

# Referenčni koordinatni sistemi – osnovni pojmi

---

- Standardi organizacije International Organization for Standardization (ISO):
  - SO/TC211 Geographic information/Geomatics;
  - ISO/DIS 6709: Standard representation of geographic point location by coordinates, 2007;
  - ISO/DIS 19104: Terminology, 2003;
  - ISO/TC 211 1013: Spatial referencing by coordinates, 2000;
- **Koordinate** ("coordinate"): n števil, ki določajo položaj točk v n-raszežnem prostoru.
- **Koordinatni sistem** ("coordinate system"): množica (matematičnih) pravil (zakonitosti), ki definira kako se bodo koordinate pripisale točkam (preslikale v točke).
- **Sestavljen koordinatni sistem** ("compound coordinate system"): opis položaja s pomočjo dveh neodvisnih referenčnih koordinatnih sistemov (običajno položaj + višina)

## Referenčni koordinatni sistemi – osnovni pojmi (2)

---

- **Referenčni koordinatni sistem**: koordinatni sistem, ki je vezan na Zemljo z "datumom".
- Referenčni koordinatni sistem je razširitev pojma koord. sistem, saj moramo definirati dodatne količine, ki opisujejo matematično-fizikalne zveze znotraj sistema, npr. model težnostnega polja Zemlje, model časovnih sprememb koordinat (pojava precesije, nutacije, premiki tektonskih plošč...).

# Koordinatni sistemi

---

- Dejstvo je, da živimo v tridimenzionalnem Evklidskem prostoru. To je aksiom, ki ga ni potrebno dokazovati. Da bi lahko podali geometrijski položaj točke v tem prostoru je primerno sredstvo vzpostavitve koordinatnega sistema.
- Položaj točke lahko podamo relativno glede na druge točke ali pa v referenčnem koordinatnem sistemu. Ker v Naravi ni mirovanja in ker se Vesolje giblje, je položaj točke vedno funkcija časa.
- Položaj točke zato podajamo s štirimi komponentami. Poleg geometrijskih komponent položaja podamo tudi časovno komponento.
- Koordinatni sistemi v geodeziji predstavljajo primerno sredstvo za izražanje splošnih fizikalnih zakonov in podajajo zvezo z geodetskimi meritvami. V osnovi je izbira koordinatnega sistema poljubna, vendar je smiselno izbrati takšne koordinatne sisteme, ki bodo v čim večji meri poenostavili predstavitev rezultatov meritev oz. različnih izračunov.

# Geodetski datum

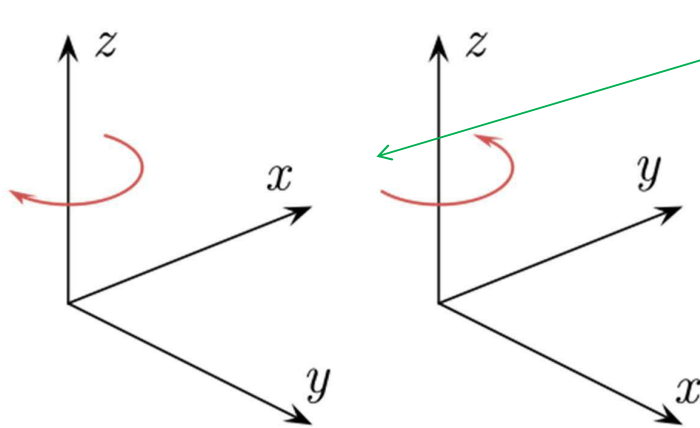
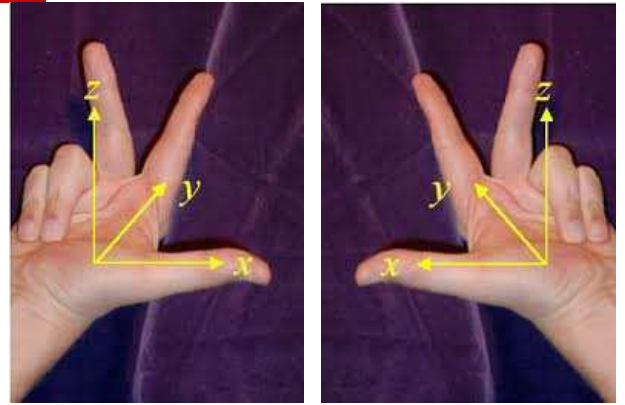
---

- Geodetski datum je nizpoljubnih numeričnih ali geometrijskih količin, ki so izhodišče za izračun drugih količin. Več definicij:
- Geodetski datum najmanjše število parametrov, ki definirajo koordinatni sistem, vključno z njegovim izhodiščem, orientacijo in merilom (C. Jekeli).
- Geodetski datum določa orientacijo vsakega koordinatnega sistema glede na globalni geocentrični k.s. in s tem tudi glede na telo Zemlje (W. Torge).
- Geodetski datum predstavljajo:
  - "dane" količine, potrebne za določitev "novih" količin v izbranem koordinatnem sistemu.
  - Geodetski datum morajo zagotoviti vnaprej dane (zunanje) količine.

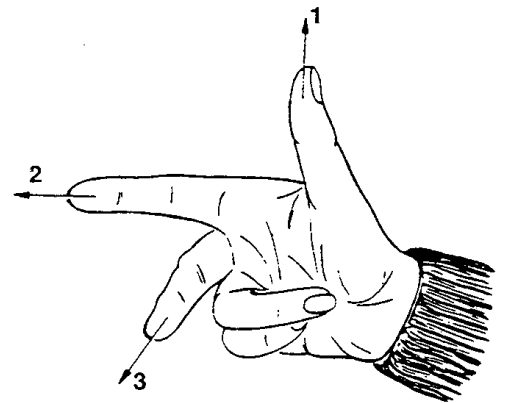
# Pravokotni in krivočrtni koord. sistemi (1)

□ Pravokotni, kartezični koord. sistem:

- René Descartes (lat. Cartesius), XVII. st.
- desni in levi pravokotni k.s. (desnosučni in levosučni k.s.)

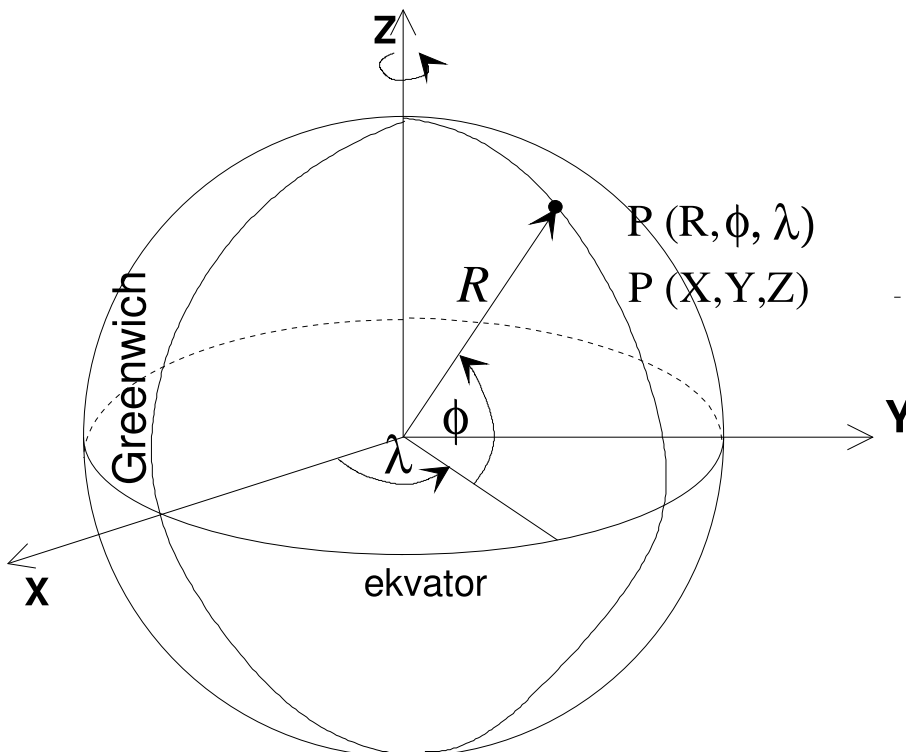


gledamo od zunaj



M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

# Pravokotni in krivočrtni koord. sistemi (2)



P:  $X = 4277514,3$   
 $Y = 1013544,2$   
 $Z = 4611430,6$

P:  $\phi = 46^\circ 22' 13,4''$   
 $\lambda = 13^\circ 19' 48,8''$

M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

## Pravokotni in krivočrtni koord. sistemi (3)

- Krivočrtne koordinate  $(q_1, q_2, q_3)$  izpeljemo iz kartezičnih kot:

$$q_i = q_i(x, y, z), \quad i=1, 2, 3$$

Zgornja enačba lahko vsebuje poljubno število parametrov.

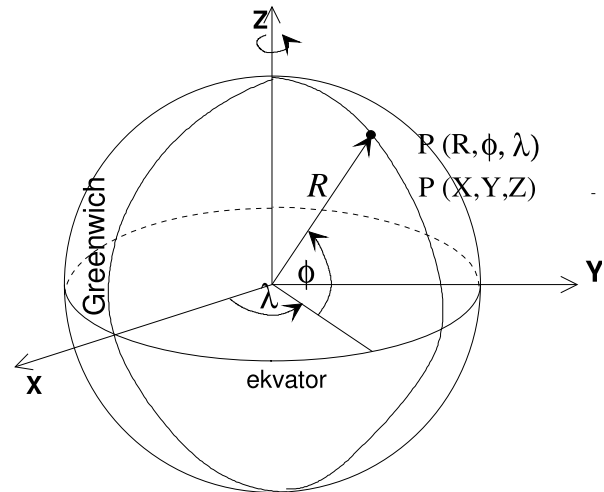
- Primer ne-parametričnega koordinatnega sistema so *krogelne (sferne) koordinate*  $R, \phi, \lambda$ .

- Primer pretvorbe: Pretvorba iz  $(R, \phi, \lambda)$  v  $(X, Y, Z)$ :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \phi \end{bmatrix}$$

- Pretvorba iz  $(X, Y, Z)$  v  $(R, \phi, \lambda)$ :

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \lambda \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{Z}{d}; \arcsin \frac{Z}{R} \\ \arctan \frac{Y}{X} \\ \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \end{bmatrix} \quad d = \sqrt{Y^2 + X^2}$$



## Pravokotni in krivočrtni koord. sistemi (4)

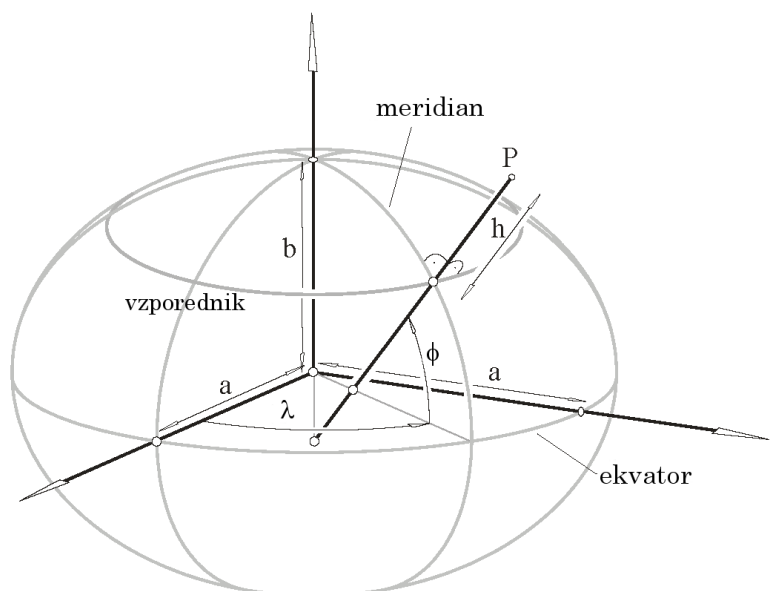
- Geodetske (elipsoidne) koordinate*  $\phi, \lambda$  predstavljajo dvoparametrični sistem krivočrtnih koordinat (parametra sta  $a, f$ ).

- Pretvorba iz  $(\phi, \lambda, h)$  v  $(X, Y, Z)$ :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ [(1 - e^2)N + h] \sin \phi \end{bmatrix}$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

$$e^2 = 2f - f^2$$



## Definicija in orientacija koordinatnih sistemov (1)

---

- Za definicijo vsakega koordinatnega sistema moramo podati naslednje:
  - a) razsežnost koordinatnega sistema,
  - b) položaj izhodišča koordinatnega sistema,
  - c) orientacijo koordinatnih osi,
  - d) vrsto koordinat (kartezične, krivočrtne), ki definirajo položaj točk glede na izbrani koordinatni sistem.

## Definicija in orientacija koordinatnih sistemov (2)

---

- Orientacija koordinatnega sistema se poda z definicijo naslednjih pojmov:
  - 1) prva osnovna smer oz. prva koordinatna os (os rotacije Zemlje, navpičnica);
  - 2) prva osnovna ravnina, ki je vedno pravokotna na prvo osnovno smer (ravnina ekvatorja, horizontska ravnina);
  - 3) druga osnovna ravnina, ki je pravokotna na prvo osnovno ravnino in vsebuje prvo osnovno os; drugo ravnino pogosto izberemo dogovorno (Greenwich), ali pa je določena z naravnimi pojavi (ravnina kolurja enakonočja);
  - 4) druga osnovna os je presečišče prve in druge osnovne ravnine (os X);
  - 5) tretja koordinatna os se izbere tako, da bo k.s. desni oz. levi.
  - 5) Definirati je potrebno začetek in smer štetja kotov v osnovni ravnini.

# Referenčni sistemi in sestavi (1)

---

- Koordinatni sistem moramo:
  1. teoretično definirati,
  2. praktično realizirati,
  3. mednarodno uveljaviti, kot sistem, ki je primeren za vsakdanjo uporabo.
- Teoretična definicija in praktična izvedba sta bila bili pogoj za uvedbo pojmov: **referenčni sistem** ("reference system" in referenčni sestav "reference frame").
- Referenčni sistem je višji pojem, ki vključuje tudi pojem referenčni sestav, nanaša se na množico fizikalnih in matematičnih teorij različnih pojavov, ki jih upoštevamo pri definiciji referenčnega sistema samega.
- Referenčni sestav predstavlja praktično realizacijo (materializacijo) referenčnega koordinatnega sistema.
- V praksi so realizirani samo **konvencionalni (dogovorjeni)** referenčni sistemi.

# Referenčni sistemi in sestavi (2)

---

- Koordinatni sistemi, ki so v uporabi v geodeziji in astronomiji so neločljivo povezani z Zemljo in njenim gibanjem v prostoru. Zemlja se vrti okoli svoje osi (rotacija) in se hkrati giblje okoli Sonca (revolucija). Poleg tega, Luna, Zemljin naravni satelit, z drugimi umetnimi Zemljinimi sateliti kroži okoli Zemlje. Ta tri periodična gibanja so bistvenega pomena za definicijo geodetskih in astronomskih koordinatnih in časovnih sistemov.
- Glede na omenjena gibanja ločimo tri vrste referenčnih (koordinatnih) sistemov:
  - nebesne koordinatne sisteme,
  - terestrične koordinatne sisteme,
  - orbitalne koordinatne sisteme.

# Nebesni referenčni sistemi

---

- Nebesni koordinatni sistemi se uporabljajo v satelitski geodeziji in astronomiji za določitev koordinat nebesnih teles.
- Definirani so s smermi proti nebesnim telesom (zvezdam) oz. so navezani na izvengalaktične izvire radijskega valovanja (kvazarji). Predstavljajo približek t.i. **inercialnih** koordinatnih sistemov. V praksi so vsi inercialni k.s. dogovorni → **CIS** Conventional Inertial System, in vsak približek predstavlja kvazi-inercialni k.s.
- Vse dogovorjene inercialne referenčne sisteme lahko uvrstimo med t.i. **Conventional Celestial Reference System – CCRS**, Konvencionalne nebesne referenčne sisteme.
- Zaradi različne natančnosti praktične realizacije kvazi-inercialnih sistemov, inercialne sisteme vzpostavljamo v hierarhičnem smislu.

## IERS



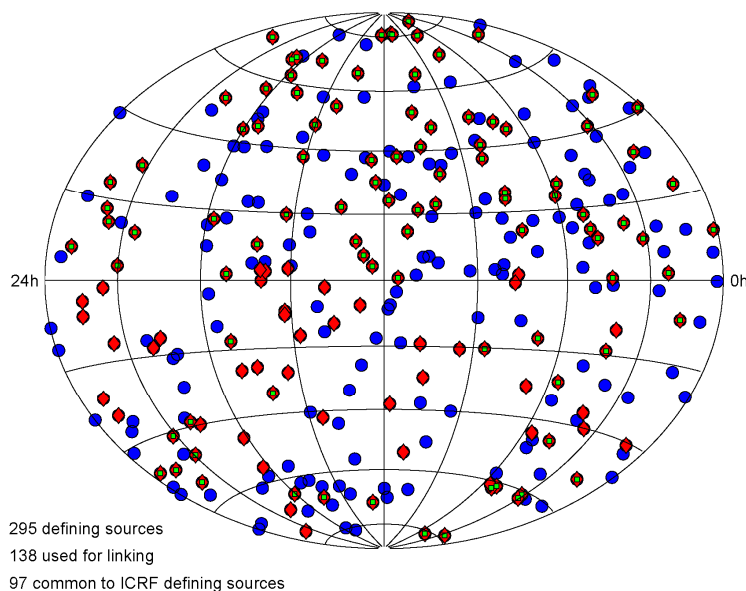
- 
- **IERS - International Earth Rotation and Reference System Service**, mednarodna znanstvena ustanova, članica FAGS (Federation of Astronomical and Geophysical Data Services). Ustanovili so jo leta 1988 IUGG in IAU (International Astronomical Union).
  - IERS pripravlja podatke, publikacije in splošne informacije o rotaciji Zemlje (Earth Orientation Parameters – EOP) in skrbi za vzpostavitev in uveljavitev nebesnih in terestričnih referenčnih sistemov in sestavov.
  - Vsi sedanji primarni nebesni in terestrični referenčni sistemi in sestavi vsebujejo predpono IERS.

# (IERS) ICRS

- ICRS - International Celestial Reference System je primarni nebesni referenčni sistem. Njegova realizacija je
- ICRF – International Celestial Reference Frame:
  - primarni ICRF tvori katalog ekvatorskih koordinat 608 izvengalaktičnih izvirov radijskega valovanja (kvazarji) določenih s tehniko VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Od tega je 212 osnovnih izvirov ("defining sources"). Položaji so podani z negotovostjo 0,5 mas ("miliarcsecond" – tisočinka ločne sekunde).
  - V optičnem področju tvori ICRF HIPPARCOS katalog 144 000 zvezd (večina zvezd ima negotovost položaja 1 mas; "mas" miliarcsecond).

## ICRF2

- Druga realizacija ICRF, stopil v veljavo 1. januarja 2010.
- Rezultat 30-letnega opazovanj s tehniko VLBI 1979-2009.
- 295 osnovnih izvirov, skupaj 3414 izvirov; stabilnost osi 10  $\mu$ as ("microarcsecond")





# Terestrični referenčni sistemi

---

- Terestrični koordinatni sistemi so "pritrjeni" na Zemljo in skupaj z njo rotirajo v prostoru. Definirajo koordinate točk na zemeljskem površju. Med njimi ločimo:
  - geocentrične koordinatne sisteme,
  - topocentrične koordinatne sisteme.
- Vsak terestrični referenčni sistem je definiran z določenim številom materialnih točk na zemeljski površini (npr. observatoriji) in rotira skupaj z Zemljo.

## Idealni terestrični ref. sistem

---

- Izhodišče v masnem središču Zemlje (vse mase skupaj: Zemlje, oceani in atmosfera).
- $Z$ -os bi naj sovpadala z vrtilno osjo Zemlje.
- Masno središče ni dostopno, trenutno vrtilno os ni možno določiti z meritvami.
- Idealnega terestričnega ref. sistema ni možno ustvariti, zato se skuša z izbiro ustreznih dogovorov (konvencij) temu čimbolj približati.

# Int. Terrestrial Reference System (ITRS)

---

- (IERS) ITRS je približek idealnega terestričnega ref. sistema:
  - Izhodišče v masnem središču Zemlje.
  - Dolžinska enota SI-meter. Merilo v skladu z dosežki splošne teorije relativnosti.
  - Orientacija osi je usklajena z orientacijo sistema BIH (Bureau International de l'Heure) za epoho 1984. S tem se želi doseči konsistenca s prejšnjimi realizacijami globalnih koord. sistemov.
  - Za časovne spremembe je podana zahteva, da je vsota vseh rotacij na Zemljini obli glede premikov tektonskih plošč enaka nič.
  - elipsoid: GRS80.
- Realiziran je s tehnikami VLBI, SLR, LLR, GNSS in DORIS.

## ITRF (1)

---

- ITRF<sub>yy</sub> je verzija koordinatnega sestava, kot ga definira izbrana množica točk za praktično realizacijo ITRS koordinatnega sistema. Končnica **yy** označuje posamezno realizacijo sistema oziroma časovno epoho realizacije.
- Posamezne časovne realizacije zaradi modeliranja časovno odvisnih vplivov:
  - premiki tektonskih plošč,
  - plimovanje trdne Zemlje (Zemljine skorje),
  - post-ledenodobna dvigovanja zemeljskega površja,
  - gibanje Zemljinih polov,
  - instrumentalni pogreški.

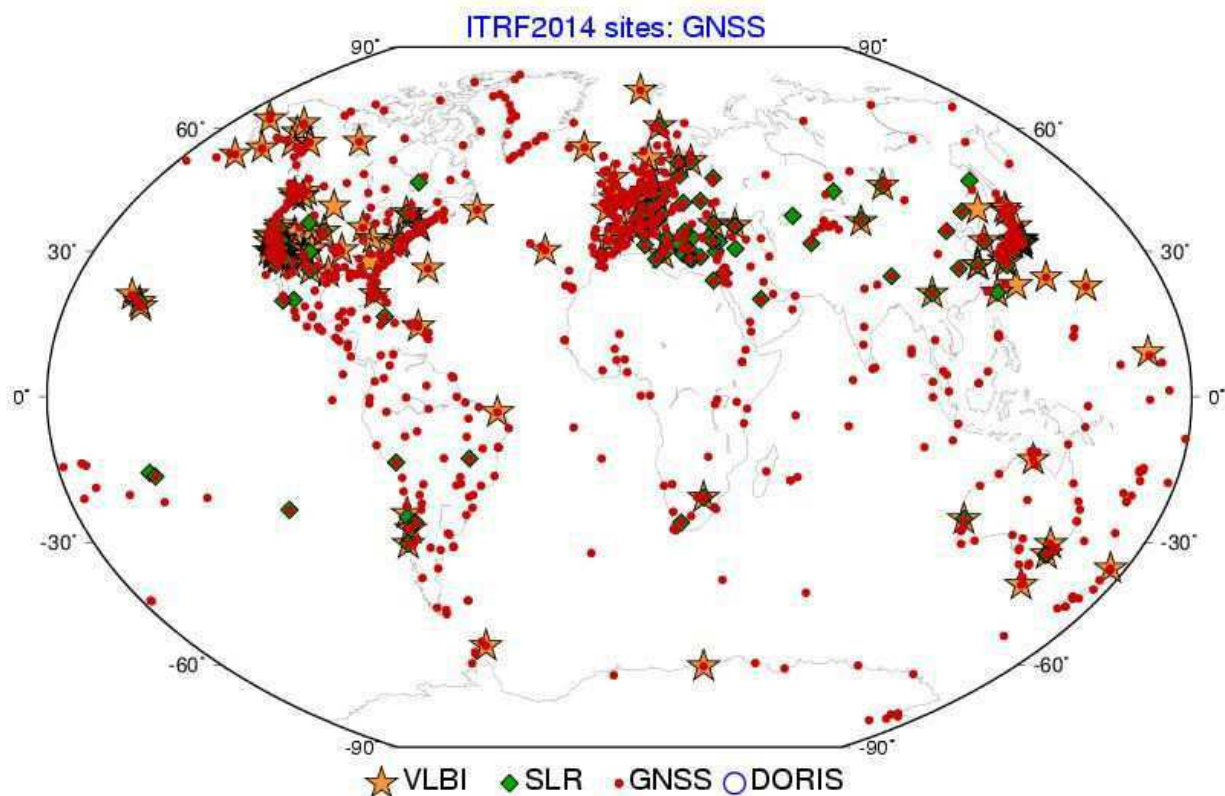
# ITRF (2)

- Koordinate točke v poljubni epohi v izbranem ref. sestavu dobimo kot:

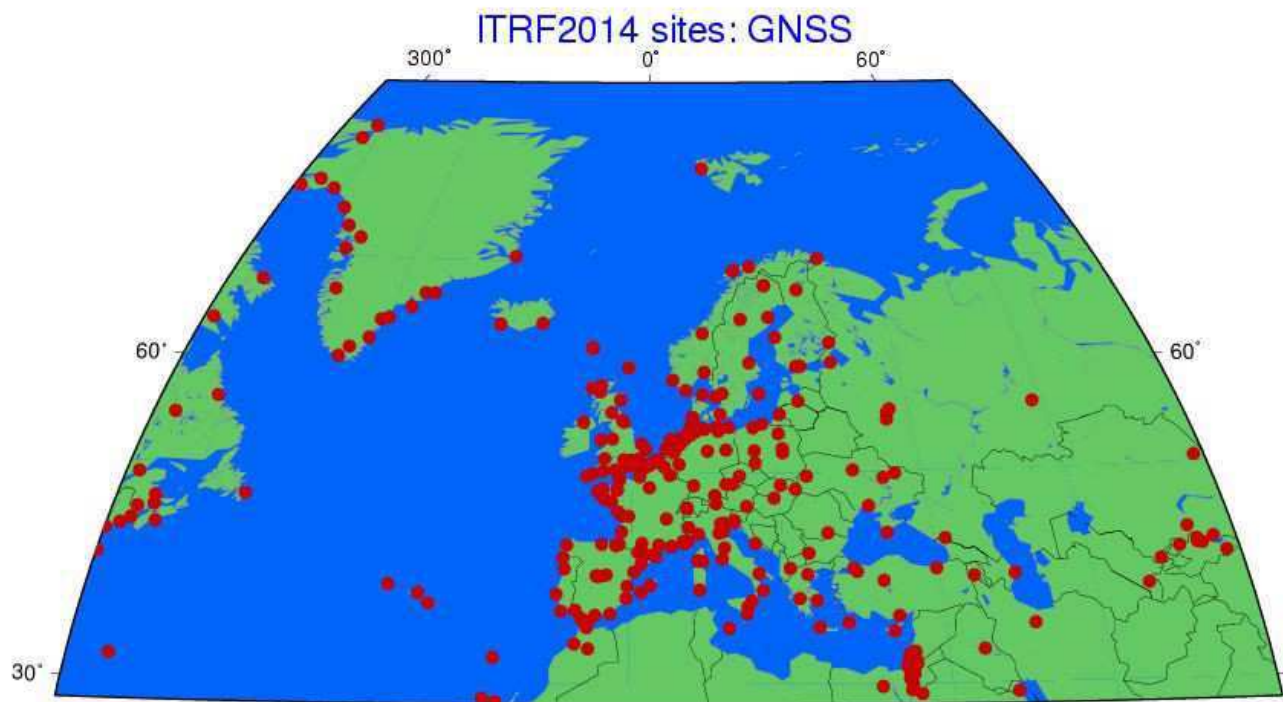
$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t_0) + \mathbf{v} \cdot (t - t_0) + \Sigma \Delta \mathbf{x}(t)$$

- kjer so:  $t_0$  referenčna epoha,  $v$  vrednost lokalne spremembe položaja točke (hitrost) in  $\Delta x$  popravek koordinat zaradi časovno odvisnih vplivov.
- Realizirane verzije: ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF94, ITRF95, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014
- Trenutno zadnja verzija je **ITRF2014**.

## ITRF2014 mreža točk

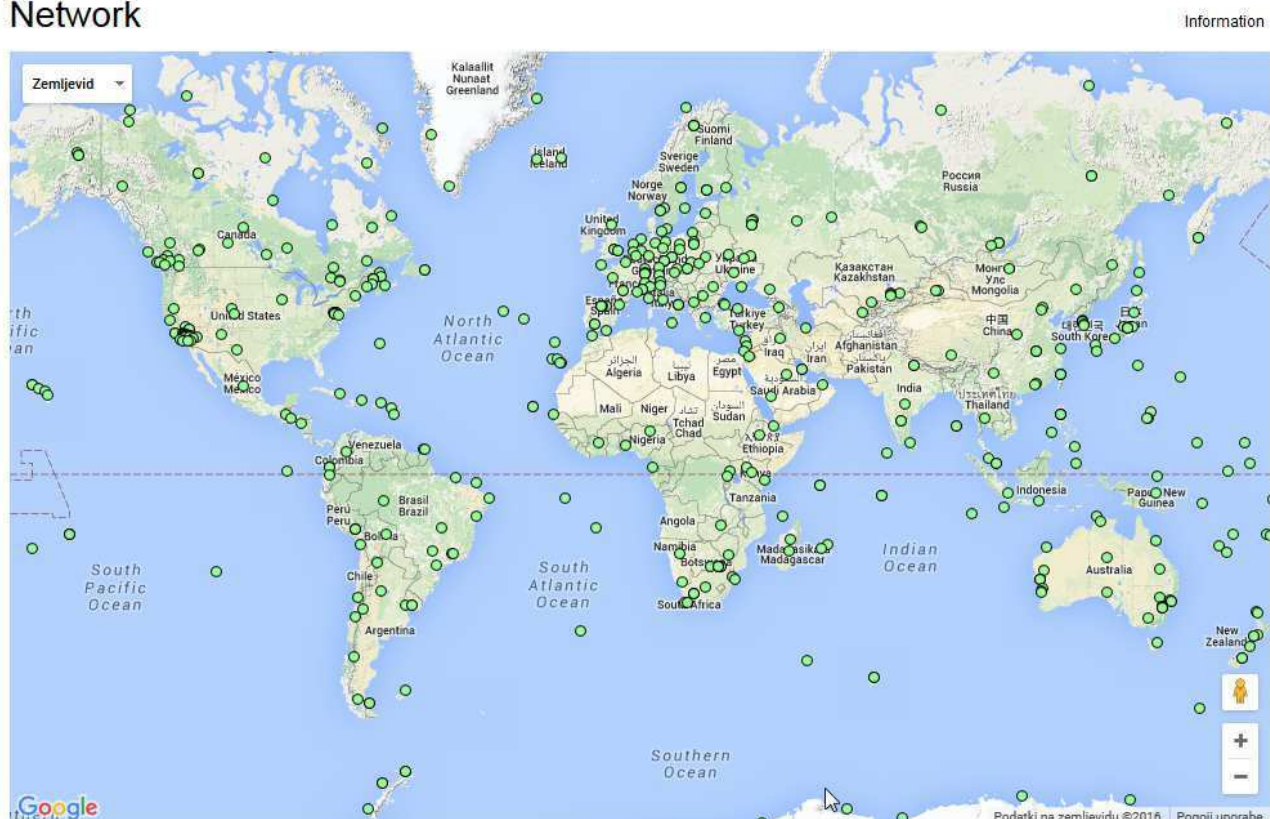


# ITRF2014 - mreža GNSS točk v Evropi



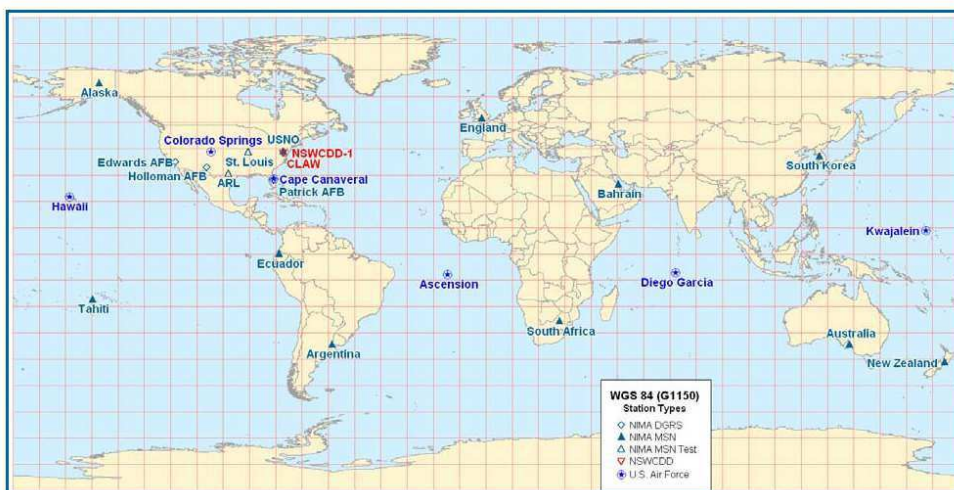
## IGS

- IGS - International GNSS Service; dvesto ustanov po svetu, ki obdeluje Network



# WGS 84

- **World Geodetic System 1984.** Vzpostavil ga je Ameriško Obrambno ministrstvo za operativne potrebe tehnologije GPS.
- Izhodišče in orientacija koordinatnih osi WGS-84 koordinatnega sistema sta realizirana s poznanimi položaji nadzornih postaj GPS sistema.
- Leta 2002 je stopila v veljavo nova verzija sistema WGS84(G1150): ponovno določene koordinate nadzornih postaj GPS. Globalna natančnost točk znaša približno 1 cm.



M. Kuhar - Referen

25

## Referenčne postaje WGS 84 (G1150)

Table 1. WGS 84 (G1150) Cartesian coordinates\* and velocities for epoch 2001.0

Station Location	NIMA Station Number	X (km)	Y (km)	Z (km)	$\dot{X}$ (cm/yr)	$\dot{Y}$ (cm/yr)	$\dot{Z}$ (cm/yr)
<b>Air Force Stations</b>							
Colorado Springs	85128	-1248.597295	-4819.433239	3976.500175	-1.8	0.1	-0.4
Ascension	85129	6118.524122	-1572.350853	-876.463990	-0.3	-0.5	1.0
Diego Garcia	85130	1916.197142	6029.999007	-801.737366	-4.2	2.0	3.1
Kwajalein	85131	-6160.884370	1339.851965	960.843071	2.1	6.7	2.7
Hawaii	85132	-5511.980484	-2200.247093	2329.480952	-1.0	6.3	3.0
Cape Canaveral	85143	918.988120	-5534.552966	3023.721377	-1.0	-0.2	0.2
<b>NGA Stations</b>							
Australia	85402	-3939.182131	3467.075376	-3613.220824	-4.08	0.36	4.73
Argentina	85403	2745.499065	-4483.636591	-3599.054582	0.21	-1.00	0.70
England	85404	3981.776642	-89.239095	4965.284650	-1.38	1.65	0.77
Bahrain	85405	3633.910757	4425.277729	2799.862795	-2.97	0.91	2.53
Ecuador	85406	1272.867310	-6252.772219	-23.801818	0.30	0.04	0.99
US Naval Observatory	85407	1112.168358	-4842.861664	3985.487174	-1.48	-0.01	0.10
Alaska	85410	-2296.298410	-1484.804985	5743.080107	-2.22	-0.36	-0.92
Alaska**	85410	-2296.298460	-1484.805050	5743.080090	-2.22	-0.36	-0.92
New Zealand	85411	-4780.787068	436.877203	-4185.258942	-2.35	1.92	2.20
South Africa	85412	5066.232133	2719.226969	-2754.392735	0.01	2.09	1.40
South Korea	85413	-3067.861732	4067.639179	3824.294063	-2.90	-0.76	-1.02
Tahiti	85414	-5246.403866	-3077.285554	-1913.839459	-4.25	4.68	2.91

\* Coordinates are for the electrical phase centers of the antennas.

\*\* Post 3 November 2002 earthquake. Steady-state velocity is assumed to be unchanged.

# WGS 84 (G1150 – G873)

Table 3. WGS 84 (G1150) minus WGS 84 (G873) for epoch 1997.0

Station Location	NIMA Station Number	$\Delta X$ (cm)	$\Delta Y$ (cm)	$\Delta Z$ (cm)	Total (cm)
<b>Air Force Stations*</b>					
Colorado Springs	85128	-0.2	0.3	-0.3	0.5
Ascension	85129	-8.2	-0.5	5.8	10.1
Diego Garcia	85130	-1.2	-7.0	2.8	7.6
Kwajalein	85131	10.8	1.0	-1.4	10.9
Hawaii	85132	2.6	1.7	-4.5	5.5
<b>NGA Stations</b>					
Australia	85402	-0.8	2.1	-2.2	3.2
Argentina	85403	3.7	-0.2	-5.8	6.9
England	85404	2.1	0.8	-1.0	2.5
Bahrain	85405	3.5	1.3	-1.7	4.1
Ecuador	85406	-2.0	-4.6	-3.2	6.0
US Naval Observatory	85407	2.4	-5.0	3.3	6.5
Alaska	85410	0.5	0.4	0.4	0.8
Alaska**	85410	-4.5	-6.1	-1.3	7.7
New Zealand	85411	0.0	2.5	-1.6	3.0
South Africa	85412	1.3	3.9	-4.6	6.2
South Korea	85413	-4.3	-0.3	2.8	5.2
Tahiti	85414	-1.2	-3.2	0.5	3.4

\* Cape Canaveral was not included in the WGS 84 (G873) values.

\*\* Post 3 November 2002 earthquake.

## Regionalni in nacionalni TRS – ETRS89

- ETRS89 koordinatni sistem in njegova realizacija ETRF89.
- ETRS89 je identičen z ITRS89 za leto 1989 in je fikisiran glede na evroazijsko tektonsko ploščo  $\Rightarrow$  koordinate točk "stabilne" na območju Evrope.
- Za vsak ITRFyy se lahko izračuna realizacija ETRS89 in izrazi kot ETRFyy.
- ETRF89 je bil določen na osnovi prve EUREF GPS kampanje EUREF GPS89, z navezavo na izhodiščne točke, dane v ETRF89 koordinatnem sistemu, in izvedenemi povezavami med točkami SLR/VLBI ter EUREF GPS89. Zgoščevanje ETRF koordinatnega sestava poteka predvsem z evropskimi GPS kampanjami.
- Vsaka država članica EUREF komisije je realizirala nacionalni referenčni sestav v okviru evropskega.

# ETRS89 realizacija

---

- Realizacija ETRS89 prek mreže permanentnih GNSS-postaj in nacionalnih EUREF GPS-kampanj.
- ETRS89 so sprejele mnoge evropske države kot uradni koordinatni sistem.
- EPN – EUREF Permanent Network, skoraj 250 permanentnih GNSS-postaj.

# ETRS89 definicija

---

- Sovpada z ITRS za epoho 1989.0:
  - definicija za ref. epoho 1989.0,
  - transformacijski parametri med ITRS in ETRS89 so nič (0) za epoho 1989.0.
- Pritrjen za stabilni del evroazijske tektonske plošče:
  - premika se skupaj s ploščo;
  - časovni odvodi transformacijskih parametrov so nič, razen treh sprememb kotov rotacije.

# ETRS89 realizacija

- Izraziti v ITRF<sub>YY</sub> za srednjo epoho ( $t_c$ ) meritev (merske kampanje).
- Izraziti v ETRS89 s pomočjo 14 transformacijskih parametrov (nekateri so nič).

položaji

$$X^E(t_c) = X_{YY}^I(t_c) + T_{YY} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{3YY} & \dot{R}_{2YY} \\ \dot{R}_{3YY} & 0 & -\dot{R}_{1YY} \\ -\dot{R}_{2YY} & \dot{R}_{1YY} & 0 \end{pmatrix} \times X_{YY}^I(t_c) \cdot (t_c - 1989.0)$$

hitrosti

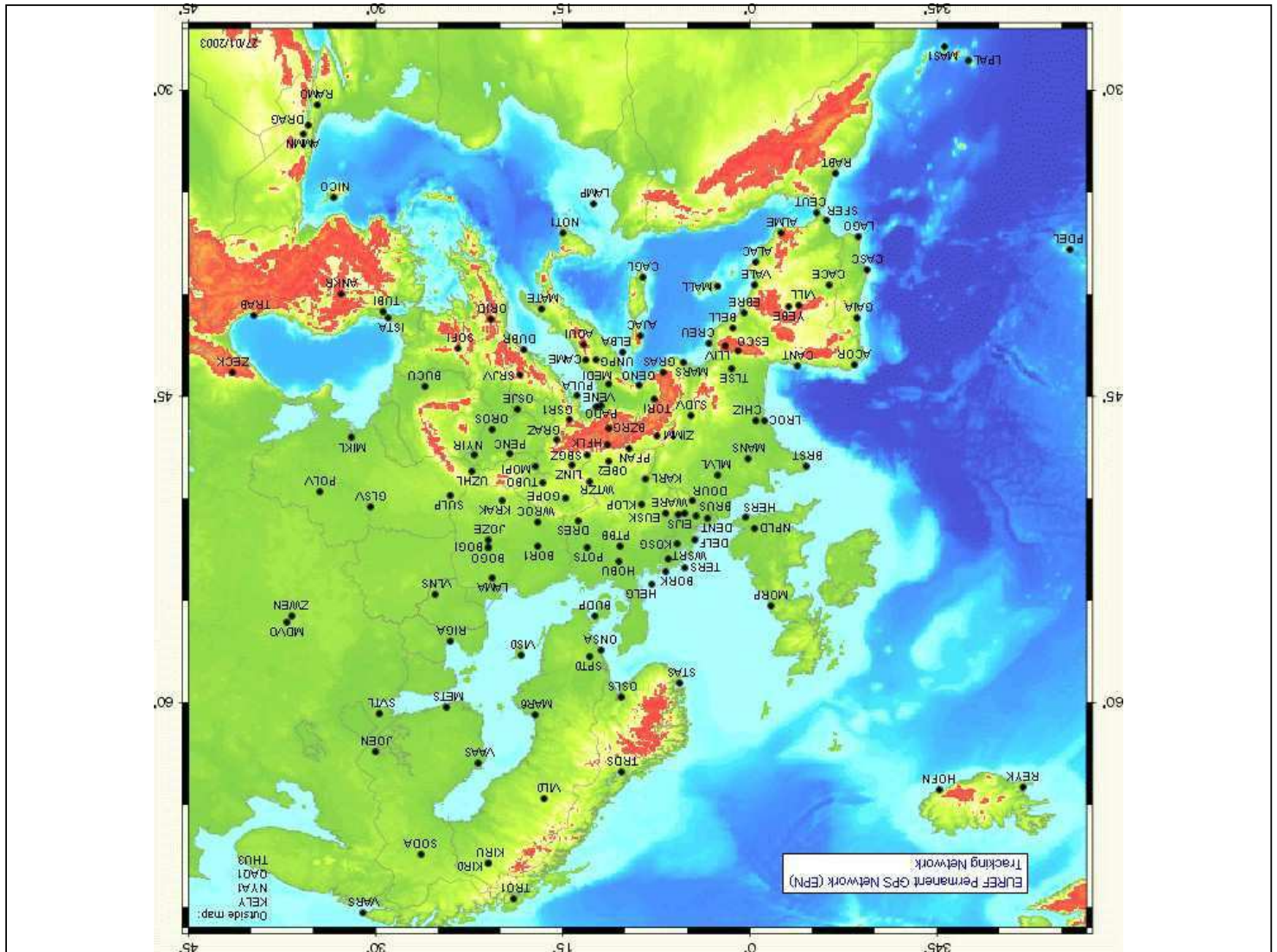
$$\begin{pmatrix} \dot{X}_{YY}^E \\ \dot{Y}_{YY}^E \\ \dot{Z}_{YY}^E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{YY}^I \\ \dot{Y}_{YY}^I \\ \dot{Z}_{YY}^I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{3YY} & \dot{R}_{2YY} \\ \dot{R}_{3YY} & 0 & -\dot{R}_{1YY} \\ -\dot{R}_{2YY} & \dot{R}_{1YY} & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_{YY}^I \\ Y_{YY}^I \\ Z_{YY}^I \end{pmatrix}$$

## 14-parametrična transformacija

Iz ITRF2008 v ETRF2000

	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3	Epoch
	mm	mm	mm	10 <sup>-9</sup>	mas	mas	mas	y
	52.1	49.3	-58.5	1.34	0.891	5.390	-8.712	00:001
Rates	0.1	0.1	-1.8	0.08	0.081	0.490	-0.792	





## EPN vektorji hitrosti hor. komponent



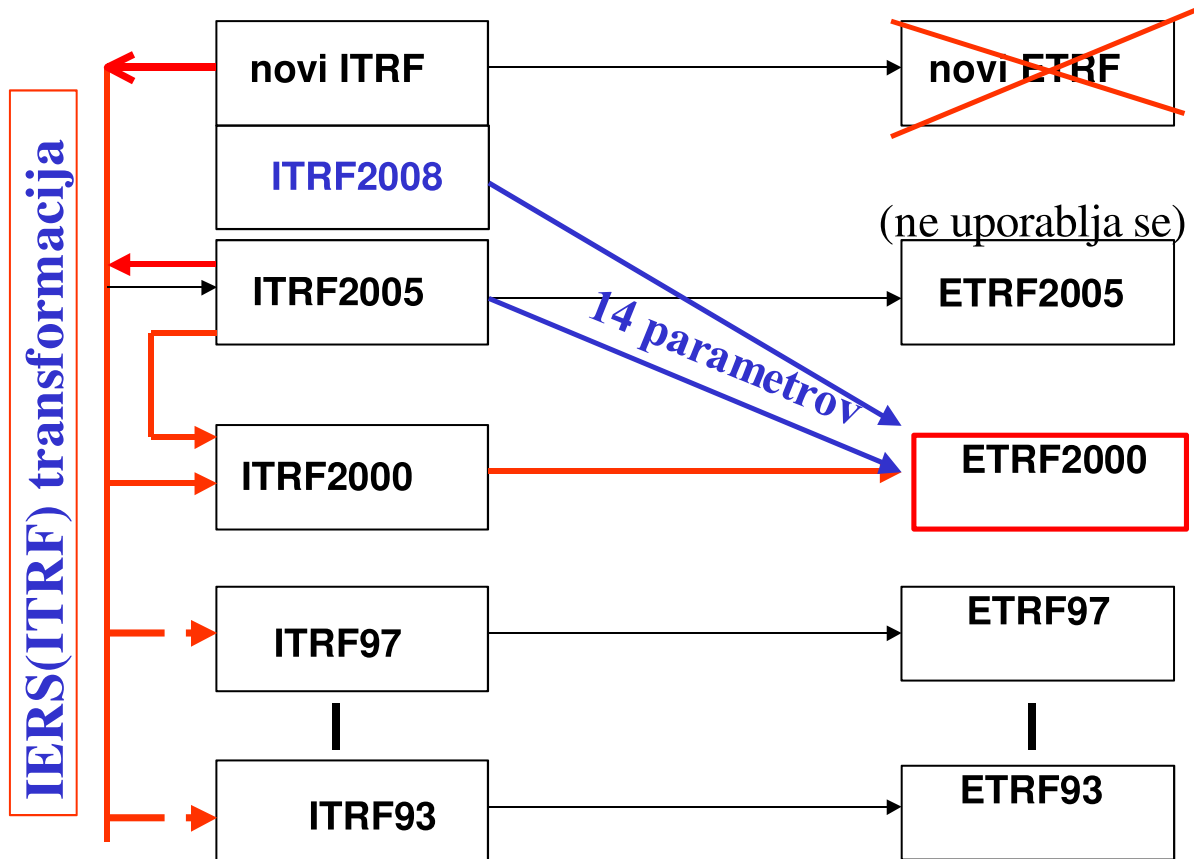
Figure 2. ETRF2000 horizontal velocities of EPN stations.

# EPN vektorji hitrosti vertikalne komponente



Figure 3. ITRF2000/ETRF2000 vertical velocities of EPN stations.

## ITRF<sub>Fyy</sub> v ETRF<sub>Fyy</sub>





□ Komponente ECRS:

