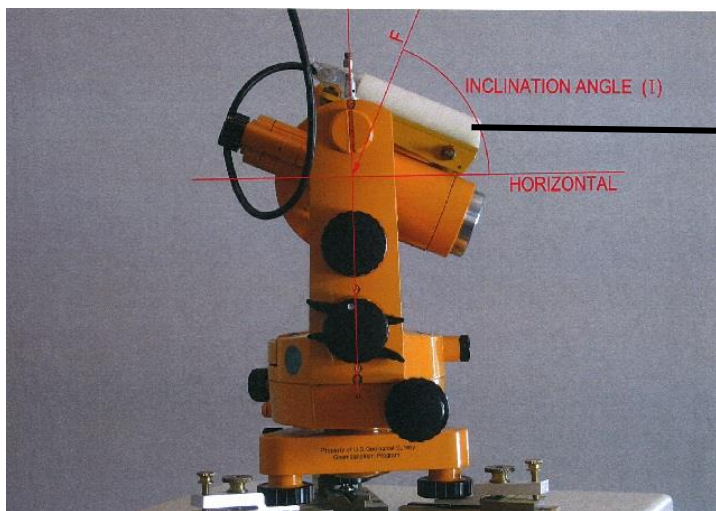
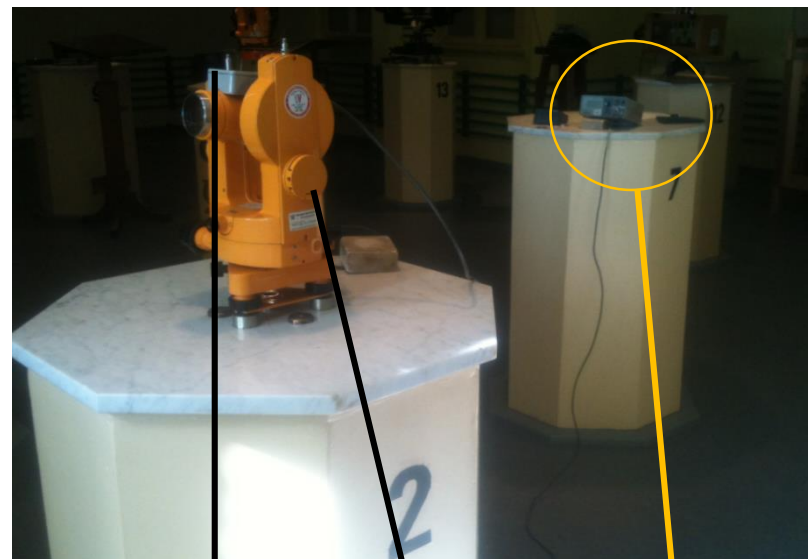
Vertikalna ravnina u kojoj se rotira os senzora/teleskopa tijekom očitavanja inklinacije

$$I = \frac{(360^\circ - N_{DN}) + (180 - S_{UP}) + N_{UP} + (S_{DN} - 180^\circ)}{4} \approx 62^\circ$$



# ➤ DIM motrenja: korekcija sistematskih pogrešaka

Apsolutna motrenja Deklinacije i Inklinacije („null” metoda)



„fluxgate” senzor

elektronička jedinica

nemagnetični teodolit

# Pogreške prilikom DIM motrenja

Princip mjerenja:

- 4 pozicije za D
- 4 pozicije za I

Jedno očitavanje (pozicija) deklinacije je superpozicija:

$$D_{reading} = D(t_0) + \delta D(t - t_0) + const + \Delta_{So}^D + \Delta_{\delta} + \Delta_{\varepsilon}^D + noise$$

Vrijednost D u ref. vremenu

Razlika D u odnosu na ref. vrijeme

±180° korekcija zbog skale teodolita (0-360°)

Pogreška zbog „offseta”  
elektronike

Pogreška zbog vertikalnog  
nepodudaranja optičke osi  
teodolita i osi „fluxgate”  
senzora

Pogreška zbog horizontalnog  
nepodudaranja optičke osi  
teodolita i osi „fluxgate” senzora

Šum, osjetljivost instrumenta  
pogreške i sl...

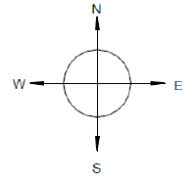


Slično je i za inklinaciju:

$$I_{reading} = I(t) + \delta I(t - t_0) + const + \Delta_{So}^I + \Delta_{\varepsilon}^I + noise$$

Pogreška zbog horizontalnog  
nepodudaranja optičke osi  
teodolita i osi „fluxgate” senzora  
ne utječe na mjerenja inklinacije

# Pogreške prilikom DIM motrenja



Uz pretp. da je šum = 0, konstantni faktor se trivijalno korigira i dobivamo 4 jednačbe iz 4 očitavanja deklinacije: (napomena 22.05.2020: ispravi formule)

$$E_{UP} = D_1(t_0) + \Delta_{S_0}^D - \Delta_{\delta} + \Delta_{\varepsilon}^D \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$W_{UP} = D_2(t_0) - \Delta_{S_0}^D - \Delta_{\delta} - \Delta_{\varepsilon}^D \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$E_{DOWN} = D_3(t_0) + \Delta_{S_0}^D + \Delta_{\delta} - \Delta_{\varepsilon}^D \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$W_{DOWN} = D_4(t_0) - \Delta_{S_0}^D + \Delta_{\delta} + \Delta_{\varepsilon}^D \quad \dots\dots\dots(4)$$

Eq. (1+2+3+4)/4:

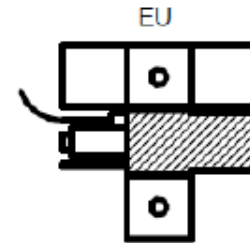
$$\bar{D}(t_0) = (E_{UP} + W_{UP} + E_{DN} + W_{DN}) / 4$$

Eq. (3+4-1-2))/4:

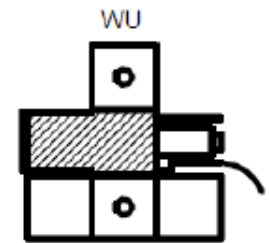
$$\delta = \Delta_{\delta} = \frac{(E_{DN} + W_{DN}) - (E_{UP} + W_{UP})}{4}$$

Eq. (1-2-4-3)\*H\*180°/4\*π:

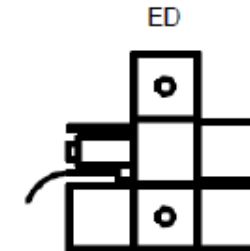
$$S_0^D = \frac{\Delta_{S_0}^D}{4} \frac{H \cdot 180^\circ}{\pi} = \frac{((E_{UP} - W_{UP}) - (W_{DN} - E_{DN}))}{4} \frac{H \cdot 180^\circ}{\pi}$$



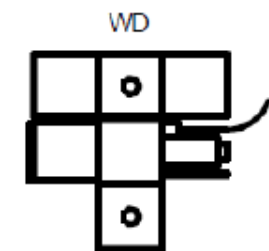
V = 90



V = 90



V = 270



V = 270

Eq. (1-2-3+4)/4tan(I):

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta_{\varepsilon}^D}{\tan(I)} = \frac{(E_{UP} - W_{UP}) - (E_{DN} - W_{DN})}{4 \tan(I)}$$

# Pogreške prilikom DIM motrenja

Korekcija predznaka sa prethodnog slide-a (formule Matlab):

Deklinacija:

```
D1 = Di (1) - del - eps_d*tand(nanmean(I_DIDD)) + 57.296*S0d/nanmean(H_DIDD);  
D2 = Di (2) - del + eps_d*tand(nanmean(I_DIDD)) - 57.296*S0d/nanmean(H_DIDD);  
D3 = Di (3) + del + eps_d*tand(nanmean(I_DIDD)) + 57.296*S0d/nanmean(H_DIDD);  
D4 = Di (4) + del - eps_d*tand(nanmean(I_DIDD)) - 57.296*S0d/nanmean(H_DIDD);
```

Inklinacija:

```
I1 = Ai (1) - eps_i - 57.296*S0i/nanmean(F_DIDD);  
I2 = Ai (2) - eps_i + 57.296*S0i/nanmean(F_DIDD);  
I3 = Ai (3) + eps_i - 57.296*S0i/nanmean(F_DIDD);  
I4 = Ai (4) + eps_i + 57.296*S0i/nanmean(F_DIDD);
```

- Pogledati izraze 5.11 i 5.12 – Jankowski i Sucksdorff, 1996



## ➤ VM (troosni „fluxgate” magnetometar): princip mjerenja



<https://www.youtube.com/watch?v=EWHIMBrls6o>

### Orijentacija:

Ako su horizontalne osi senzora postavljene u smjeru **geografskog** sjevera i istoka – instrument mjeri u **XYZ** sustavu.

Ako su horizontalne osi senzora postavljene u smjeru **magnetskog** sjevera i istoka – instrument mjeri u **HEZ**, odnosno u **HDZ** sustavu.

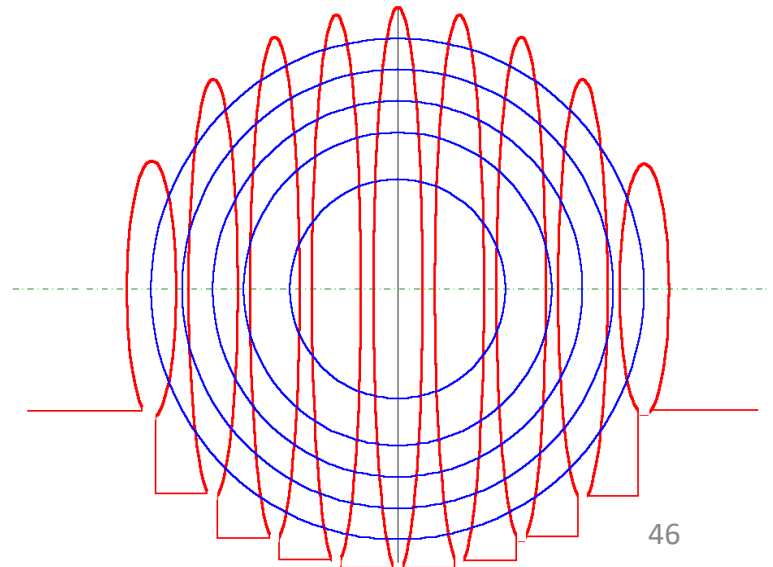
# ➤ dI/dD (delta I – delta D)



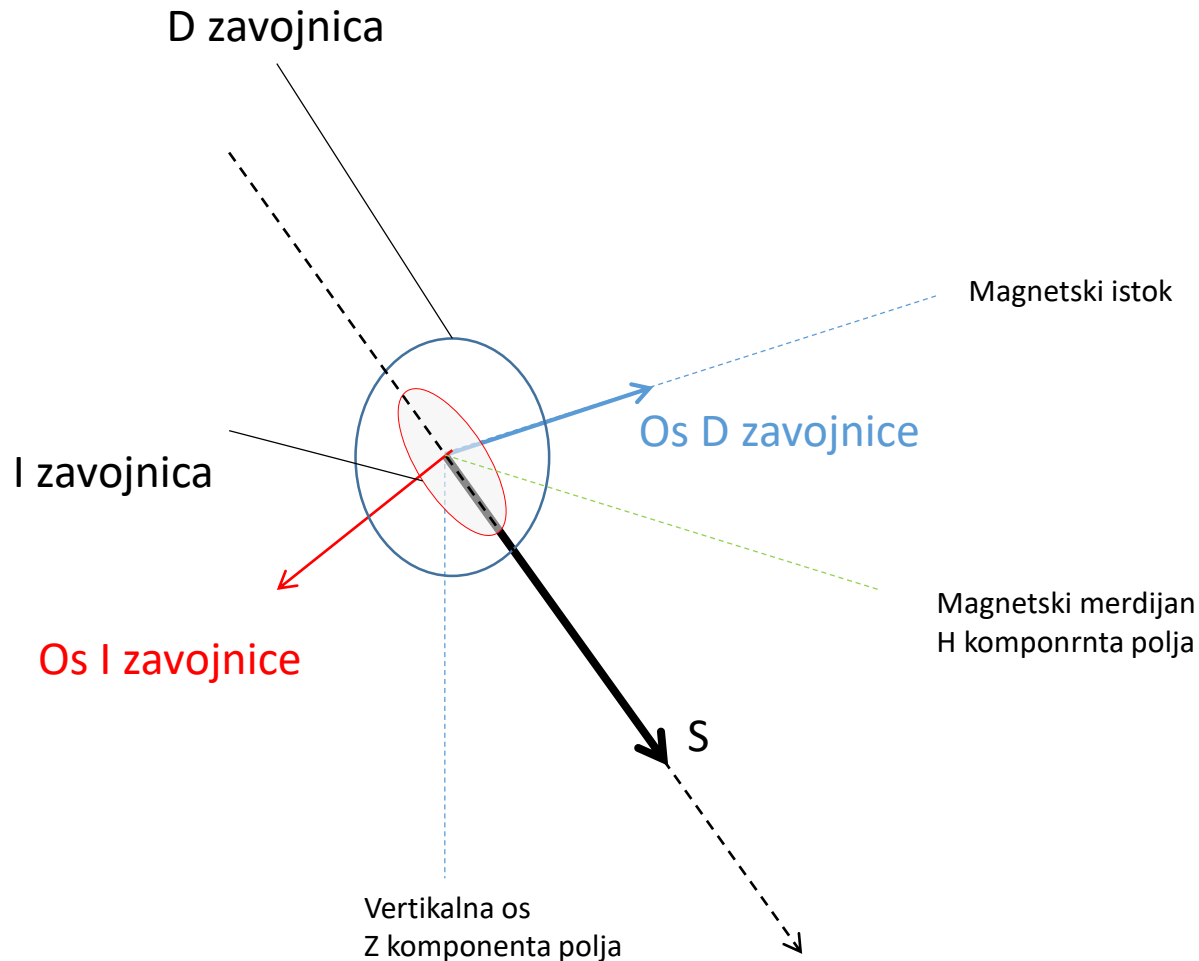
$$|dD = \sin^{-1} \frac{D_p^2 - D_m^2}{4F \cos I \sqrt{\frac{D_p^2 + D_m^2}{2} - F^2}} \quad (5.10)$$

$$dI = \sin^{-1} \frac{I_p^2 - I_m^2}{4F \sqrt{\frac{I_p^2 + I_m^2}{2} - F^2}} \quad (5.11)$$

$D_p$  and  $D_m$ ,  $I_p$  and  $I_m$  are biased magnetic fields while  $F$  is the unbiased field. With known  $I$ ,  $D$ , and  $F$ , all components can be computed.



# SID – koordinatni sustav



- Os D zavojnice je kvazi-paralelna s magnetskim istokom, a presjek zavojnice nalazi u vertikalnoj ravnini u kojoj leže F, Z i H
- Os I zavojnice je okomita na totalni intenzitet polja (F), a sama zavojnica odnosno presjek leži u ravnini u paralelnoj sa F



# Računanje SID komponenti

(Schott and Leroy 2001, Heilig 2007). The D- and I-coil bias magnetic fields are  $A_d = [(D_p^2 + D_m^2 - 2F^2)/2]^{0.5}$  and  $A_i = [(I_p^2 + I_m^2 - 2F^2)/2]^{0.5}$ , respectively. The total field components in SDI-frame are (Schott *et al.* 2001):  $B_D = (D_p^2 - D_m^2)/4A_d$ ,  $B_I = (I_p^2 - I_m^2)/4A_i$  and  $B_S = (F^2 - B_D^2 - B_I^2)^{0.5}$ .

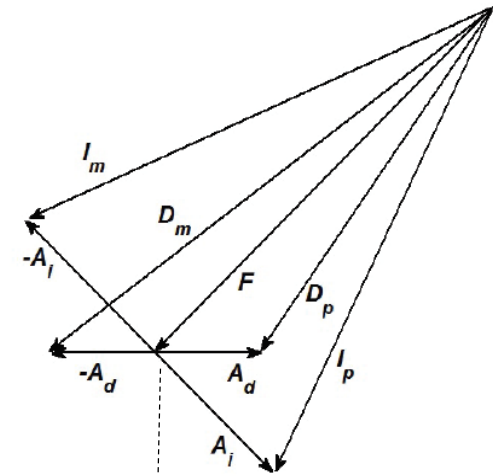
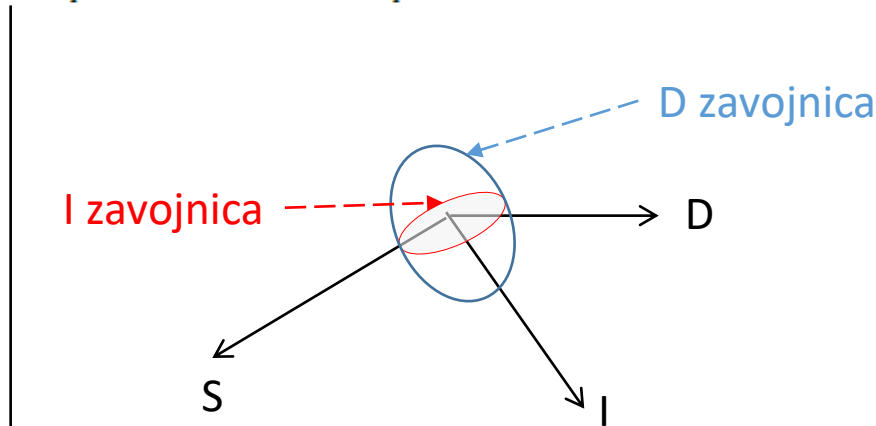


Fig. 1b. Measurement principle of P-dIdD:  $D_p$ ,  $D_m$ ,  $F$  (the local total field),  $I_p$  and  $I_m$  are measured components;  $A_d$  and  $A_i$  are D-coils and I-coils bias fields, respectively.



Senzor skalarnog magnetometra

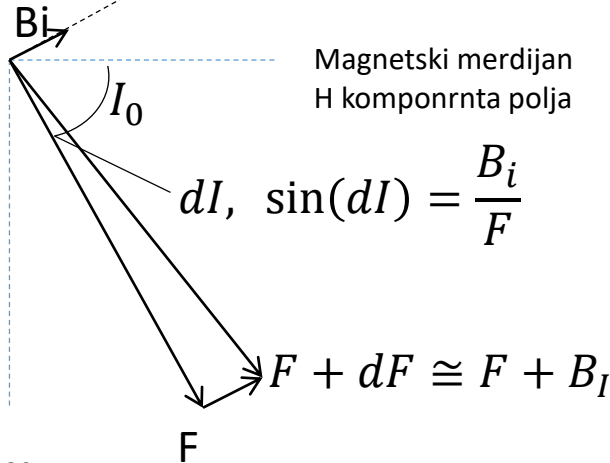
1. PPM (skalarni senzor) mjeri, **F, Dm, Dp, Im, Ip (nT)**
2. Iz **F, Dm, Dp, Im, Ip**, prvo računamo polja (**Bd, Bi, Bs**) duž osi S,I,D
3. Zatim možemo naći varijacije D i I, tj. **dI & dD**

%timestamp	F	SQ	Dm	SQ	Dp	SQ	Im	SQ	Ip	SQ	I	dI	D	dD
0.0	47836.15	99	49238.73	99	49355.04	99	49301.11	99	49303.80	99	62.05695	0.00666	3.92647	0.619
5.0	47836.12	99	49238.72	99	49355.02	99	49301.05	99	49303.72	99	62.05690	0.00661	3.92641	0.619
10.0	47836.13	99	49238.72	99	49355.02	99	49301.12	99	49303.70	99	62.05667	0.00638	3.92641	0.619
15.0	47836.13	99	49238.67	99	49355.03	99	49301.05	99	49303.75	99	62.05697	0.00668	3.92674	0.619
20.0	47836.12	99	49238.66	99	49355.01	99	49301.06	99	49303.79	99	62.05704	0.00675	3.92669	0.619

# Računanje dI i dD komponenti

Vertikalna ravnina

Os I zavojnice



Vertikalna os  
Z komponenta polja

$$B_i = \frac{I_+^2 - I_-^2}{4A_i}, \quad (1)$$

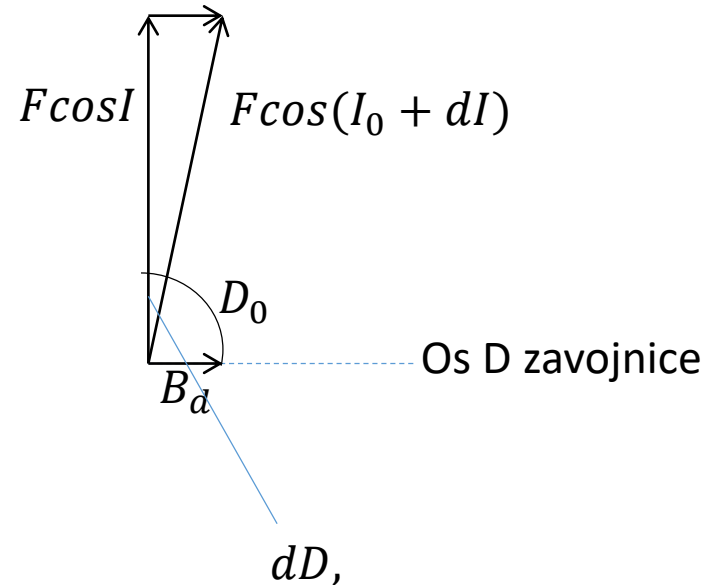
$$B_d = \frac{D_+^2 - D_-^2}{4A_d}, \quad (2)$$

$$B_s = \sqrt{F^2 - B_i^2 - B_d^2}, \quad (3)$$

$$A_i = \sqrt{(I_+^2 + I_-^2 - 2F^2)/2}, \quad (4)$$

$$A_d = \sqrt{(D_+^2 + D_-^2 - 2F^2)/2}, \quad (5)$$

Horizontalna ravnina



$$\sin(dD) = \frac{B_d}{F \cos I}$$

$$|dD = \sin^{-1} \frac{D_p^2 - D_m^2}{4F \cos I \sqrt{\frac{D_p^2 + D_m^2}{2} - F^2}} \quad (5.10)$$

$$dI = \sin^{-1} \frac{I_p^2 - I_m^2}{4F \sqrt{\frac{I_p^2 + I_m^2}{2} - F^2}} \quad (5.11)$$

# Princip kalibracije – ilustrativni primjer:

DIM – vršimo manualna tjedna  
apsolutna motrenja Deklinacije i  
Inklinacije na lokaciji A



Vektorski magnetometar (VM) –  
bilježi kontinuirano relativne  
varijacije polja (npr. h, d, z – mag.  
LEMI-35) na lokaciji V



Skalarni magnetometar (S) – **obvezno**  
**tijekom** DIM motrenja (ili  
kontinuirano) apsolutni iznos polja  
F(S) na lokaciji S



Drugim skalarnim magnetometrom vršimo  
povremena mjerenja F(A) na lokaciji A kako  
bismo korigirali F(S) na lokaciju A





# Princip kalibracije – ilustrativni primjer:

## 1) Apsolutne vrijednosti

$$\text{A} + \text{S} = \text{DIF}(\hat{t}) \quad \text{Apsolutne vrijednosti}$$

Vrijeme DI motrenja teodolitom

DI – direktno iz motrenja






$$F(\hat{t}) = F(S) + s, \quad \text{gdje je} \quad s = F(A) - F(S) \approx \text{konst.}$$


Naposljetku iz DIF možemo naći HDZ ili XYZ (ovisno o orijentaciji VM)

# Princip kalibracije – ilustrativni primjer:

## 1) Kalibracijske vrijednosti

 Imamo kontinuirane varijacije polja npr. hdz

 =  -  Odstupanje motrenih apsolutnih HDZ (A) od relativnih hdz(V) u trenutku **DI motrenja t'**



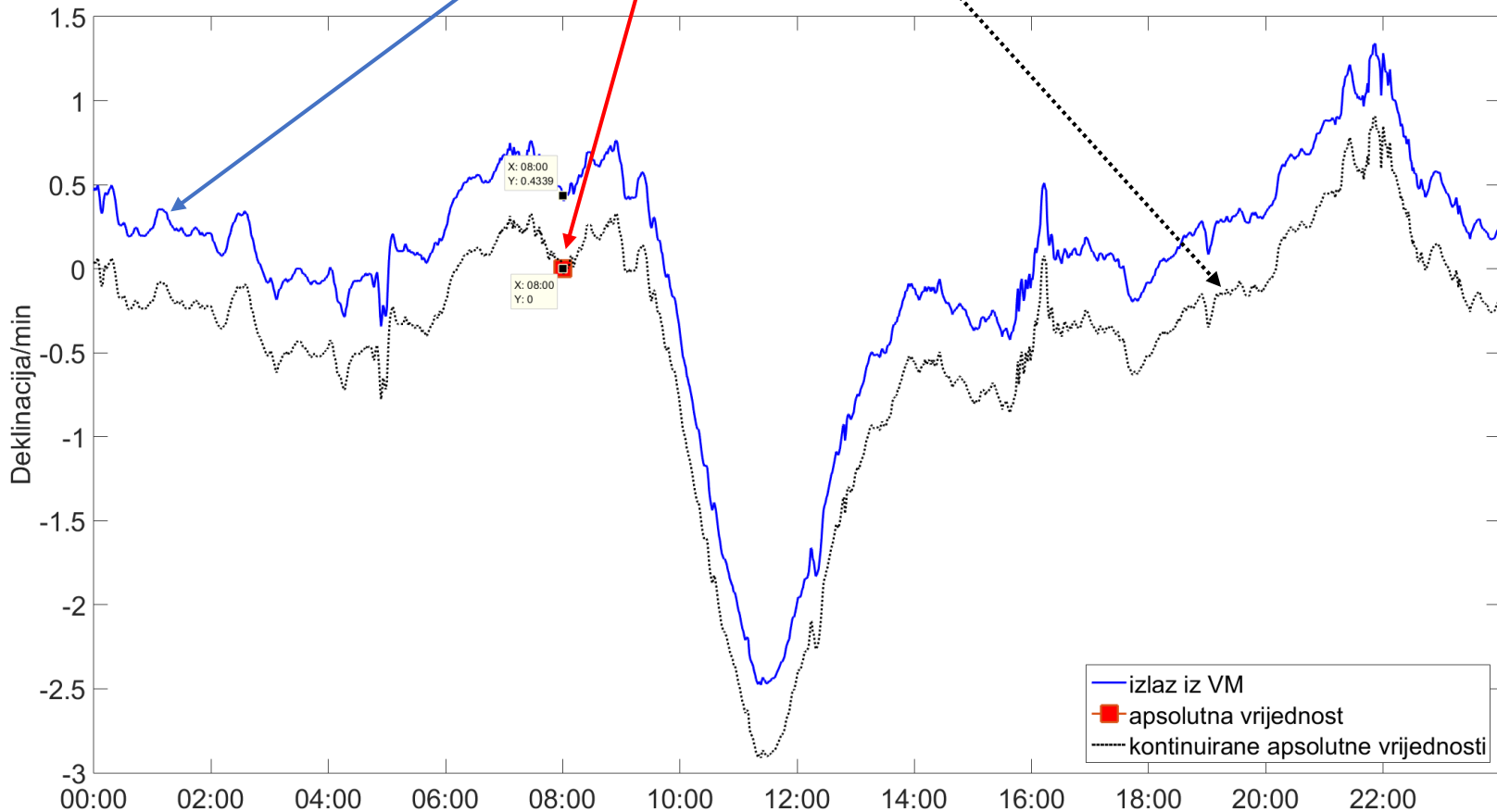
Motrena kalibracijska ili tzv. bazna vrijednost (imamo je za svaku komponentu)

# Princip kalibracije – ilustrativni primjer:

## 3) Dodatno grafičko pojašnjenje

*Jednostavan numerički primjer:*

- VM je u  $t$  zabilježio  $d(V,t) = 0.434$  min
- Zamislamo da je motrena apsolutna vrijednost  $D(A,t) = 0^\circ$
- Tada je  $B_d = D(A,t) - d(V,t) = -0.434$  min
- Kontinuirani apsolutni iznosi Deklinacije su  $D(A,t) = B_d + d(A,t)$





# Princip kalibracije – numerički primjer kako to izgleda u praksi:

DIF: THEO 010A - DIM fluxgate, model G

Proton Mag.: dIdD (GEM, Systems)

Lokacija: Lonjsko polje (45,41° N, 16,66° E)

Komentar: 2,2 cel

Mjerenje mire	Stupnjevi						Geografski azimut mire		
	Senzor gore			Senzor dolje			°	'	"
	°	'	"	°	'	"			
	288	24	30	108	24	33	64	58	08
	288	24	28	108	24	35			

D	Pozicija senzora	UTC			Stupnjevi			Vertikalna pozicija na teodolitu
		sat	minuta	sekunda	°	'	"	
	E_gore	12	47	40	317	04	56	90°
	W_gore	12	49	05	137	08	52	
	E_dolje	12	50	30	137	10	02	270°
	W_dolje	12	51	50	317	07	21	

Magnetski meridijan	°	'	"
(E_g+W_g+E_d+W_d)/4	227	07	48

[1]

I	Pozicija senzora	UTC			Stupnjevi			Horizontalna pozicija na teodolitu
		sat	minuta	sekunda	°	'	"	
	N_dolje	12	54	35	297	59	01	[1] 47 07 48
	S_gore	12	55	40	117	59	11	
	N_gore	12	57	30	62	03	14	[1]-180° 227 07 48
	S_dolje	12	58	35	242	02	45	



Rezultat manualnih motrenja

Opažene/motrene kalibracijske (bazne) vrijednosti

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date	Time	Var H/nT	Var D/nT	Var Z/nT	F/nT		
2	2.1.2015	11:47:40	36,016	133,026	38,988	47767,85	[1]	LEMI-035
3								
4	2.1.2015	11:49:05	36,365	132,779	39,069	47768,08		
5								
6	2.1.2015	11:50:30	36,405	132,261	39,028	47767,96		
7								
8	2.1.2015	11:51:50	36,062	132,079	39,029	47767,81		
9								
10	2.1.2015	11:54:35	37,036	130,823	39,098	47768,24		
11								
12	2.1.2015	11:55:40	37,182	130,405	39,166	47768,46		
13								
14	2.1.2015	11:57:30	36,349	130,277	39,262	47768,29		
15								
16	2.1.2015	11:58:35	35,977	130,323	39,377	47768,10		
17								

Podaci variometra i skalarnog mag. u trenutcima opažanja

**Absolute values:**

UTC [1]	D	I	F/nT	H/nT	X/nT	Y/nT	Z/nT
	°	'		F · cosI	H · cosD	H · sinD	F · sinI
11:47:40	3	62	1,98	47765,47	22400,27	22353,80	1439,16
	41,48						42187,30

**Base values:**

UTC [1]	H <sub>B</sub>	D <sub>B</sub>	Z <sub>B</sub>	I <sub>B</sub>	ΔF = F - F <sub>GSM</sub>
	nT	°	Z - (10[1]) nT	°	F/nT - (15)[1]
		3,351065		62,049180	
		3		62	
11:47:40	22363,86	21,06	42148,31	2,95	54
					-2,38

# Kalibracija nam omogućuje tranziciju s relativnih na apsolutne vrijednosti:

% Lonjsko Polje Geomagnetic Observatory (lat: 45.4081°N; long: 16.6592°E; h=95m)  
% MINUTE DATA - LEMI variometer system  
%  
%  
| VARIATION DATA | ABSOLUTE DATA |  
%YYYY MM DY HH MM SS DOY | vH/nT | vD/° | vZ/nT | X/nT | Y/nT | Z/nT | F/nT |  
2015 2 11 0 0 0 42 | 35.071 | 0.3915646 | 53.657 | 22355.04 | 1462.61 | 42198.57 | 47776.62  
2015 2 11 0 1 0 42 | 34.921 | 0.3915987 | 53.760 | 22354.88 | 1462.61 | 42198.67 | 47776.65  
2015 2 11 0 2 0 42 | 34.845 | 0.3913909 | 53.786 | 22354.81 | 1462.53 | 42198.70 | 47776.63  
2015 2 11 0 3 0 42 | 34.847 | 0.3908073 | 53.829 | 22354.83 | 1462.30 | 42198.74 | 47776.67  
2015 2 11 0 4 0 42 | 34.927 | 0.3903156 | 53.840 | 22354.92 | 1462.11 | 42198.75 | 47776.72  
2015 2 11 0 5 0 42 | 35.134 | 0.3900574 | 53.849 | 22355.14 | 1462.03 | 42198.76 | 47776.82  
2015 2 11 0 6 0 42 | 35.125 | 0.3899942 | 53.861 | 22355.13 | 1462.00 | 42198.77 | 47776.83  
2015 2 11 0 7 0 42 | 35.231 | 0.3903993 | 53.934 | 22355.22 | 1462.17 | 42198.84 | 47776.94  
2015 2 11 0 8 0 42 | 35.208 | 0.3908694 | 54.035 | 22355.19 | 1462.35 | 42198.94 | 47777.02  
2015 2 11 0 9 0 42 | 35.212 | 0.3917040 | 53.995 | 22355.17 | 1462.67 | 42198.90 | 47776.99  
2015 2 11 0 10 0 42 | 35.526 | 0.3928659 | 54.079 | 22355.46 | 1463.15 | 42198.99 | 47777.21  
2015 2 11 0 11 0 42 | 35.832 | 0.3936198 | 54.101 | 22355.74 | 1463.46 | 42199.01 | 47777.37  
2015 2 11 0 12 0 42 | 36.274 | 0.3941149 | 54.092 | 22356.17 | 1463.68 | 42199.00 | 47777.57  
2015 2 11 0 13 0 42 | 36.579 | 0.3945939 | 54.128 | 22356.46 | 1463.89 | 42199.04 | 47777.75  
2015 2 11 0 14 0 42 | 36.649 | 0.3949971 | 54.084 | 22356.52 | 1464.05 | 42198.99 | 47777.74  
2015 2 11 0 15 0 42 | 36.676 | 0.3952317 | 54.003 | 22356.54 | 1464.15 | 42198.91 | 47777.68  
2015 2 11 0 16 0 42 | 36.841 | 0.3953359 | 53.963 | 22356.71 | 1464.20 | 42198.87 | 47777.73  
2015 2 11 0 17 0 42 | 36.889 | 0.3952012 | 53.938 | 22356.76 | 1464.15 | 42198.85 | 47777.73  
2015 2 11 0 18 0 42 | 36.934 | 0.3950321 | 53.911 | 22356.81 | 1464.09 | 42198.82 | 47777.72  
2015 2 11 0 19 0 42 | 37.006 | 0.3948250 | 53.908 | 22356.88 | 1464.01 | 42198.82 | 47777.75  
2015 2 11 0 20 0 42 | 37.022 | 0.3945492 | 53.847 | 22356.91 | 1463.90 | 42198.76 | 47777.71  
2015 2 11 0 21 0 42 | 36.911 | 0.3941258 | 53.790 | 22356.81 | 1463.73 | 42198.70 | 47777.61  
2015 2 11 0 22 0 42 | 36.757 | 0.3935730 | 53.763 | 22356.67 | 1463.50 | 42198.67 | 47777.51  
2015 2 11 0 23 0 42 | 36.733 | 0.3930747 | 53.783 | 22356.65 | 1463.31 | 42198.69 | 47777.52  
2015 2 11 0 24 0 42 | 36.652 | 0.3929010 | 53.805 | 22356.58 | 1463.24 | 42198.71 | 47777.50

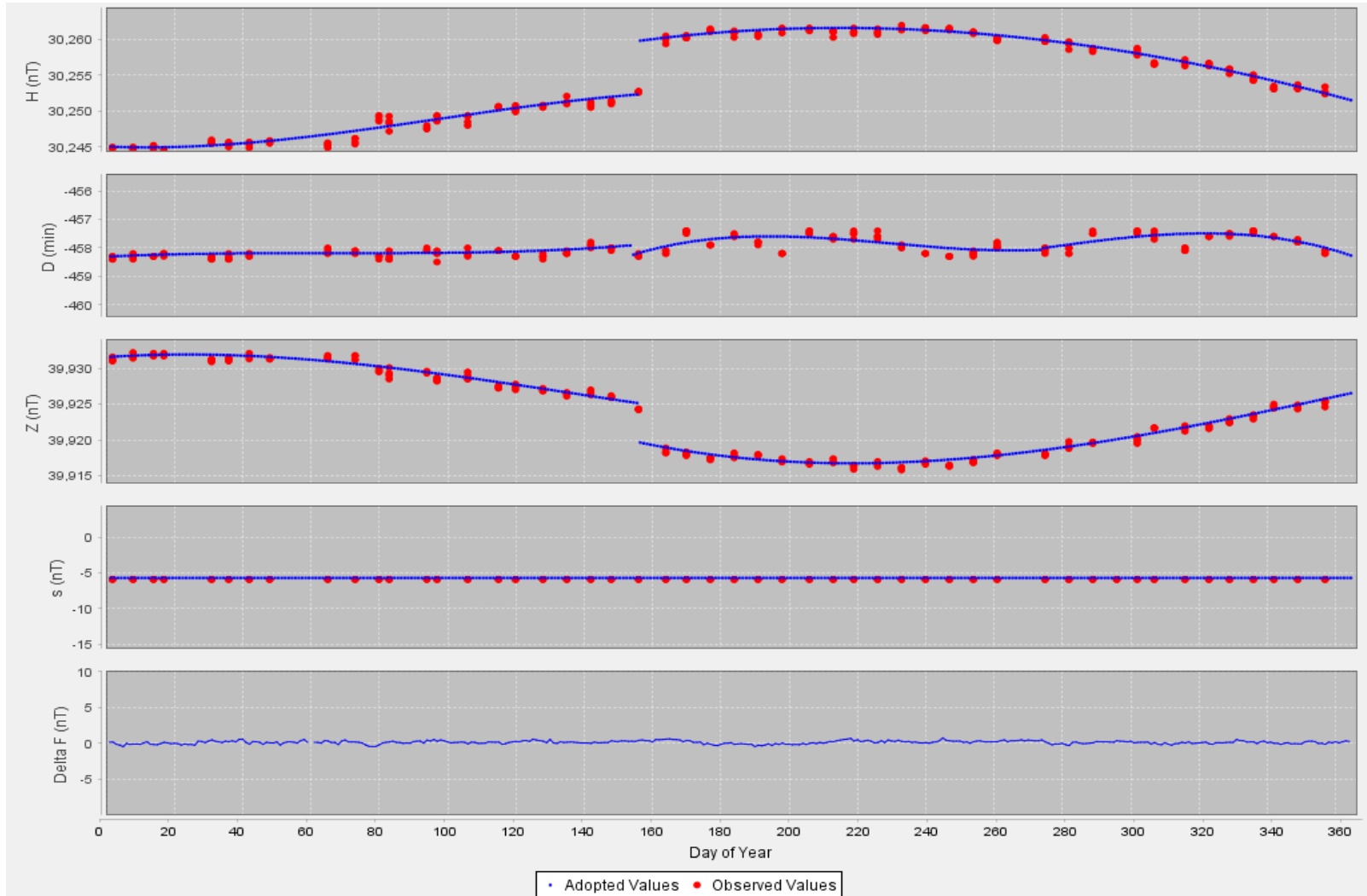
Ln 4, Col 54

- Kalibracija na „DIF etalon” također eliminira dugoročne nestabilnosti koje su prisutne u sirovim podacima vektorskih magnetometara

# Primjer godišnje kalibracijske krivulje - FGM:

Tokom godine se na tjednoj bazi (ili češće) vrše opažanja, a mjerene kalibracijske vrijednosti aproksimiraju se kontinuiranim, prilagođeni krivuljama.

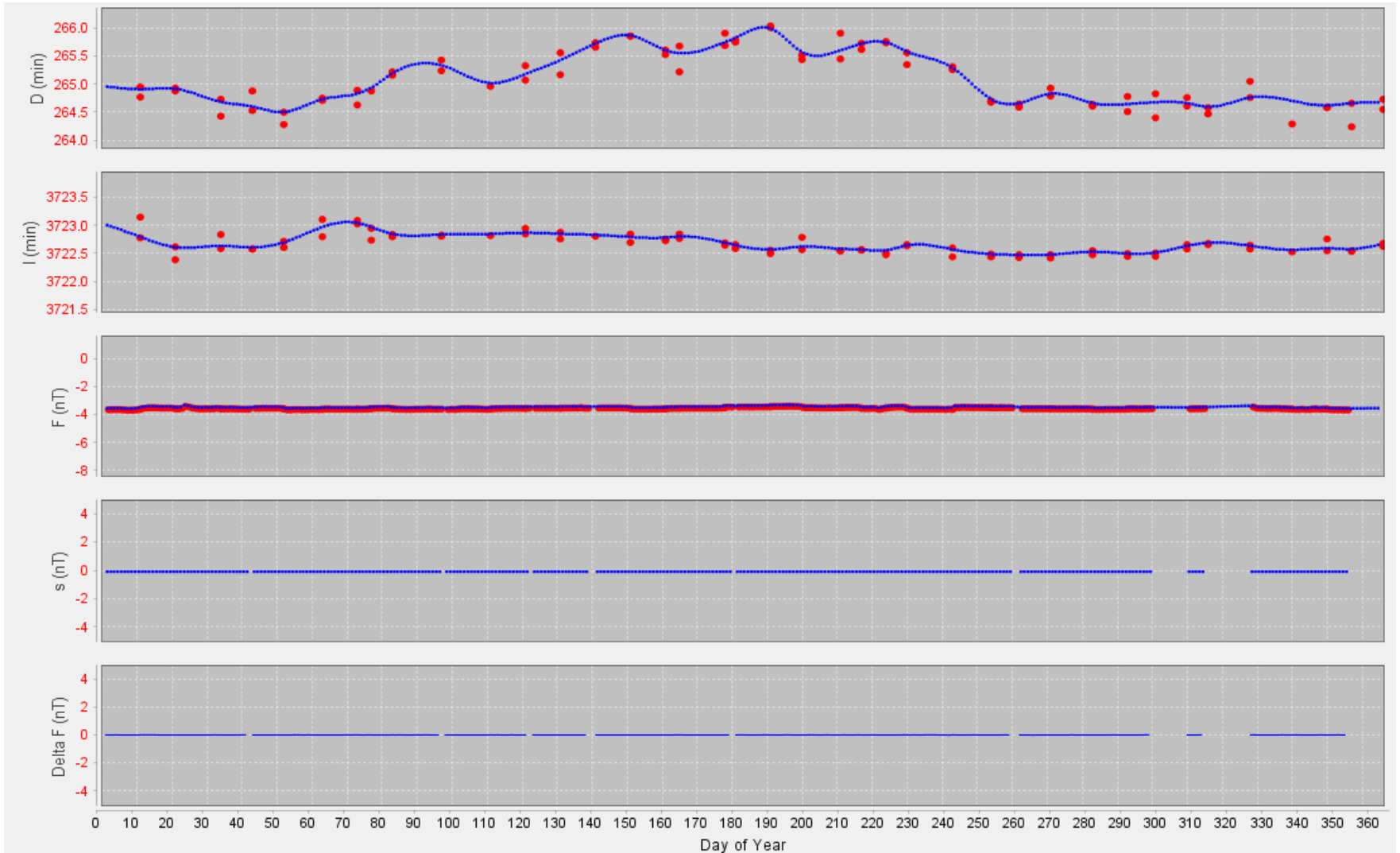
PRIMJER FLUXGATE MAGNETOMETAR:  $\Delta F \approx 0$





# Primjer godišnje kalibracijske krivulje - dIdD:

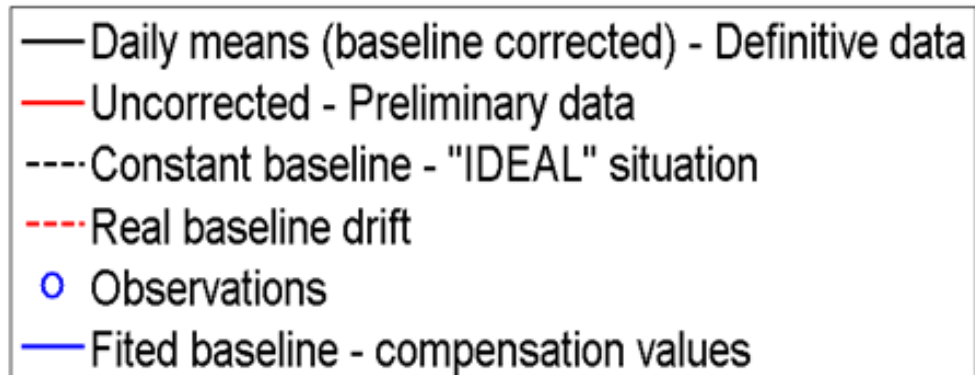
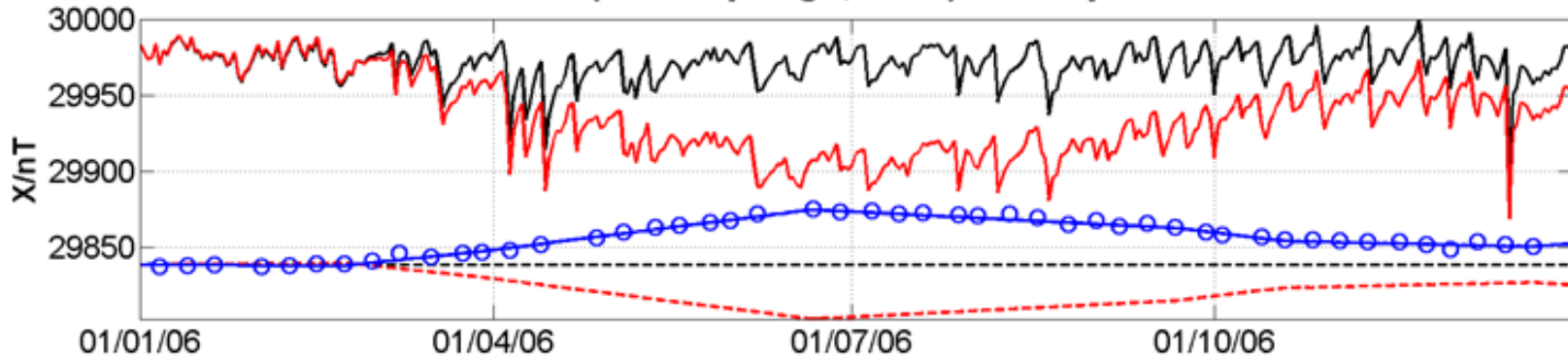
PRIMJER DIDD MAGNETOMETRA (LONJSKO POLJE):  $\Delta F = 0$



## Ponovimo još jednom – svrha kalibracije:

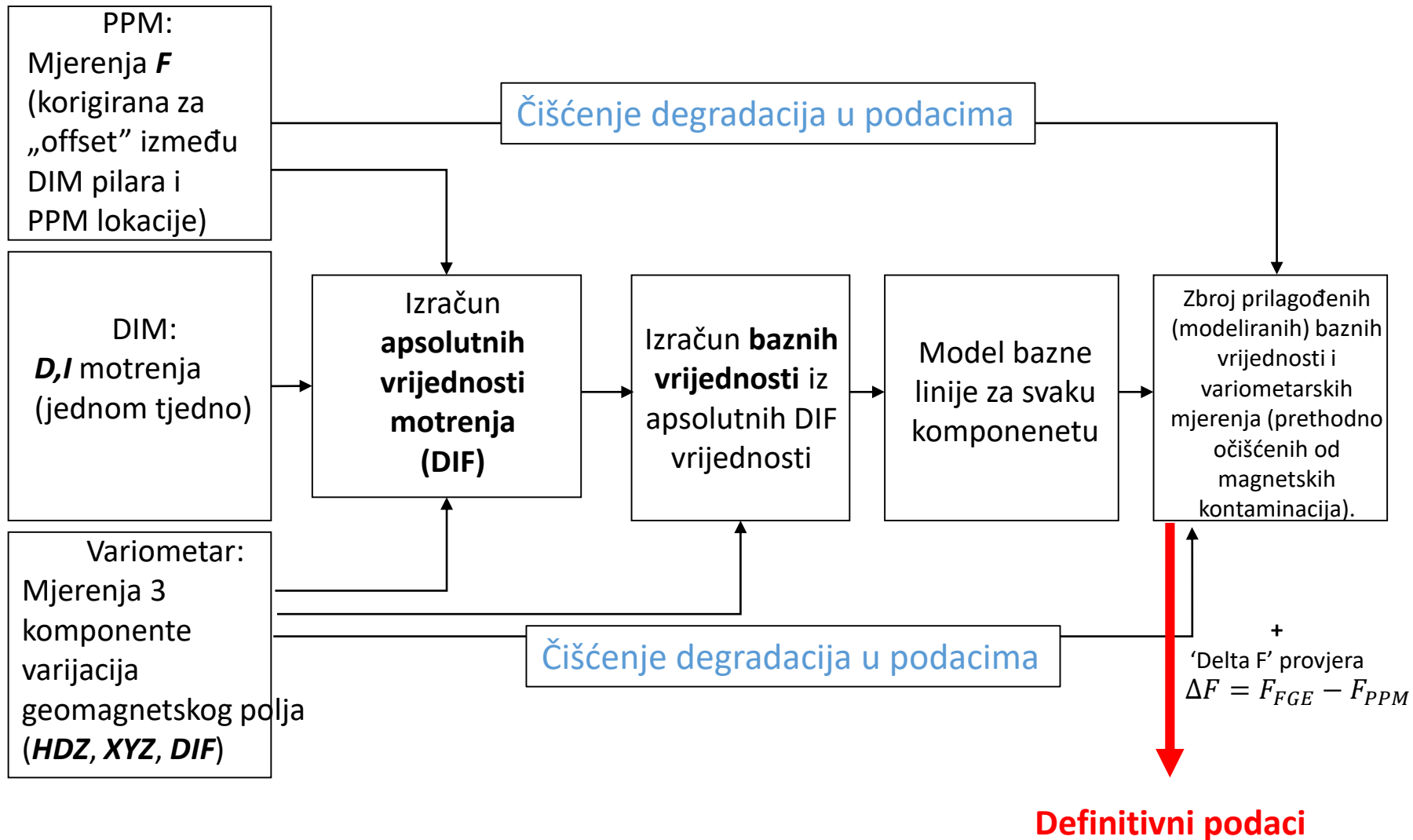
- Iz manualnih (apsolutnih) DIM opservacija nalazimo kalibracijske parametre (bazne vrijednosti) za opservatorijski variometar.
- Interpolacijom ili prilagodbom modela (npr. polinomi, spline funkcije) baznih vrijednosti dobivamo godišnje bazne linije kojima korigiramo drift u variometarskim podacima.
- Dugoročni driftovi uglavnom potječu od ne-idealnih vanjski (termo-mehaničkih) uvjeta i nestabilnosti pilara na kojima su postavljeni senzori variometara.

**ASP (Alice Springs, 2006) X component**



# Priprema i obrada podataka - rekapitulacija

Mjerenja i priprema podataka u Geomagnetskim opservatorijima:



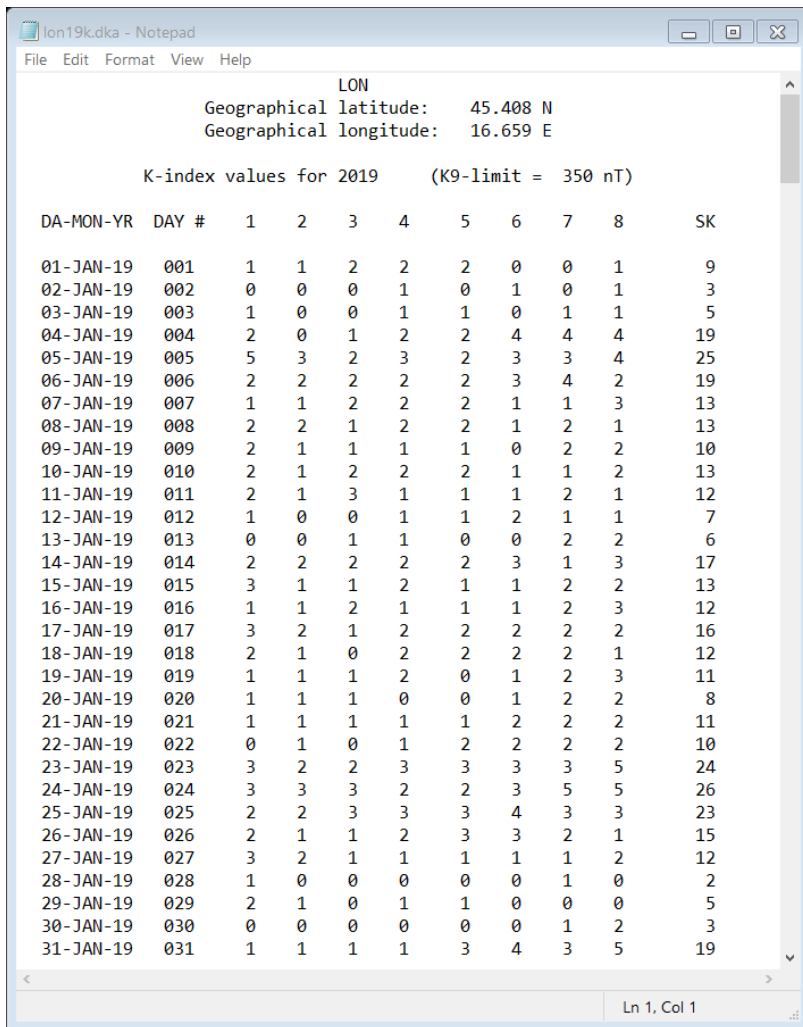
## Priprema i obrada podataka – metadata i formati

- Nedostajući ili kontaminirani podaci jednog variometra mogu se komplementirati s podacima drugog variometra. Zato obično u opservatoriju mjerimo s 2 ili više variometra.
- Računanje definitivnih (lokalnih) K indeksa geomagnetske aktivnosti.
- Pohrana podataka u propisanim formatima (IAGA/INTERMAGNET standardi)  
<https://www.intermagnet.org/data-donnee/formatdata-eng.php>
- Distribucija i pohrana podataka u međunarodnim bazama podataka.
- Definitivni podaci standardnog IMO (Intermagnet Magnetic Observatory) – u toku godine dostavlja se podatkovni set (kalibriran i očišćen od magnetskih kontaminacija) za prošlu kalendarsku godinu.
- Podaci se revidiraju od strane radne skupine za kontrolu kvalitete podataka koja djeluje unutar Intermagneta. Ukoliko podaci kvalitetom zadovoljavaju propisane standarde, radna skupina ih usvaja kao „Definitivne”. (U suprotnom opservatorijsko osoblje dužno je napraviti dodatne korekcije na podacima.)  
[https://intermagnet.github.io/data\\_checkers.html](https://intermagnet.github.io/data_checkers.html)



# Priprema i obrada podataka

Npr.: standardni ASCII - tekst file-ovi formata „DKA” i „IAGA2002”

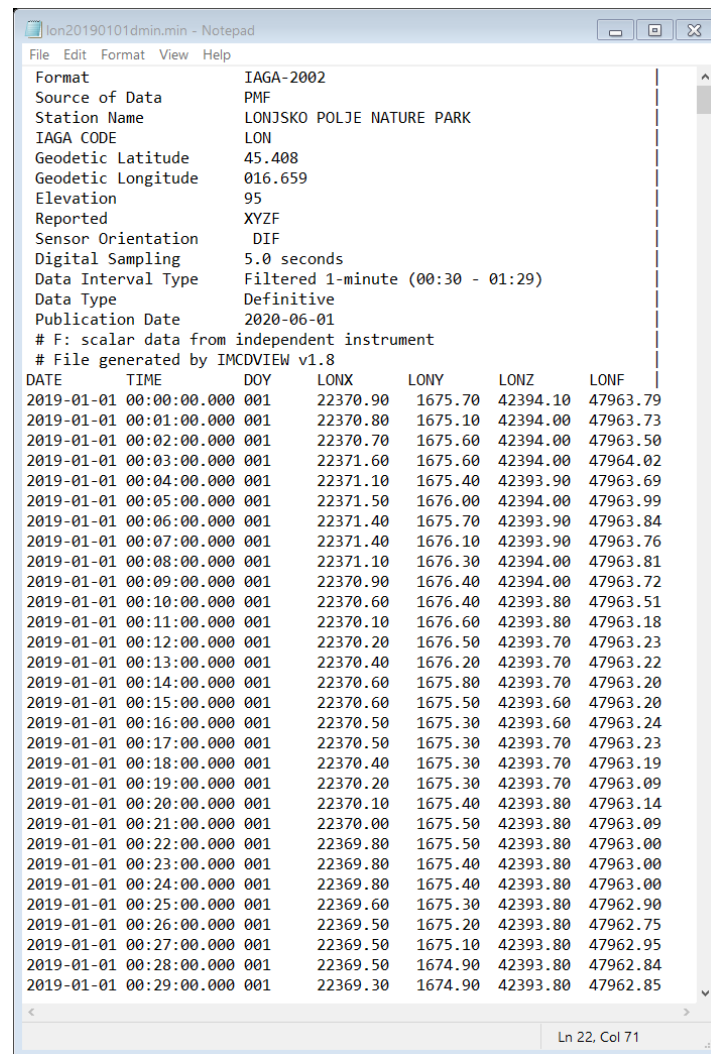


lon19k.dka - Notepad

Geographical latitude: 45.408 N  
Geographical longitude: 16.659 E

K-index values for 2019 (K9-limit = 350 nT)

DA-MON-YR	DAY #	1	2	3	4	5	6	7	8	SK
01-JAN-19	001	1	1	2	2	2	0	0	1	9
02-JAN-19	002	0	0	0	1	0	1	0	1	3
03-JAN-19	003	1	0	0	1	1	0	1	1	5
04-JAN-19	004	2	0	1	2	2	4	4	4	19
05-JAN-19	005	5	3	2	3	2	3	3	4	25
06-JAN-19	006	2	2	2	2	2	3	4	2	19
07-JAN-19	007	1	1	2	2	2	1	1	3	13
08-JAN-19	008	2	2	1	2	2	1	2	1	13
09-JAN-19	009	2	1	1	1	1	0	2	2	10
10-JAN-19	010	2	1	2	2	2	1	1	2	13
11-JAN-19	011	2	1	3	1	1	1	2	1	12
12-JAN-19	012	1	0	0	1	1	2	1	1	7
13-JAN-19	013	0	0	1	1	0	0	2	2	6
14-JAN-19	014	2	2	2	2	2	3	1	3	17
15-JAN-19	015	3	1	1	2	1	1	2	2	13
16-JAN-19	016	1	1	2	1	1	1	2	3	12
17-JAN-19	017	3	2	1	2	2	2	2	2	16
18-JAN-19	018	2	1	0	2	2	2	2	1	12
19-JAN-19	019	1	1	1	2	0	1	2	3	11
20-JAN-19	020	1	1	1	0	0	1	2	2	8
21-JAN-19	021	1	1	1	1	1	2	2	2	11
22-JAN-19	022	0	1	0	1	2	2	2	2	10
23-JAN-19	023	3	2	2	3	3	3	3	5	24
24-JAN-19	024	3	3	3	2	2	3	5	5	26
25-JAN-19	025	2	2	3	3	3	4	3	3	23
26-JAN-19	026	2	1	1	2	3	3	2	1	15
27-JAN-19	027	3	2	1	1	1	1	1	2	12
28-JAN-19	028	1	0	0	0	0	0	1	0	2
29-JAN-19	029	2	1	0	1	1	0	0	0	5
30-JAN-19	030	0	0	0	0	0	0	1	2	3
31-JAN-19	031	1	1	1	1	3	4	3	5	19



lon20190101dmin.min - Notepad

Format IAGA-2002  
Source of Data PMF  
Station Name LONJSKO POLJE NATURE PARK  
IAGA CODE LON  
Geodetic Latitude 45.408  
Geodetic Longitude 016.659  
Elevation 95  
Reported XYZF  
Sensor Orientation DIF  
Digital Sampling 5.0 seconds  
Data Interval Type Filtered 1-minute (00:30 - 01:29)  
Data Type Definitive  
Publication Date 2020-06-01  
# F: scalar data from independent instrument  
# File generated by IMCVIEW v1.8

DATE	TIME	DOY	LONX	LONY	LONZ	LONF
2019-01-01	00:00:00.000	001	22370.90	1675.70	42394.10	47963.79
2019-01-01	00:01:00.000	001	22370.80	1675.10	42394.00	47963.73
2019-01-01	00:02:00.000	001	22370.70	1675.60	42394.00	47963.50
2019-01-01	00:03:00.000	001	22371.60	1675.60	42394.00	47964.02
2019-01-01	00:04:00.000	001	22371.10	1675.40	42393.90	47963.69
2019-01-01	00:05:00.000	001	22371.50	1676.00	42394.00	47963.99
2019-01-01	00:06:00.000	001	22371.40	1675.70	42393.90	47963.84
2019-01-01	00:07:00.000	001	22371.40	1676.10	42393.90	47963.76
2019-01-01	00:08:00.000	001	22371.10	1676.30	42394.00	47963.81
2019-01-01	00:09:00.000	001	22370.90	1676.40	42394.00	47963.72
2019-01-01	00:10:00.000	001	22370.60	1676.40	42393.80	47963.51
2019-01-01	00:11:00.000	001	22370.10	1676.60	42393.80	47963.18
2019-01-01	00:12:00.000	001	22370.20	1676.50	42393.70	47963.23
2019-01-01	00:13:00.000	001	22370.40	1676.20	42393.70	47963.22
2019-01-01	00:14:00.000	001	22370.60	1675.80	42393.70	47963.20
2019-01-01	00:15:00.000	001	22370.60	1675.50	42393.60	47963.20
2019-01-01	00:16:00.000	001	22370.50	1675.30	42393.60	47963.24
2019-01-01	00:17:00.000	001	22370.50	1675.30	42393.70	47963.23
2019-01-01	00:18:00.000	001	22370.40	1675.30	42393.70	47963.19
2019-01-01	00:19:00.000	001	22370.20	1675.30	42393.70	47963.09
2019-01-01	00:20:00.000	001	22370.10	1675.40	42393.80	47963.14
2019-01-01	00:21:00.000	001	22370.00	1675.50	42393.80	47963.09
2019-01-01	00:22:00.000	001	22369.80	1675.50	42393.80	47963.00
2019-01-01	00:23:00.000	001	22369.80	1675.40	42393.80	47963.00
2019-01-01	00:24:00.000	001	22369.80	1675.40	42393.80	47963.00
2019-01-01	00:25:00.000	001	22369.60	1675.30	42393.80	47962.90
2019-01-01	00:26:00.000	001	22369.50	1675.20	42393.80	47962.75
2019-01-01	00:27:00.000	001	22369.50	1675.10	42393.80	47962.95
2019-01-01	00:28:00.000	001	22369.50	1674.90	42393.80	47962.84
2019-01-01	00:29:00.000	001	22369.30	1674.90	42393.80	47962.85

Kraj – hvala na pažnji!