

# Medsebojno gibanje plošč

---

- Plošče se nahajajo v stalnem medsebojnem gibanju. Predvsem se obravnava relativno medsebojno gibanje plošč.
- Za določitev absolutnega gibanja plošč bi morali določiti ustrezen "fiksni" referenčni sistem npr. glede na mezosfero ali središče Zemlje → izjemno težka naloga.
- Največkrat se absolutno gibanje plošč določi glede na paleomagnetne meritve ali **vroče točke\*** ("hot spots") na površju Zemlje.
- \*Vroče točke so območja na Zemeljskem površju, ki predstavljajo območja velike ognjeniške aktivnosti. Vzrok vulkanske aktivnosti ni neposredno v tektonskih procesih in zato vroče točke niso omejene na robove tektonskih plošč.
- [Hot spot karta](#)

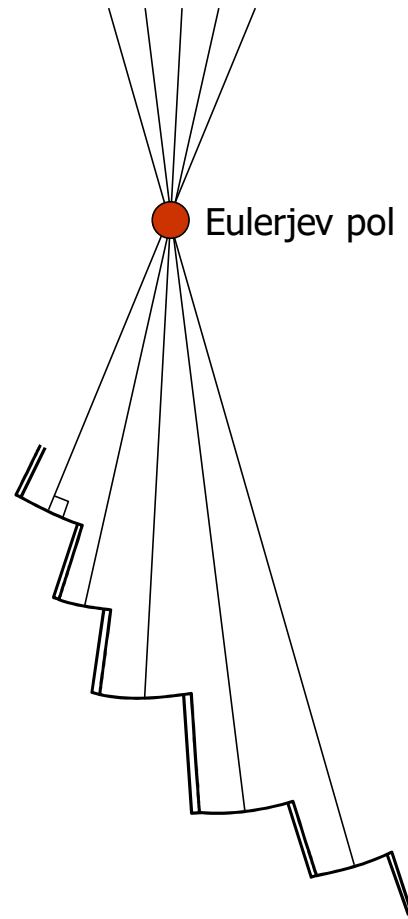
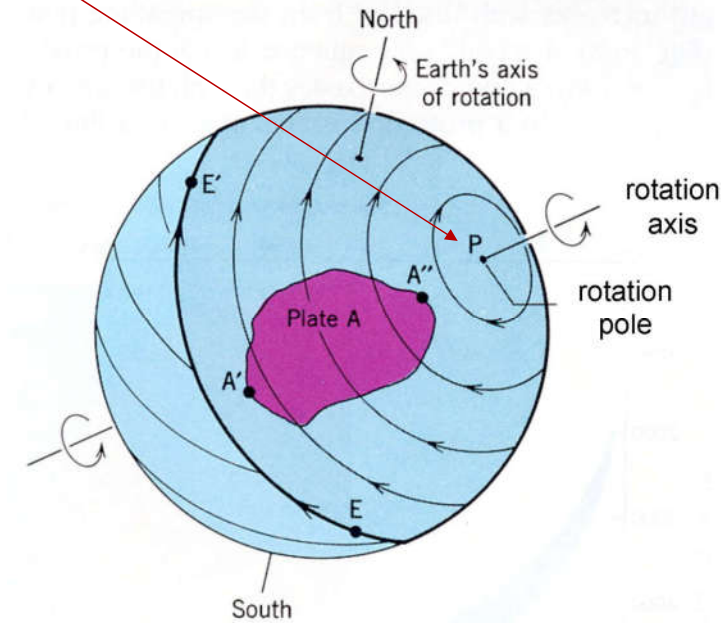
## Medsebojno gibanje plošč - Eulerjev teorem

---

- Relativno medsebojno gibanje med dvema (trdnima) ploščama na Zemlji-krogli lahko opišemo s pomočjo **Eulerjevega teorema**:
  - Poljubna rotacija (ali zaporedje rotacij) okrog neke točke je ekvivalentna eni sami rotaciji okrog neke osi skozi to točko.
- Rotacija ene plošče glede na drugo se dogaja okoli "geocentrične" osi, ki prebada Zemljo v točki, ki jo imenujemo **Eulerjev pol**.

# Eulerjevo gibanje na krogli (1)

- P – Eulerjev pol



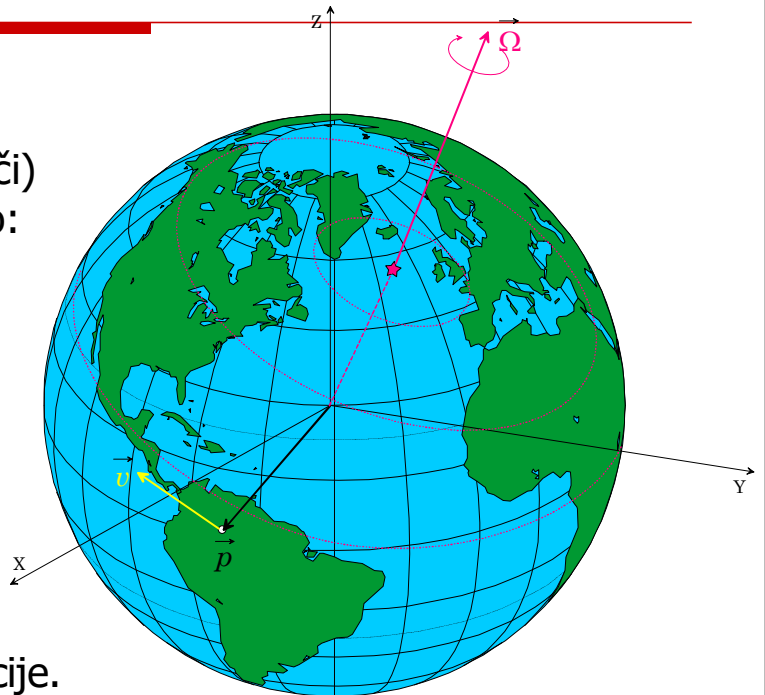
# Eulerjevo gibanje na krogli (2)

- Relativno gibanje točke na plošči glede na pol (določen za dve plošči) lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$\vec{v} = \vec{\Omega} \times \vec{p}$$

kjer so:  $\vec{p}$  krajevni vektor točke na gibajoči se plošči,  $\vec{v}$  je vektor obodne hitrosti gibanja točke, in  $\vec{\Omega}$  (Eulerjev) vektor kotne hitrosti, ki definira **Eulerjevo gibanje** plošče.

- Velikost vektorja  $\Omega$  je hitrost rotacije.
- Vedno je podana hitrost ene plošče glede na drugo.
- Hitrost  $\omega = |\Omega|$  je običajno podana v "stopinjah na milion let" [ $^{\circ}/\text{mio. let}$ ].



# Vektor hitrosti točke v ECEF k.s.

- Vektorski produkt iz prejšnje prosojnice rešujemo v pravokotnih koordinatah (ECEF koord. sistem). Vektorski produkt zapišemo kot produkt poševnosimetrične ("skew-symmetric")\* matrice in vektorja, v našem primeru:

$$\mathbf{v}^{ECEF} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{ECEF} = \begin{bmatrix} 0 & p_z & -p_y \\ -p_z & 0 & p_x \\ p_y & -p_x & 0 \end{bmatrix}_{ECEF} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}^{ECEF} = \begin{bmatrix} p_z \omega_y - p_y \omega_z \\ p_x \omega_z - p_z \omega_x \\ p_y \omega_x - p_x \omega_y \end{bmatrix}$$

- \*poševnosimetrična matrika je kvadratna matrika katere transponirana matrika je enaka njeni negativni vrednosti:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \end{bmatrix}_X \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a} \end{bmatrix}_X = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

## Iz ECEF v LG (neu) k.s.

- Vektor hitrosti, dan v ECEF k.s., pretvorimo v LG (neu) koord. sistem kot:

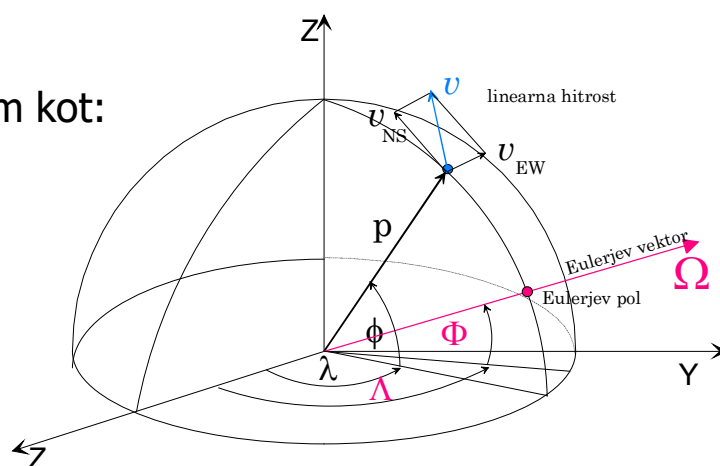
$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_u \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

kjer je R rotacijska matrika.

$$R = \begin{bmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix}$$

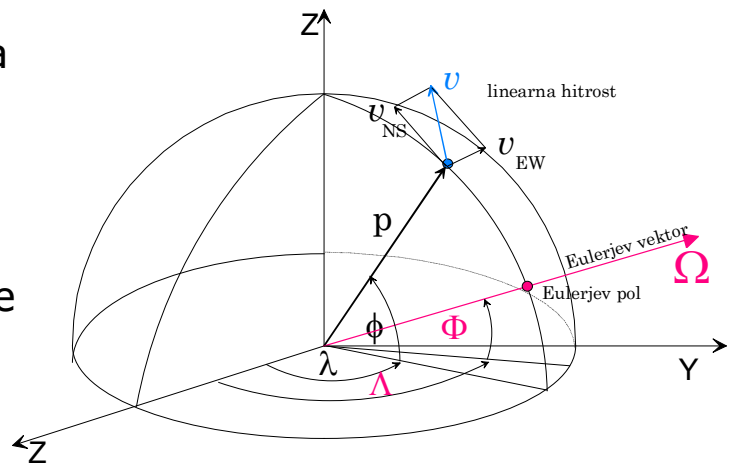
- velikost vektorja hitrosti izračunamo kot:

$$v = \sqrt{v_n^2 + v_e^2 + v_u^2}$$



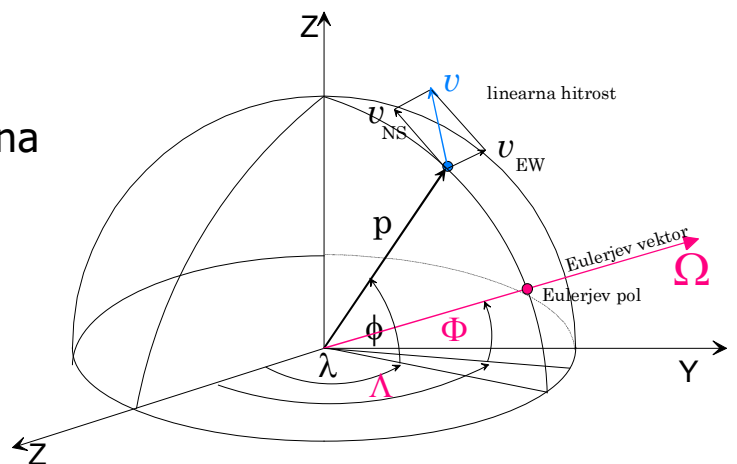
# Iz ECEF v LG (neu) k.s.

- Ker je gibanje v ravnini, predstavlja zgornja pretvorba razstavljanje obodne hitrosti  $v$  na komponento v smeri sever-jug ( $NS=v_n$ ) in komponento v smeri vzhod-zahod ( $EW=v_e$ ), (komponenta v smeri  $u$  je nič).
- Dejansko gre za pretvorbo iz pravokotnih nazaj v elipsoidne koordinate.



# Relativno gibanje med dvema ploščama (2)

- Točka na gibajoči se plošči je podana z geografskimi (elipsoidnimi) koordinatami  $P(\phi, \lambda)$ .
- Koordinate pola so podane v krogelnih koordinatah  $E(\Phi, \Lambda)$ .



# Rešitev v kartezičnih koordinatah

- Položaj Eulerjevega pola v pravokotnih koordinatah:

$$(\omega, \Phi, \Lambda) \rightarrow (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$$

- Zemljo aproksimiramo s kroglo, tako lahko komponente krajevnega vektorja  $\mathbf{p}$  izračunamo kot:

$$\mathbf{p} = R_z \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \phi \end{bmatrix}$$

kjer sta  $\phi$  in  $\lambda$  geografska (elipsoidna) širina in dolžina.  $R_z$  je polmer Zemlje - krogle.

- 

$$\vec{v} = \vec{\Omega} \times (R \cdot \vec{p})$$

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad \vec{\Omega} = \omega \begin{bmatrix} \cos \Phi \cos \Lambda \\ \cos \Phi \sin \Lambda \\ \sin \Phi \end{bmatrix}$$

## Vektor hitrosti gibanja točke v LG koord. sistemu

$$\mathbf{p} = [R \cos \phi \cos \lambda, R \cos \phi \sin \lambda, R \sin \phi]$$

$$\mathbf{\Omega} = [\omega \cos \Phi \cos \Lambda, \omega \cos \Phi \sin \Lambda, \omega \sin \Phi]$$

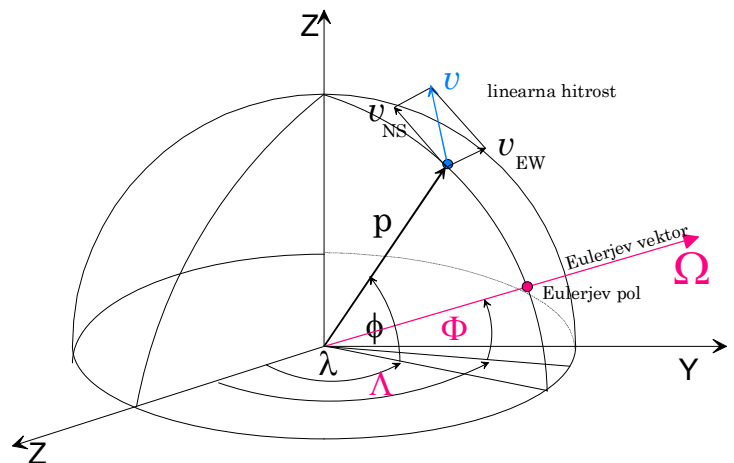
$$v_x = R\omega(\cos \Phi \cos \Lambda \sin \phi - \sin \Phi \cos \phi \sin \lambda)$$

$$v_y = R\omega(\sin \Phi \cos \phi \cos \lambda - \cos \Phi \cos \Lambda \sin \phi)$$

$$v_z = R\omega(\cos \Phi \cos \phi \sin(\lambda - \Lambda))$$

$$\mathbf{v}_{ECEF} = (v_x, v_y, v_z)$$

$$\mathbf{v}_{NEU} = \mathbf{v}_{ECEF} \cdot \mathbf{R}_{ECEF \rightarrow NEU}$$



- Transformacija iz globalnega koord. sistema (ECEF) v lokalni geodetski (LG) oz. neu koord. sistem ("north, east, up").

$$v^{NS} = R\omega(\cos \Phi \sin(\lambda - \Lambda))$$

$$v^{EW} = R\omega(\cos \phi \sin \Phi - \sin \phi \cos \Phi \cos(\lambda - \Lambda))$$

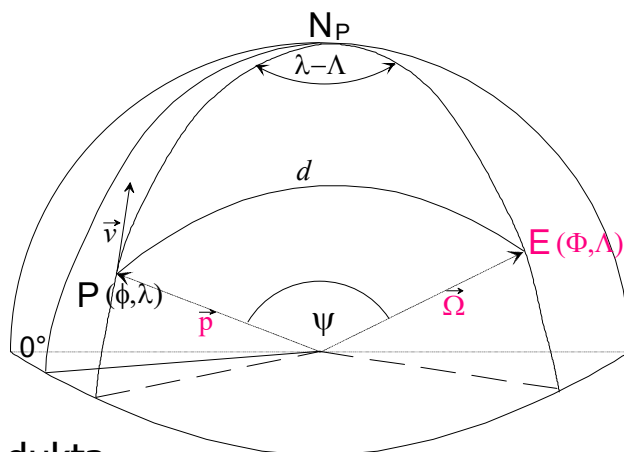
$$\mathbf{R}_{ECEF \rightarrow NEU} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \phi \cos \lambda & -\cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix}$$

# Rešitev s pomočjo sferne trigonometrije

- Do istega rezultata pridemo če obodno hitrost točke izračunamo po enačbi:

$$v = R\omega \sin \psi$$

- pri čemer so:  
 $\omega$  - hitrost rotacije,  
 $R$  – polmer Zemlje (krogle),  
 $\psi$  - sferna razdalja med E-polom i točko izračuna,  $v$  [°]



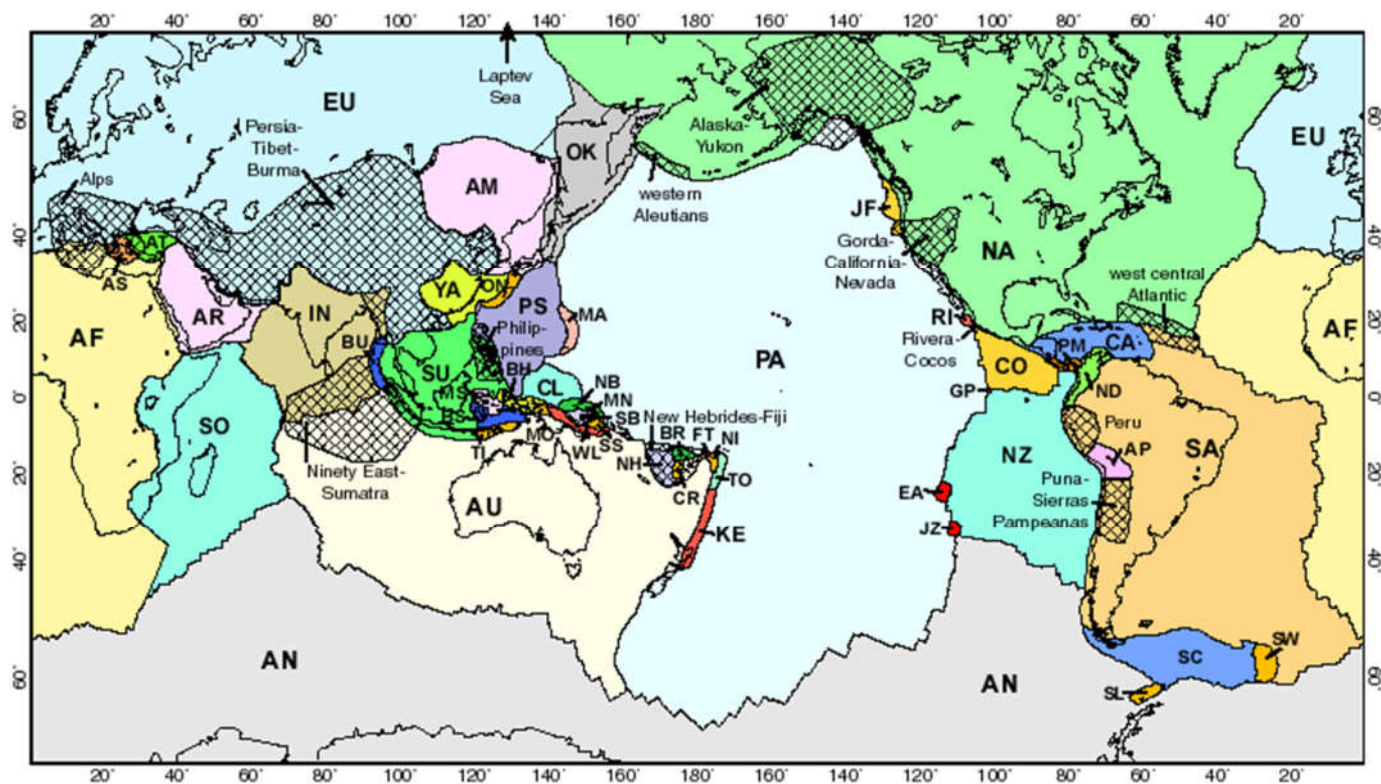
- Op.: enačba je rezultat vektorskega produkta vektorjev  $\Omega$  in  $p$ :

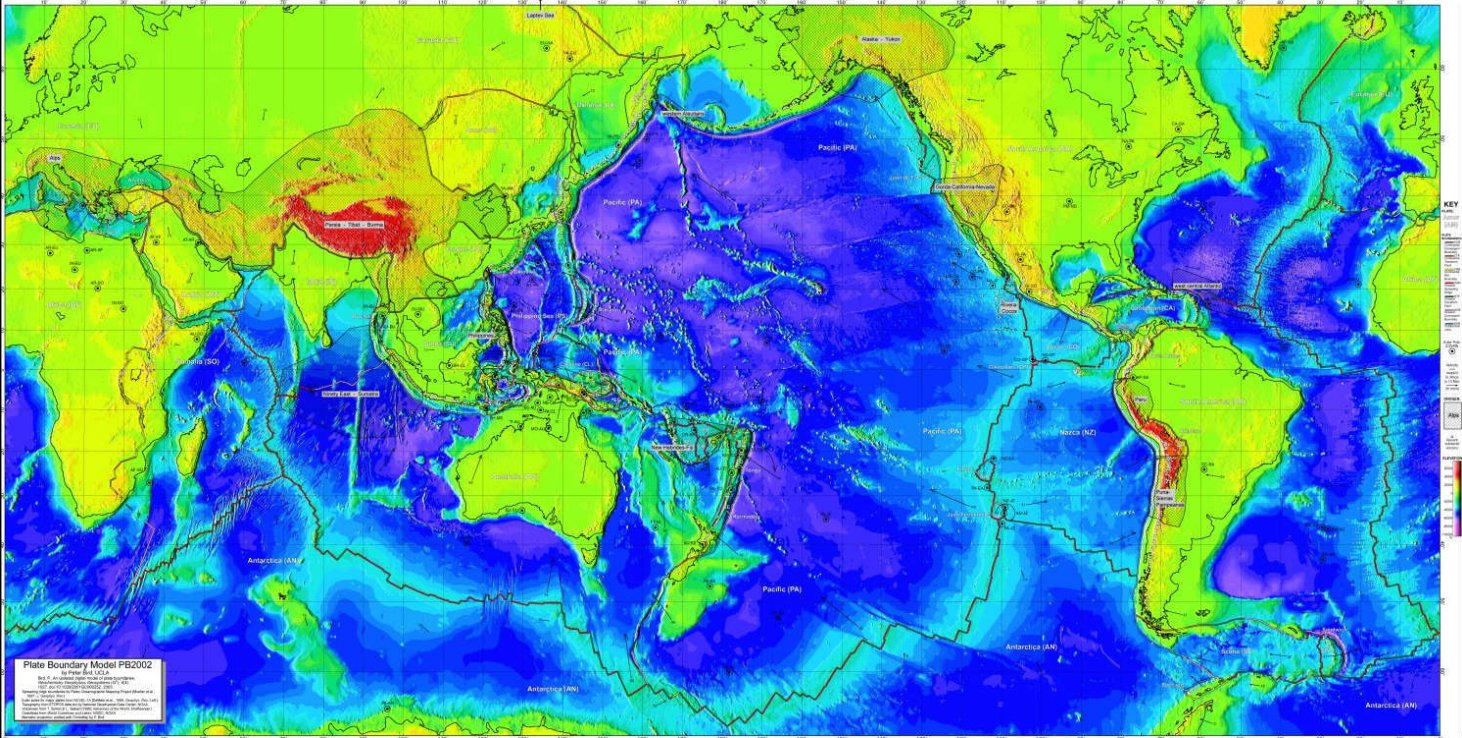
$$\vec{v} = \vec{\Omega} \times \vec{p} = |\vec{\Omega}| \cdot |\vec{p}| \sin \psi$$

$$|\vec{\Omega}| = \omega$$

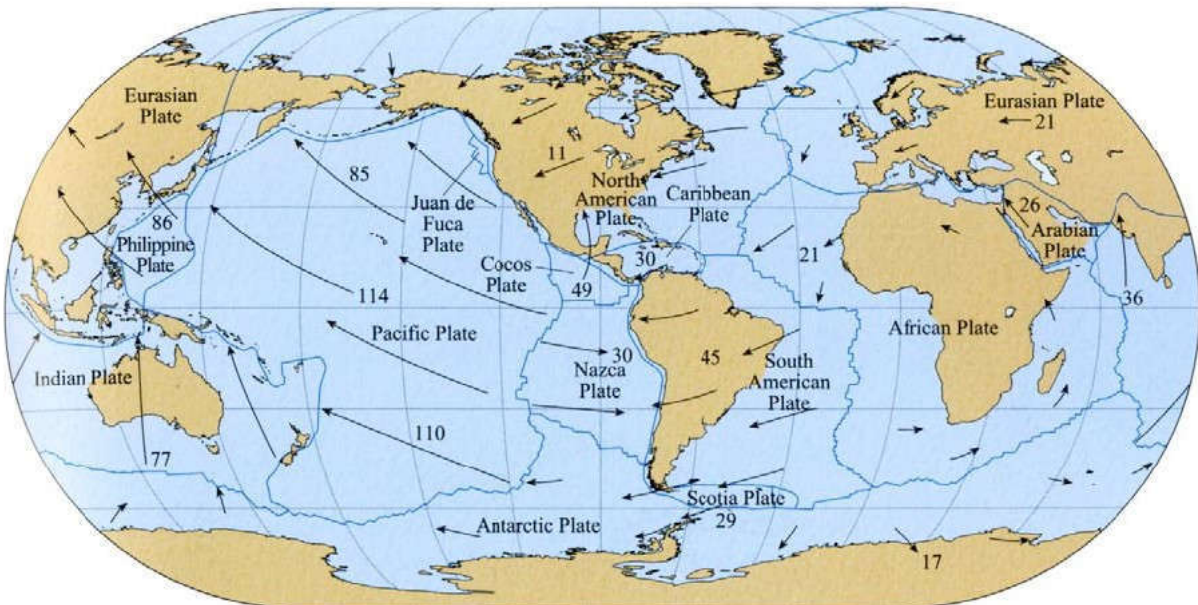
$$|\vec{p}| = 1$$

## PB2002 (Plate Boundaries model)





## Globalno relativno gibanje plošč



[mm/leto]

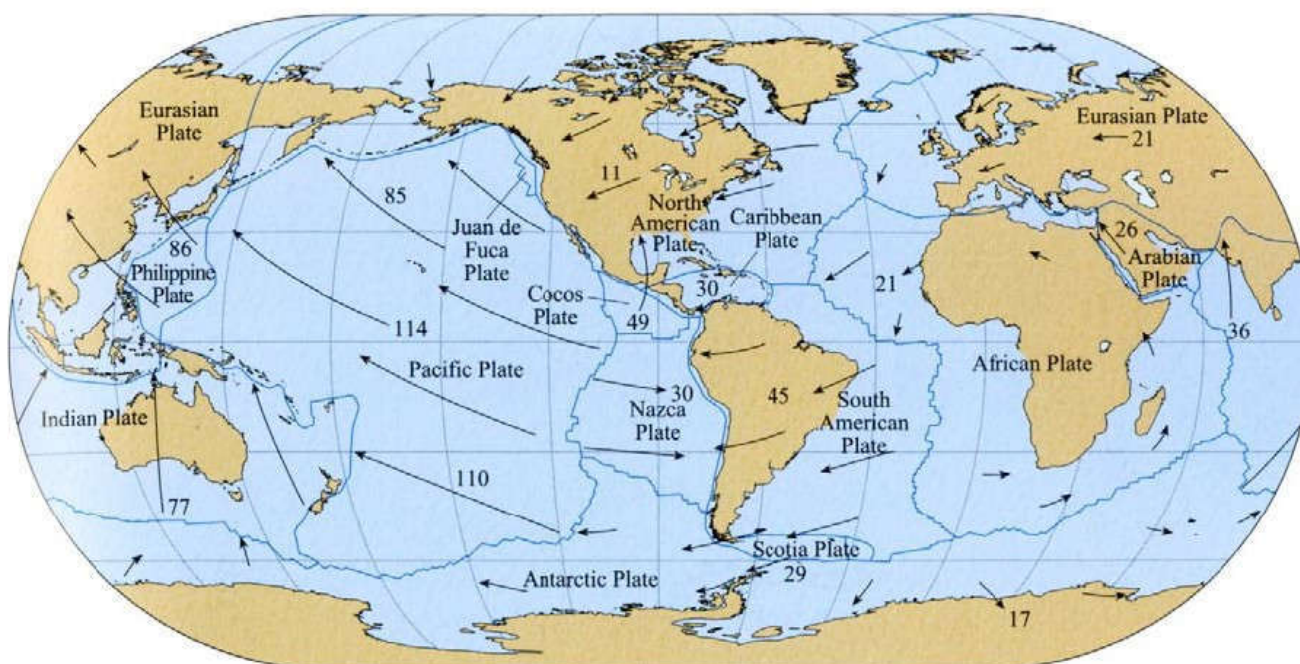
# Rotacija Severnoameriške plošče okoli Eulerjevega pola



M. Kuhar – FG (Dinamična Zemlja)

## Absolutno gibanje plošč

- Absolutno gibanje plošč, merilo [mm/leto]



M. Kuhar – FG (Dinamična Zemlja)

# Ploščna tektonika – geodetski prispevek

---

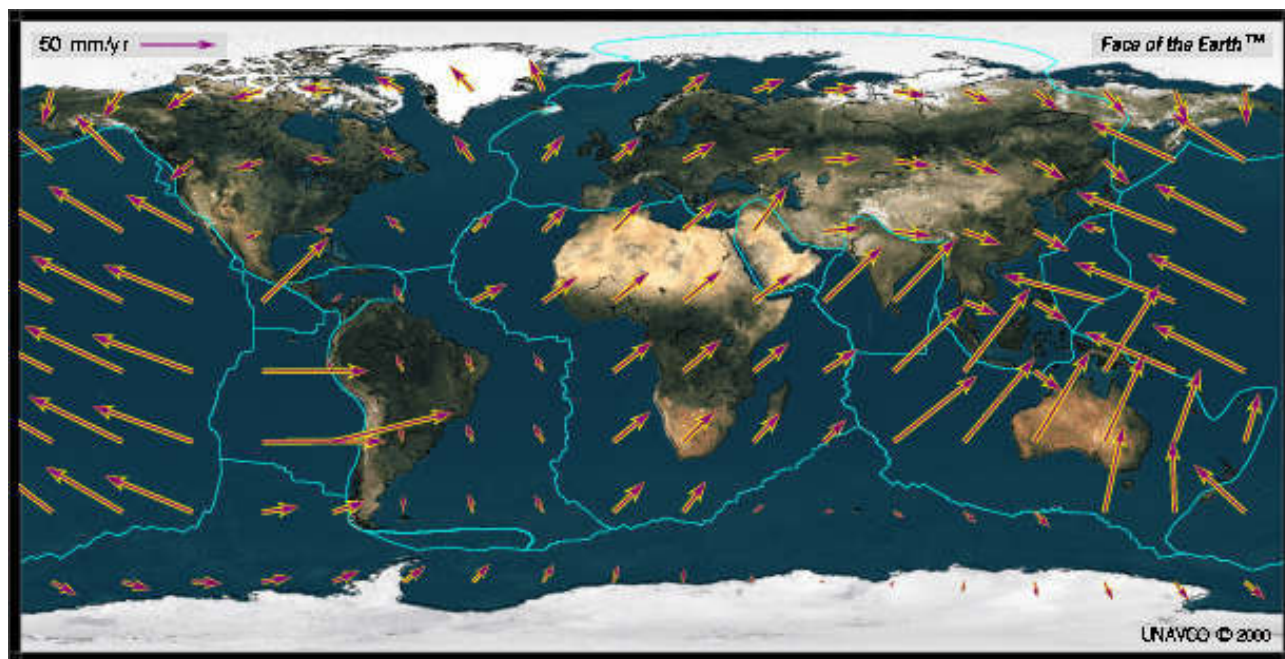
- Geodetski prispevek ploščni tektoniki je modeliranje časovnih sprememb položaja opazovanih točk. To nam pomaga izboljšati določitev terestričnih referenčnih sestavov oz. referenčnih sistemov in daje vpogled v medsebojen vpliv kinematike plošč in rotacije Zemlje.
- Cilj spremljanja gibanja plošč je določitev Eulerjeva vektorja za različne plošče.

## Modeli premikanja plošč

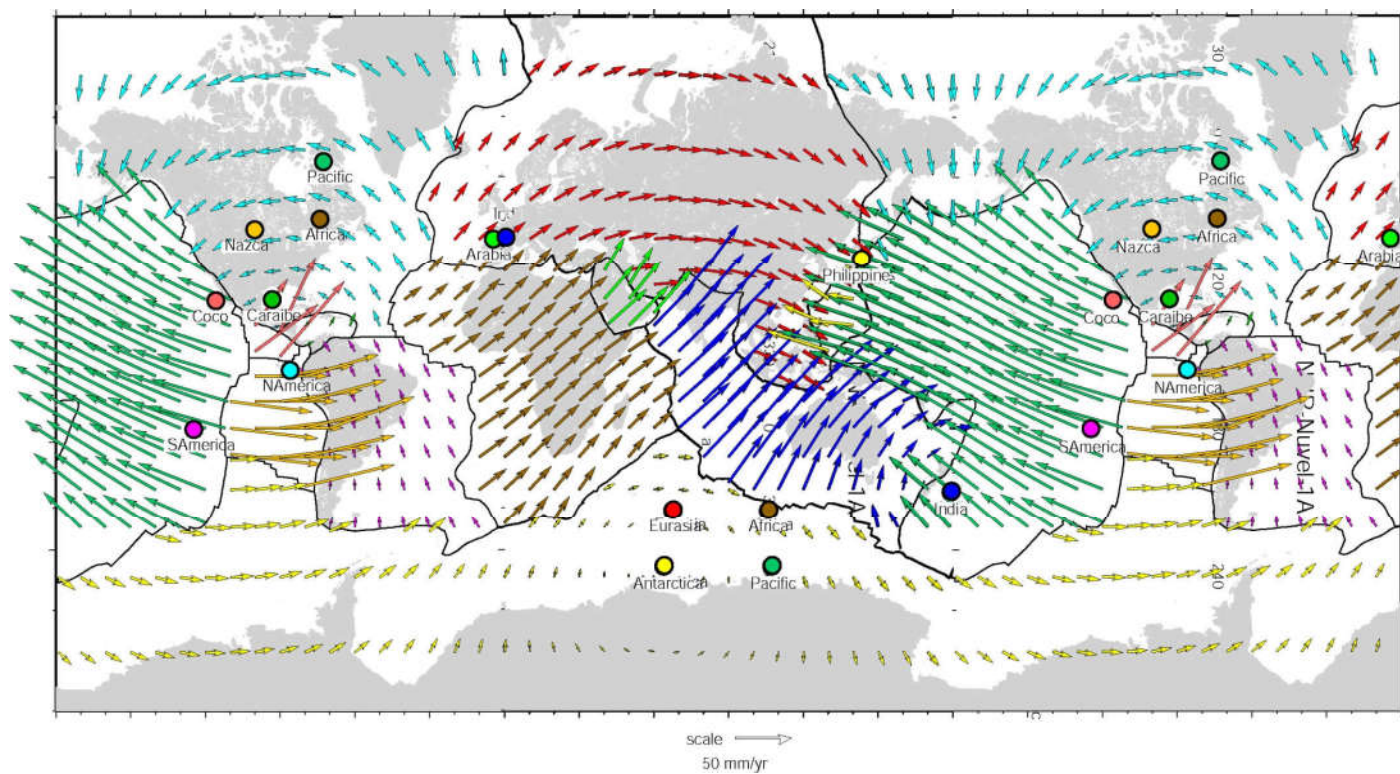
---

- Geofizikalni modeli (NUVEL-1, NNR-NUVEL-1, PB2002, MORVEL...) – ki so povprečje gibanja plošč v obdobju milijon let in so izvedeni z geofizikalnim modeliranjem premikov oceanskega dna (predvsem podatki paleomagnetizma) in določitve položaja tektonskih prelomnic in azimutov razširjanja potresnih sunkov.
- Geodetski modeli (kinematični, na osnovi rezultatov GNSS-opazovanj in drugih tehnik satelitske geodezije:
  - APKIM – "ActualPlateKinematicModel",
  - REVEL – "Recent VELocity model",
  - GPSVEL – globalno polje GPS-hitrosti.

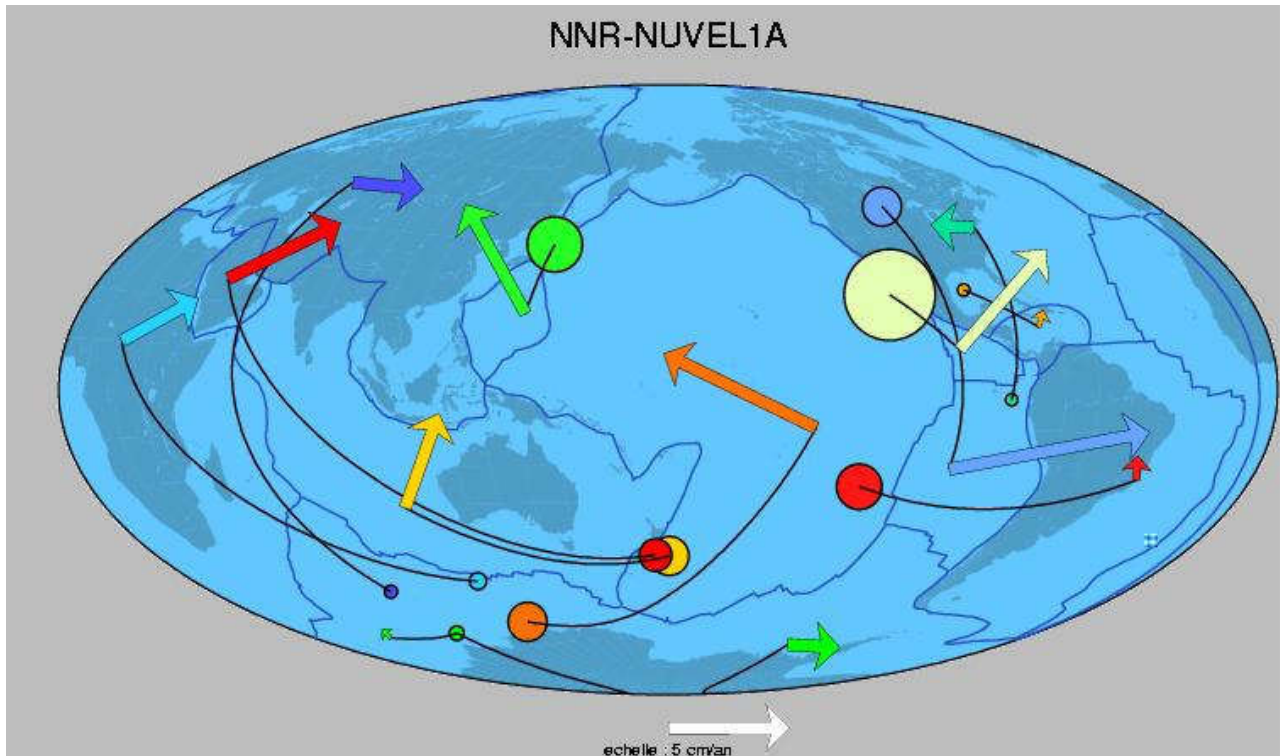
# NUVEL 1A



## NNR-Nuvel-1A : hitrosti in poli

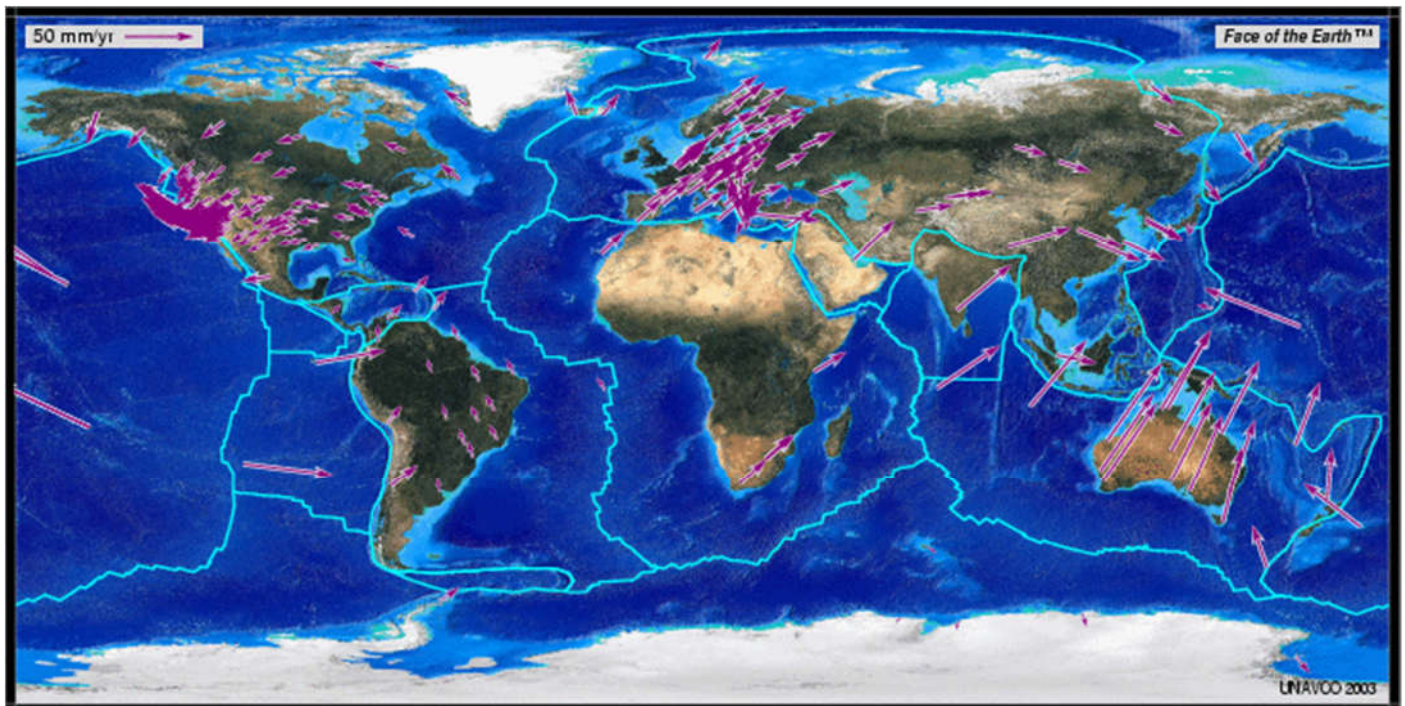


# NNR-Nuvel-1A poli: položaji in hitrosti

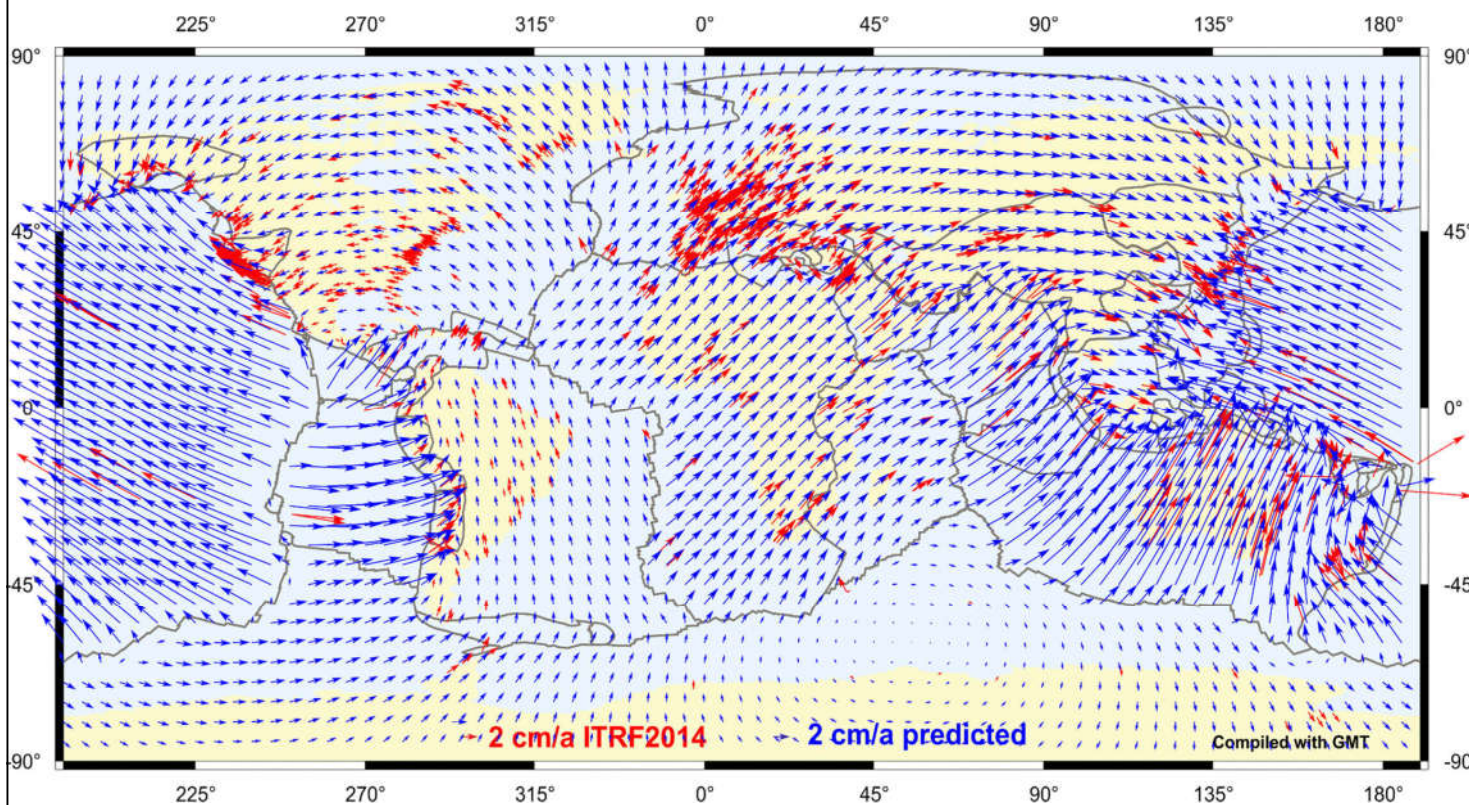


21

# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj



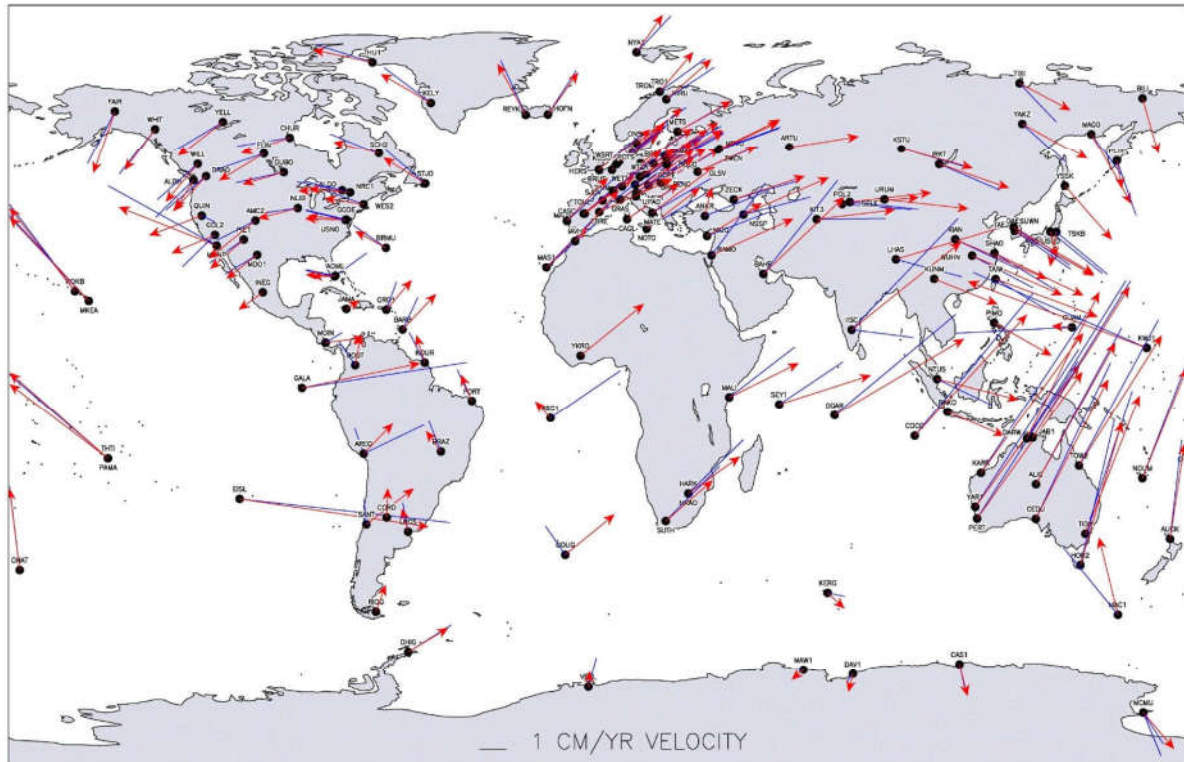
# APKIM 2014



## Comparison of estimated plate rotation poles ( $\Phi$ , $\Lambda$ , $\omega$ ) (red numbers are different to APKIM2014 after the 3-sigma-criterion)

Plate	APKIM2014			APKIM2008			NNR NUVEL-1A		
	$\Phi$ [°]	$\Lambda$ [°]	$\Omega$ [°/Ma]	$\Phi$ [°]	$\Lambda$ [°]	$\Omega$ [°/Ma]	$\Phi$ [°]	$\Lambda$ [°]	$\Omega$ [°/Ma]
Africa	49.57	278.71	0.267	49.80	278.54	0.268	50.57	286.04	0.291
	$\pm 0.19$	$\pm 0.54$	$\pm 0.001$	$\pm 0.26$	$\pm 0.70$	$\pm 0.001$			
Antarctica	59.32	234.04	0.216	58.83	231.91	0.214	62.99	244.24	0.238
	$\pm 0.39$	$\pm 0.56$	$\pm 0.003$	$\pm 0.33$	$\pm 0.59$	$\pm 0.003$			
Arabia	49.62	3.54	0.582	50.00	3.45	0.570	45.23	355.54	0.546
	$\pm 0.31$	$\pm 1.05$	$\pm 0.010$	$\pm 0.36$	$\pm 1.33$	$\pm 0.012$			
Australia	32.29	37.91	0.630	32.46	37.88	0.633	33.85	33.17	0.646
	$\pm 0.10$	$\pm 0.20$	$\pm 0.001$	$\pm 0.14$	$\pm 0.31$	$\pm 0.002$			
Caribbean	31.48	269.32	0.337	28.00	250.93	0.208	25.00	266.99	0.214
	$\pm 1.16$	$\pm 3.01$	$\pm 0.032$	$\pm 1.32$	$\pm 2.68$	$\pm 0.018$			
Eurasia	54.45	259.66	0.255	55.13	260.58	0.256	50.62	247.73	0.234
	$\pm 0.22$	$\pm 0.33$	$\pm 0.001$	$\pm 0.28$	$\pm 0.40$	$\pm 0.001$			
India	51.51	1.71	0.523	50.20	11.75	0.552	45.51	0.34	0.545
	$\pm 0.31$	$\pm 4.33$	$\pm 0.009$	$\pm 0.66$	$\pm 4.27$	$\pm 0.013$			
N. America	-4.82	272.10	0.193	-5.76	272.50	0.189	-2.43	274.10	0.207
	$\pm 0.30$	$\pm 0.13$	$\pm 0.001$	$\pm 0.45$	$\pm 0.22$	$\pm 0.001$			
Nazca	45.60	257.75	0.632	45.88	257.61	0.682	47.80	259.87	0.743
	$\pm 0.91$	$\pm 0.39$	$\pm 0.006$	$\pm 0.63$	$\pm 0.33$	$\pm 0.001$			
Pacific	-62.50	110.42	0.680	-62.57	110.93	0.634	-63.04	107.33	0.641
	$\pm 0.08$	$\pm 0.34$	$\pm 0.001$	$\pm 0.08$	$\pm 0.36$	$\pm 0.005$			
S. America	-18.68	231.31	0.122	-19.35	237.84	0.127	-25.35	235.58	0.116
	$\pm 0.51$	$\pm 1.30$	$\pm 0.001$	$\pm 1.02$	$\pm 1.51$	$\pm 0.002$			

## Station Coordinates: Plate Tectonics



7 years of GPS

Million years of Geomagnetism (Nuvel-1A)

FGS

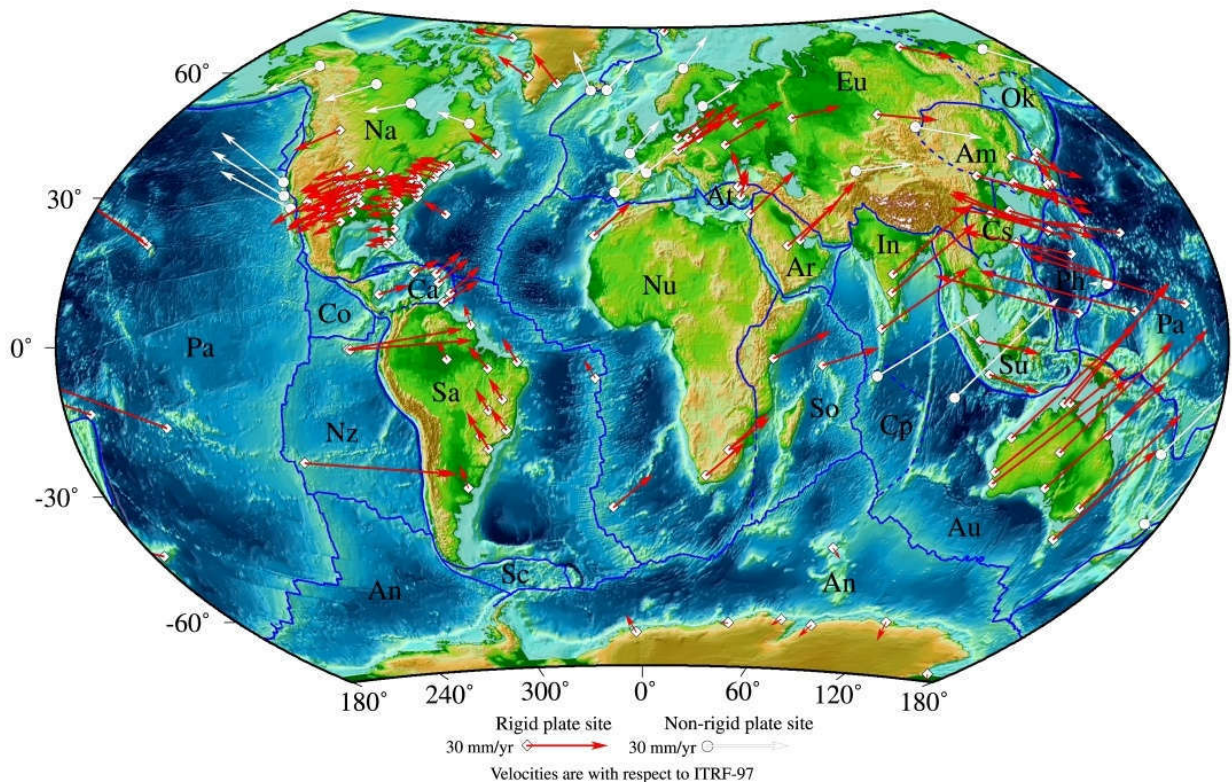
M. Kuhar – FG (Dinamična Zemlja)

TUM

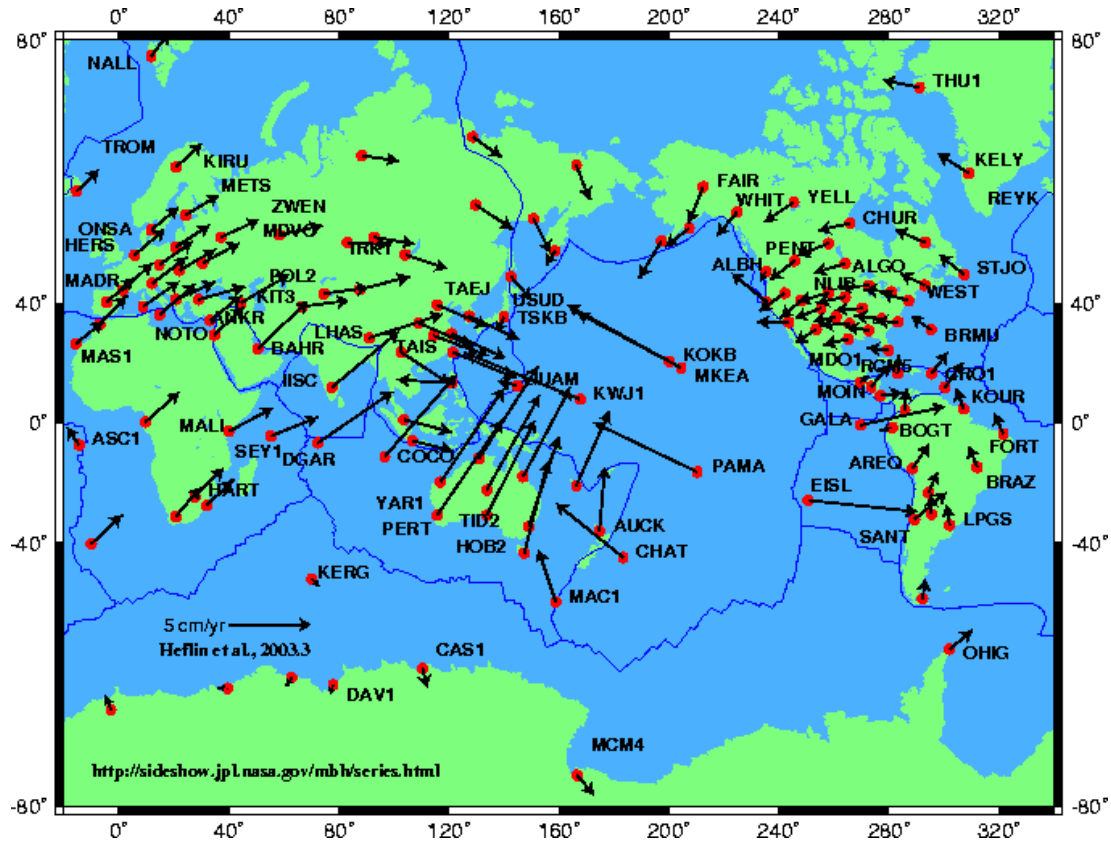
25

## REVEL 2000

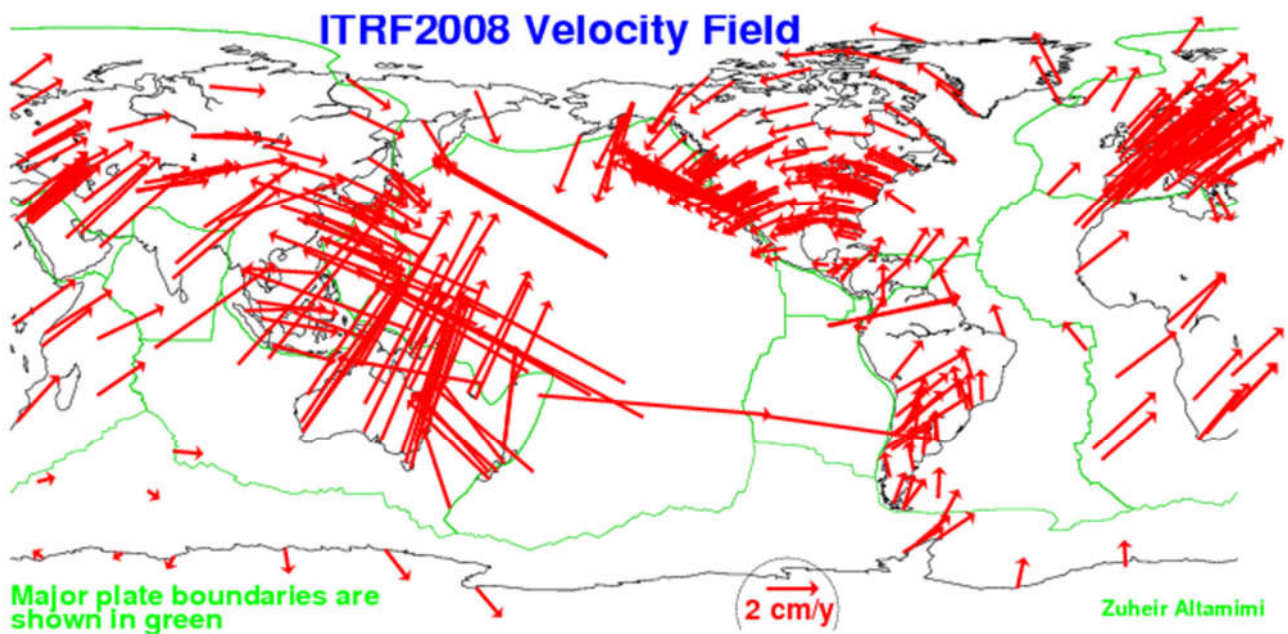
REVEL-2000



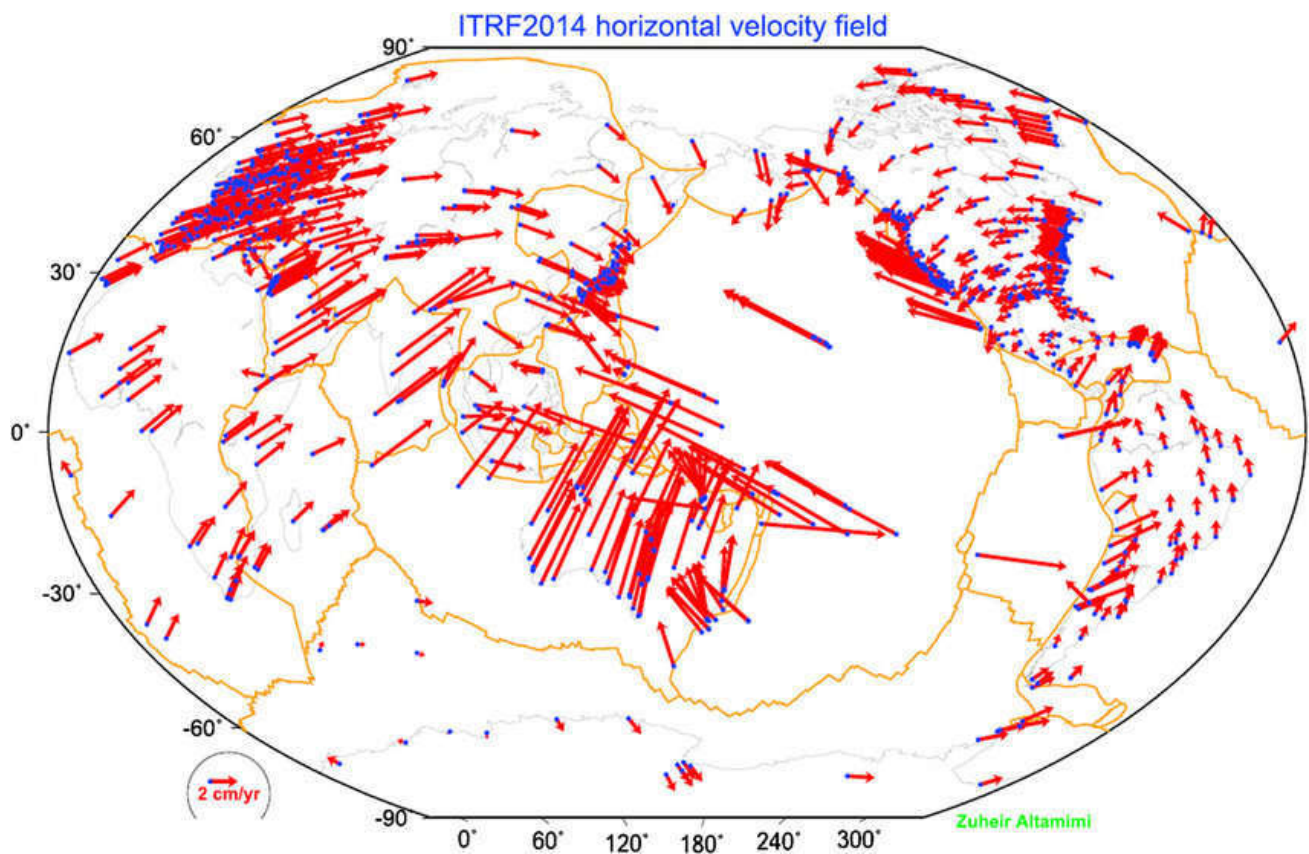
# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj



# Polje hitrosti ref. sestava ITRF2008

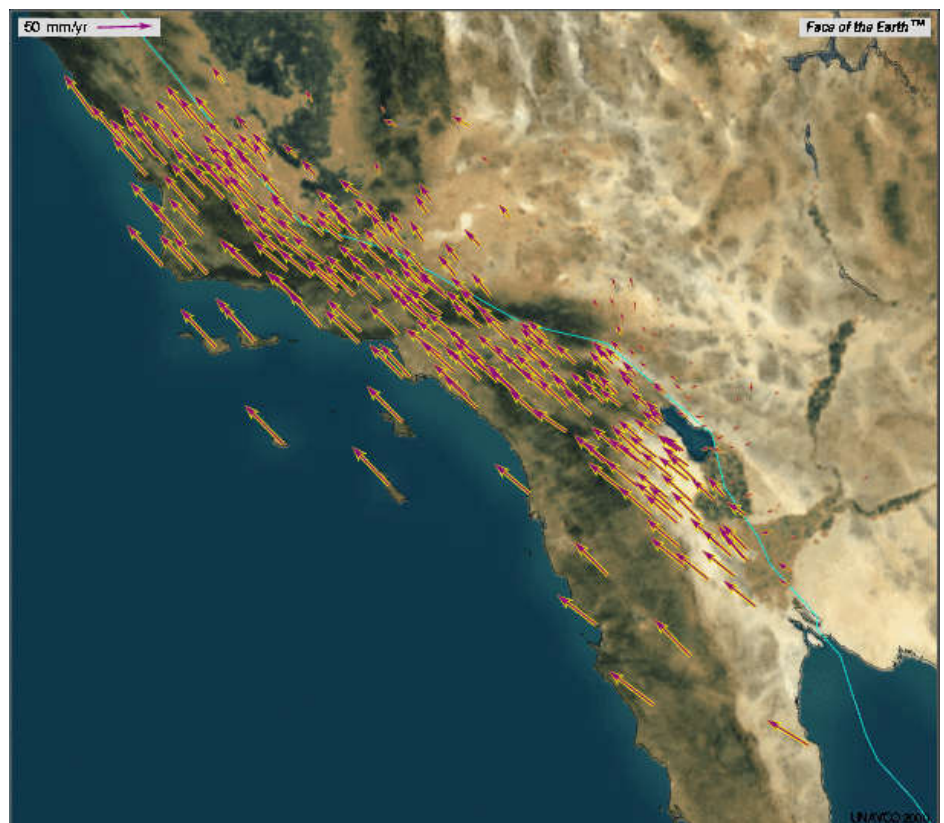


# Polje hitrosti ref. sestava ITRF2014



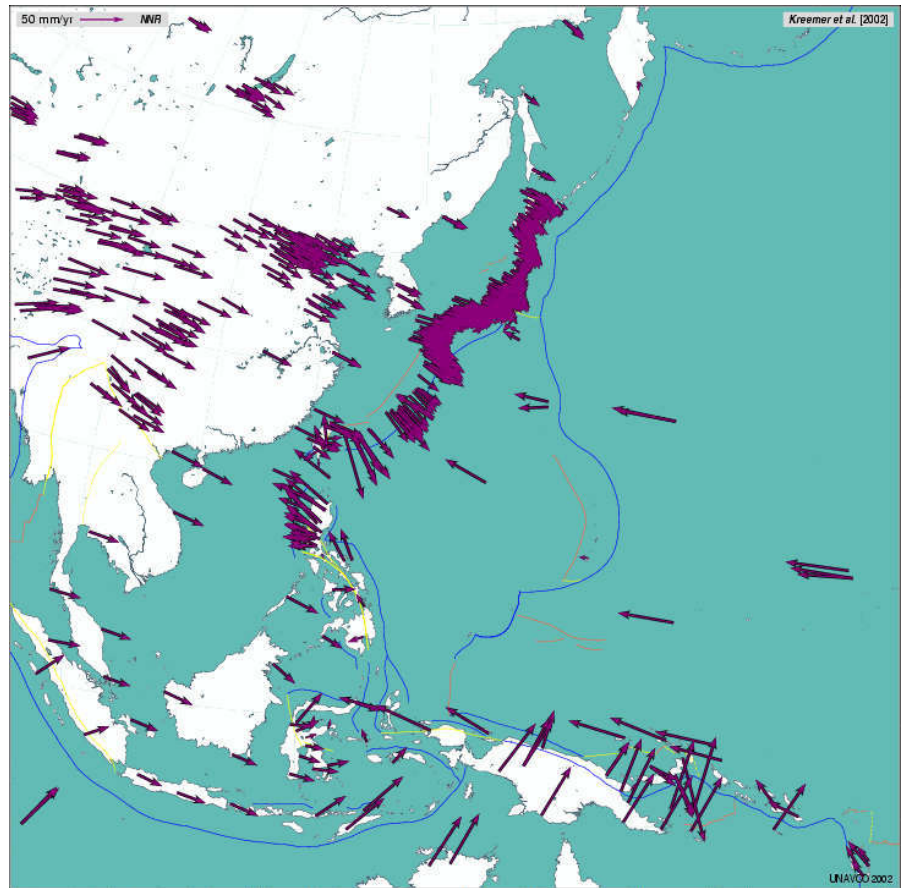
## Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj

- Kalifornija



# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj

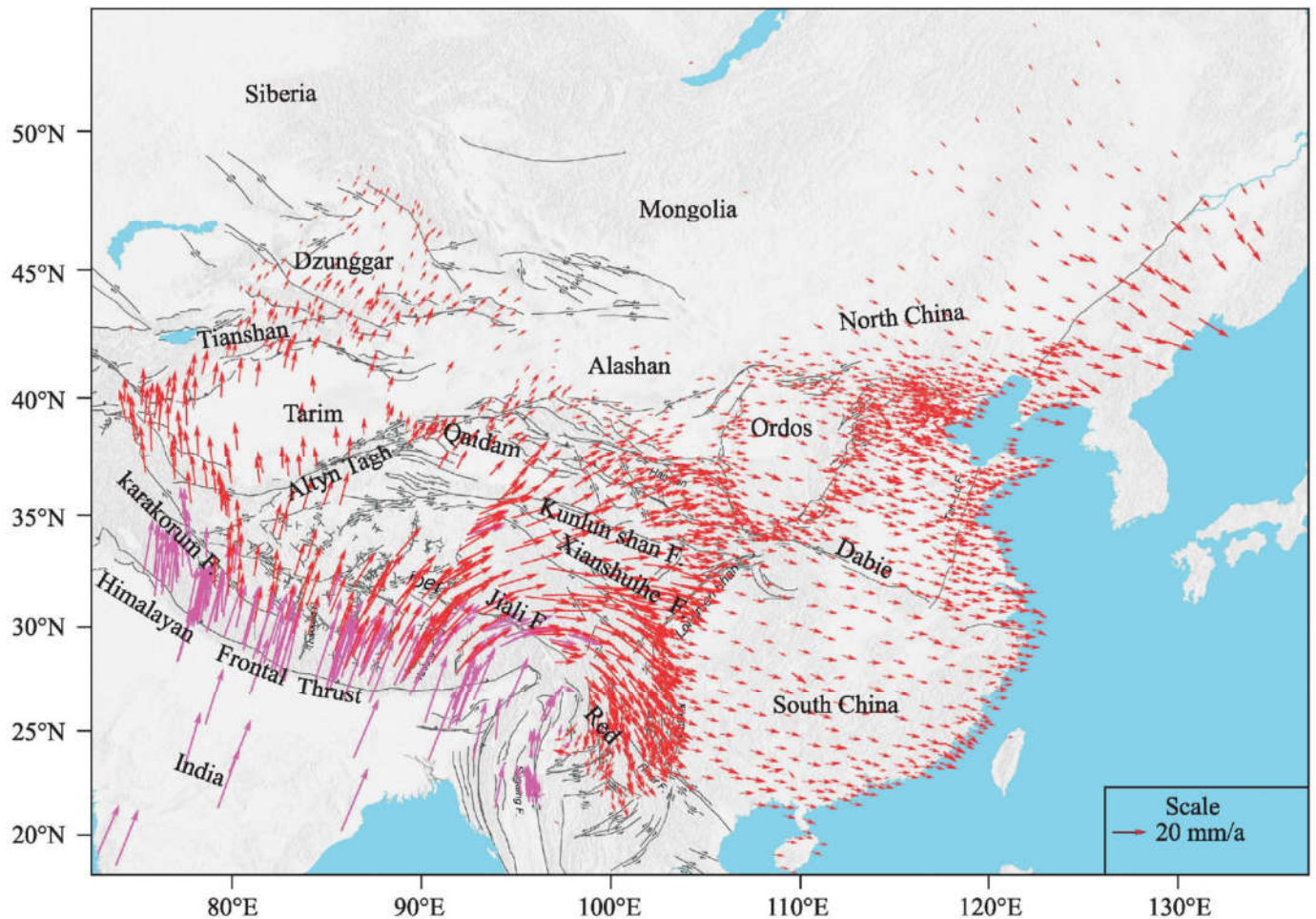
□ Japonska



M. Kuhar – FG (Dinamična Zemlja)

31

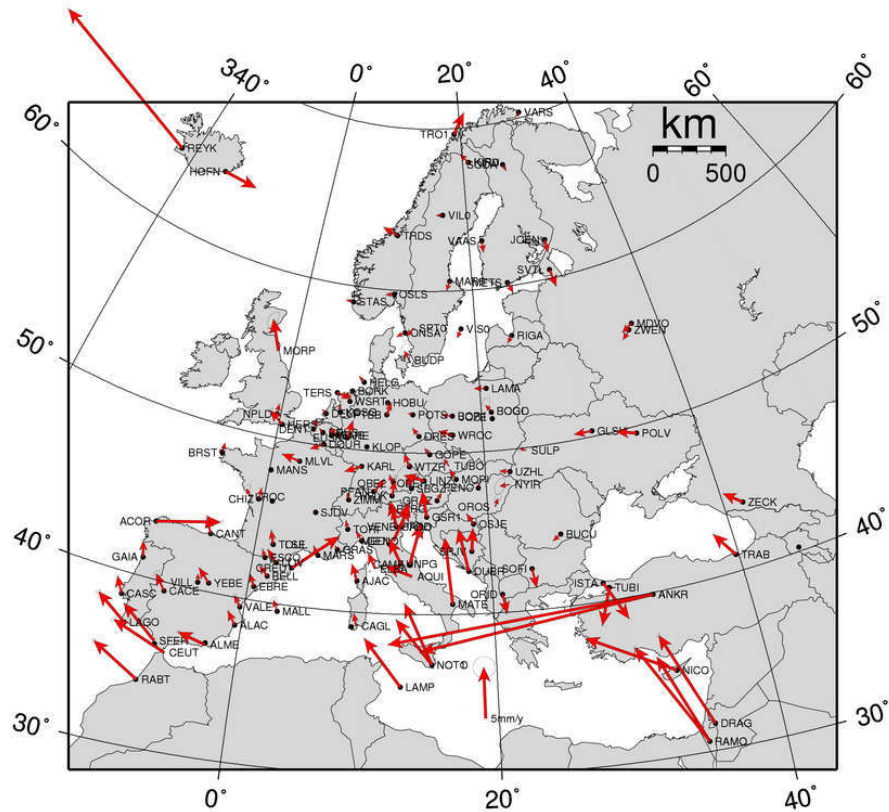
# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj



IV

# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj

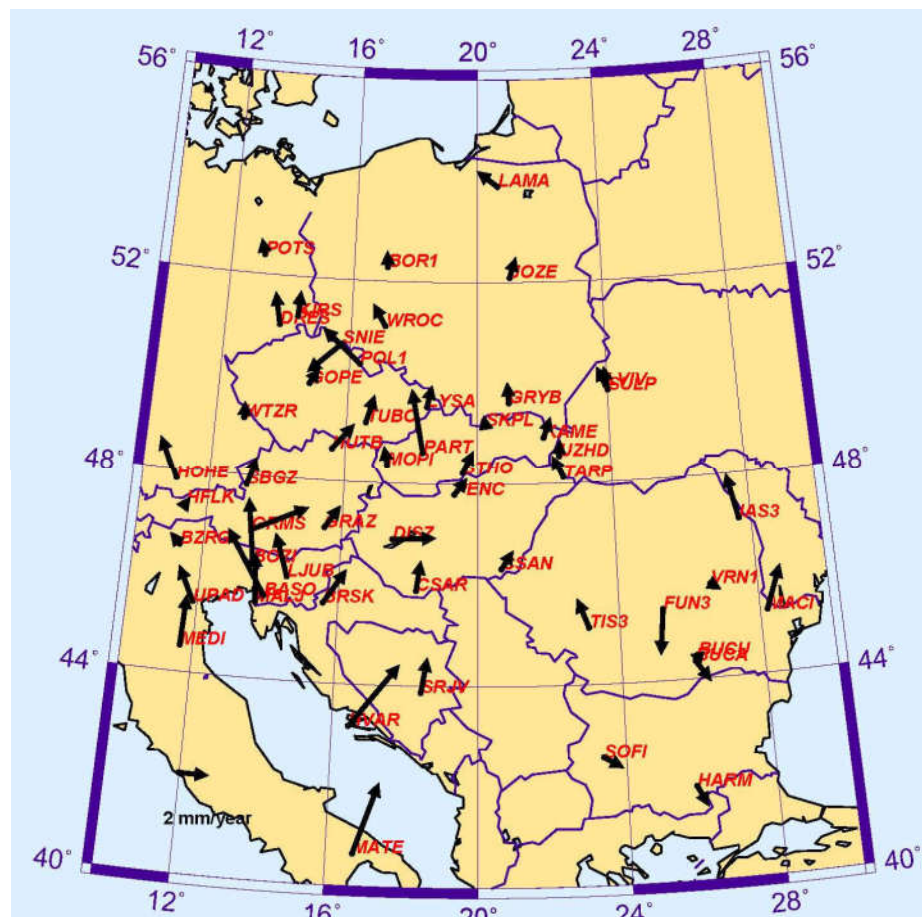
- Evropa: permanentne GNSS-postaje



M. Kuhar – FG (Dinamična Zemlja)

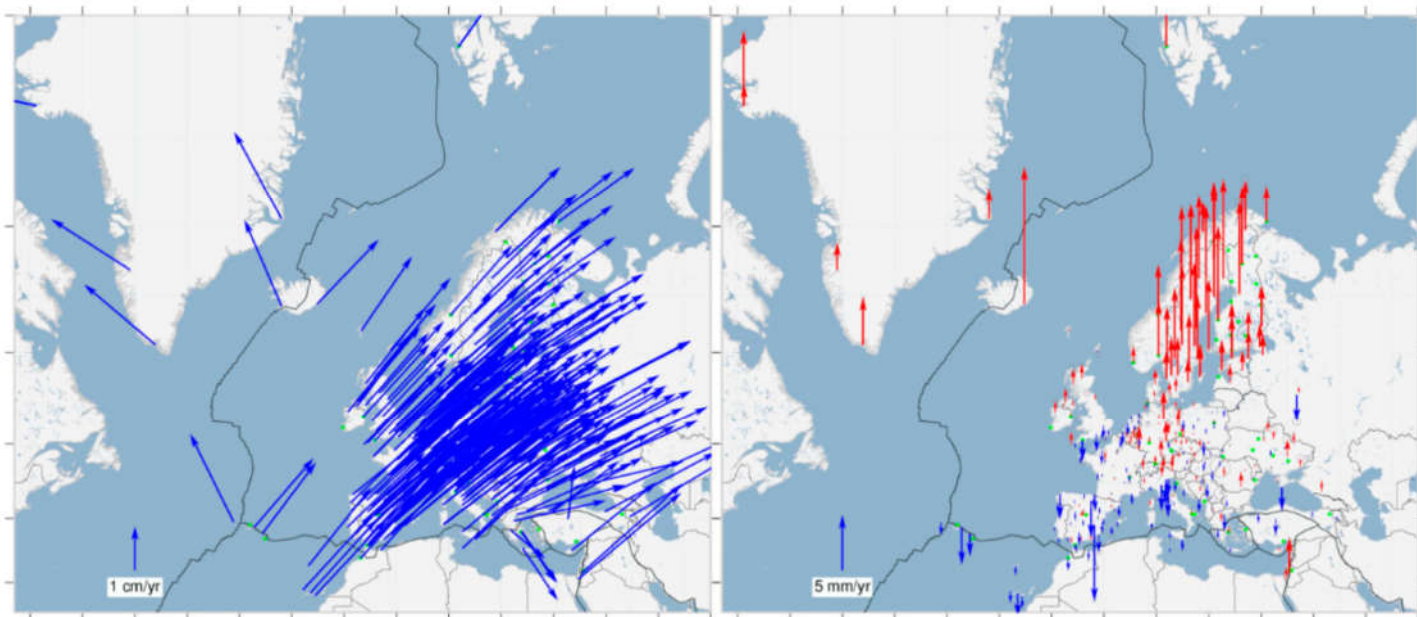
# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj

- Srednja Evropa



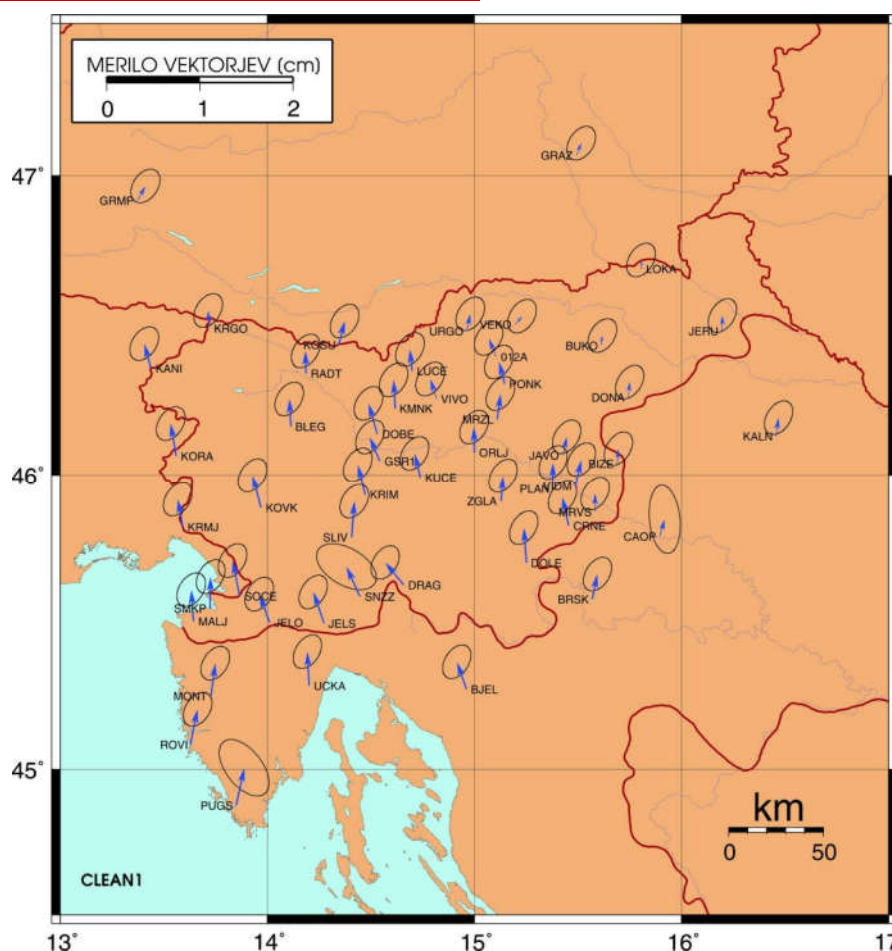
M. Kuhar – FG (Dinamična Zemlja)

# Hitrosti premikov ITRF2014 - Evropa

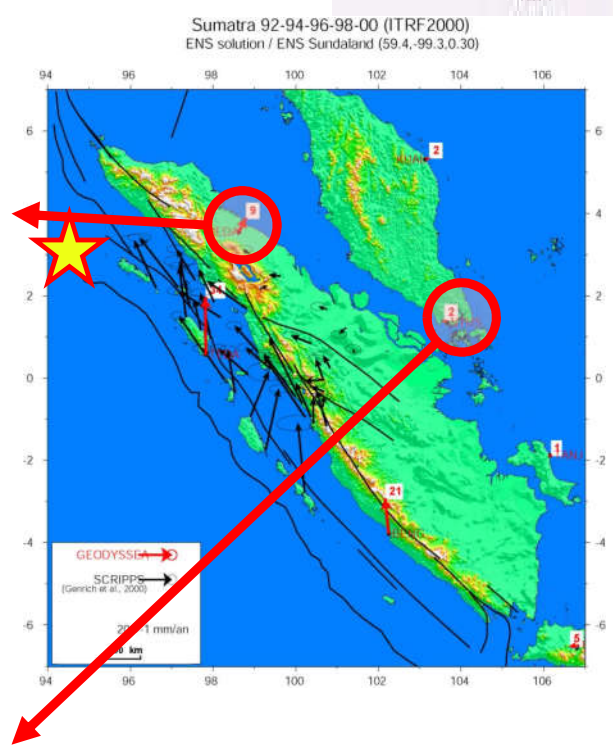
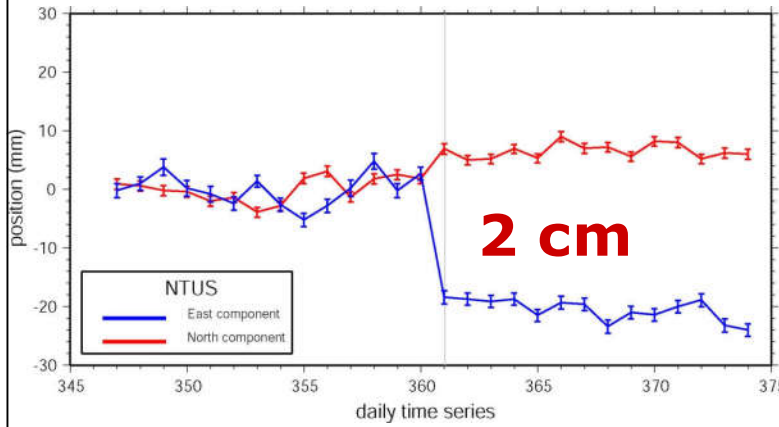
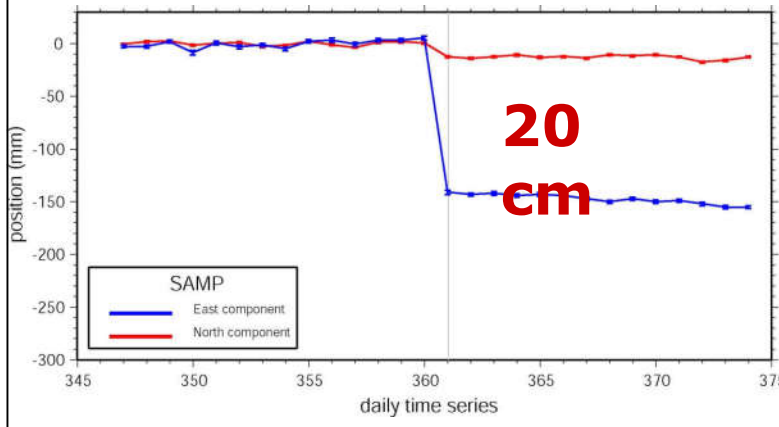


# Hitrosti premikov na osnovi GNSS-opazovanj

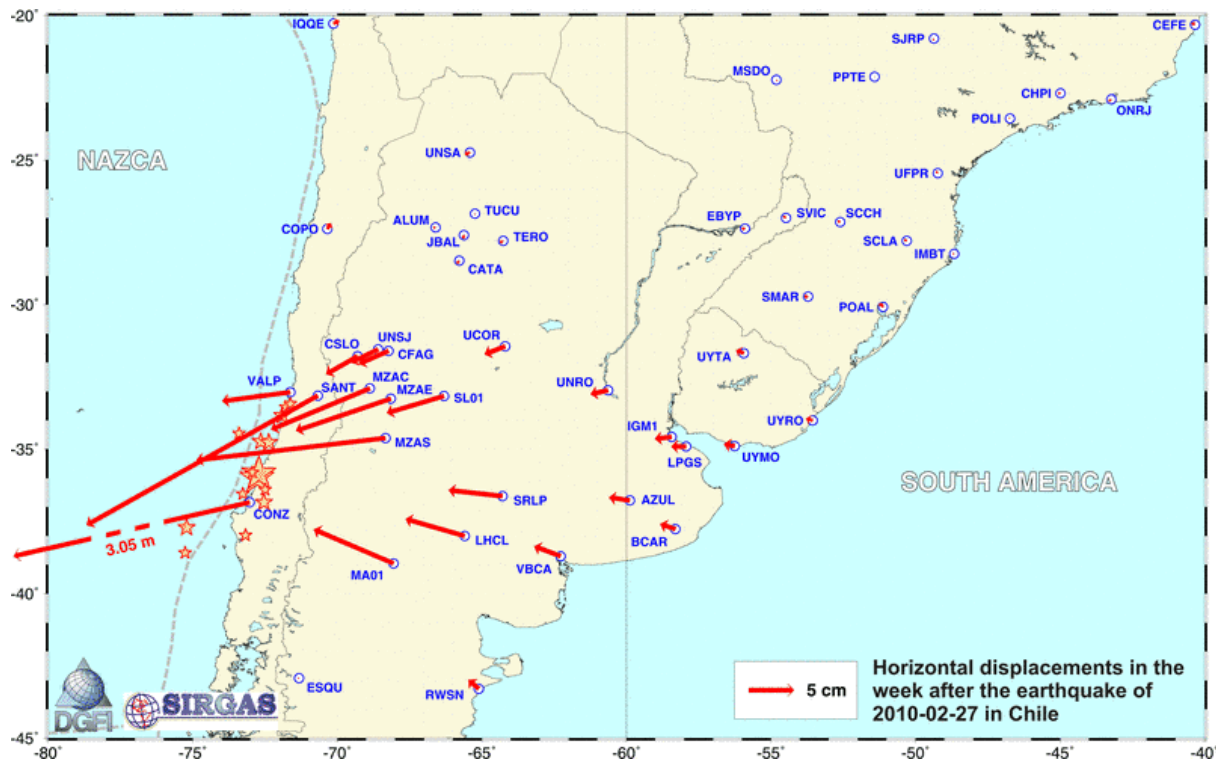
## □ Slovenija



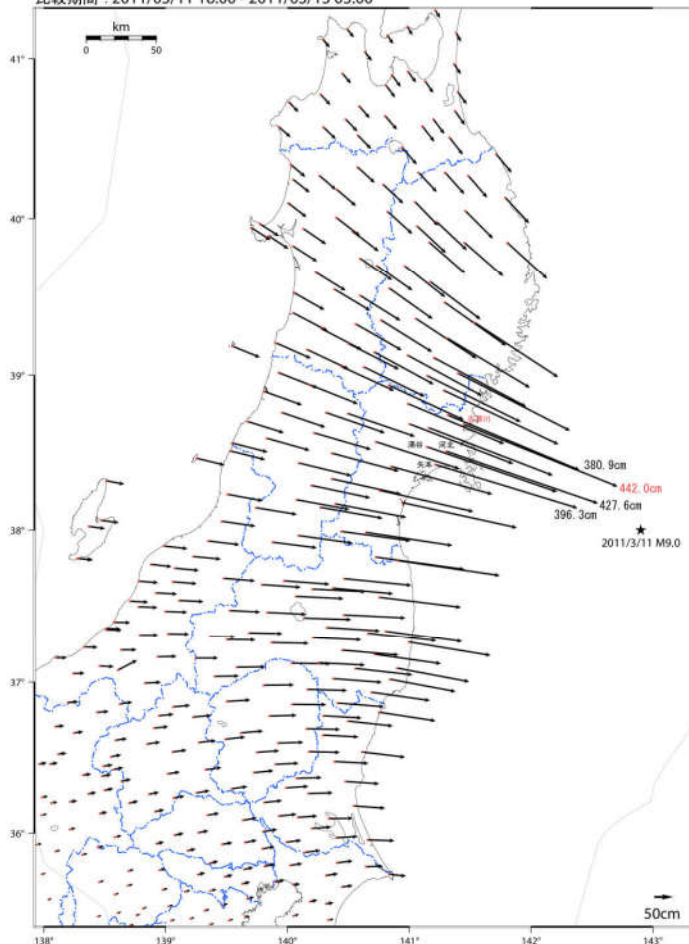
# Časovna vrsta ob potresu (Sumatra, 26. 12. 2004)



# Vektorji premika po potresu v Čilu 27.02.2010 (magn. 8,8)



基準期間：2011/03/01 21:00 - 2011/03/09 21:00  
 比較期間：2011/03/11 18:00 - 2011/03/13 03:00

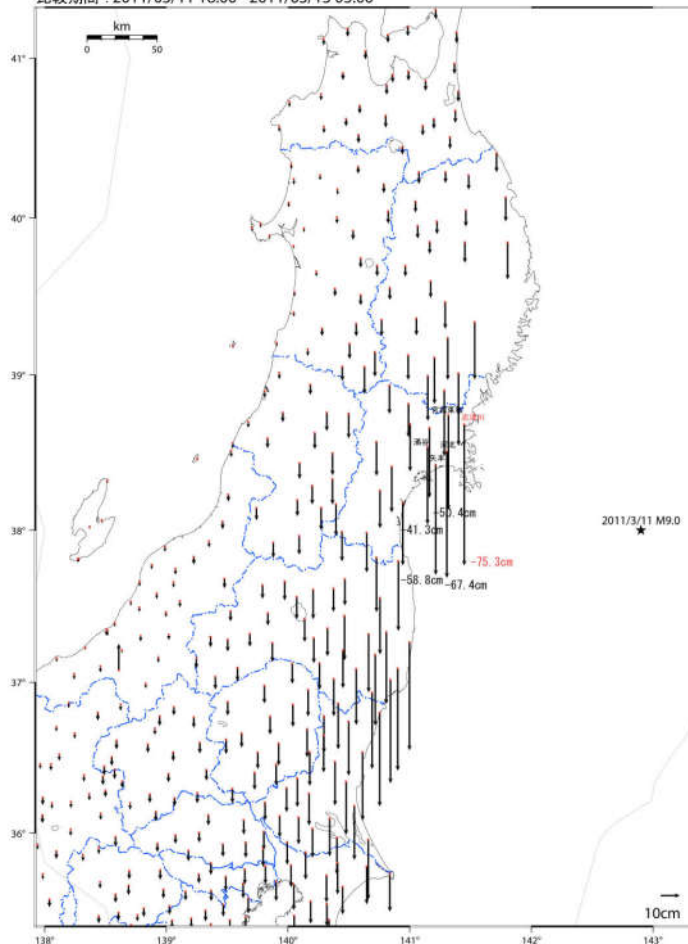


【基準：R3速報解 比較：Q3迅速解】

☆国定局：三隅（950388）  
 国土地理院

Vektorji premika po potresu na Japonskem, leta 2011, horizontalna komponenta. (potres magn. = 6,6)

基準期間：2011/03/01 21:00 - 2011/03/09 21:00  
 比較期間：2011/03/11 18:00 - 2011/03/13 03:00



【基準：R3速報解 比較：Q3迅速解】

☆国定局：三隅（950388）  
 国土地理院

Vektorji premika po potresu na Japonskem, leta 2011, vertikalna komponenta.

# Vektorji premika ob potresu v Turčiji, 6.02.2023 (točke omrežja TUSAGA-Aktif)

