

REFERENČNI SISTEMI V GEODEZIJI

Geofizika v geodeziji

Oskar Sterle

2024/2025

Vsebina

1. Uvod.....	1
2. Gibanje Zemlje	2
2. 1. Revolucija okoli Sonca.....	2
2. 2. Gibanje rotacijske osi Zemlje	2
2. 3. Rotacija Zemlje okoli svoje osi	4
3. Gibanje točk na površini Zemlje	4
4. Vrste referenčnih sistemov	5
5. Definiranje, vzpostavitev in vzdrževanje referenčnih sistemov	6
5. 1. Terestrični referenčni sistem - TRS.....	7
5. 1. 1. Transformacija v okviru TRS – 7-parametrična transformacija	7
5. 2. Terestrični geodetski datum.....	8
5. 2. 1. Določitev izhodišča – masno središče Zemlje.....	8
5. 2. 2. Določitev orientacije koordinatnih osi.....	9
5. 2. 3. Določitev merila	9
5. 3. Terestrični referenčni sestav - TRF	9
5. 3. 1. Transformacije v okviru TRF – 14-parametrična transformacija	10
6. International Terrestrial Reference Frame - ITRF	11
7. European Terrestrial Reference Frame 1989 – ETRF89.....	15

1. Uvod

Osnovna naloga geodezije kot znanosti in kot stroke je opis geometrije prostora in objektov v njem, kar najučinkoviteje opišemo s karakterističnimi točkami obravnavanega objekta v okviru referenčnih sistemov. *Vendar za geodeta referenčni sistem ni dan, ampak ga je potrebno vzpostaviti.*

Referenčni sistem je potrebno:

- **definirati** – temelj referenčnega sistema (določimo vrsto koordinatnega sistema, izhodišče, orientacijo osi, merilo, osnovne količine/konstante, referenčni elipsoid, geoid...),
- **vzpostaviti** – materializacija referenčnega sistema (referenčni sestav) z nizom geodetskih točk/postaj/observatorijev/satelitov, modelov algoritmov in postopkov, da bo dostopen uporabniku in
- **vzdrževati** – omogočiti dostop do kakovostnega referenčnega sistema skozi daljše časovno obdobje

Kaj je **osnovno vodilo/gonilo referenčnega sistema**:

Skladnost geodetskih opazovanj in »danih količin« (koordinat točk v referenčnem sistemu) na nivoju višjem od natančnosti opazovanj.

Povezava geodetskih opazovanj in izravnanih količin s telesom Zemljo (globalno).

Razvoj referenčnih sistemov sledi:

- **razvoju tehnologije** – merskih tehnik (terestrična geodezija mm/km (ppm), satelitska geodezija mm/1000 km (10^{-3} ppb) ali bolje), pomembni vidiki uporabnosti merskih tehnik:
 - uporabnost merske tehnike in posledično število možnih geodetskih točk (npr. pri VLBI je okoli 100 točk globalno, pri GNSS več 10 000, ali celo več),
 - količina podatkov (GNSS – 100M/dan, VLBI – 1Gb/s),
 - kompleksnost obdelave opazovanj...
- **razvoju modeliranja geodinamičnih procesov** na Zemlji, ki:
 - vplivajo na položaj točke (tektonika, plimovanje trdne Zemlje, oceanov, atmosfere, post-glacialno dviganje površja, model geoida in elipsoida, potresi, vulkani..),
 - vplivajo na modeliranje opazovanj (vpliv atmosfere na geodetska opazovanja, relativistični vplivi, »obnašanje satelitov«, kalibracijski parametri merskih sistemov...).

Zgornja dva vidika razvoja sta med seboj neločljivo povezana in vplivata eden na drugega!

Naloge, ki jih brez **referenčnega sistema** ne moremo izvajati:

- izračun orbit satelitov vseh vrst,
- geodinamične naloge (ti. naloge geo-znanosti: tektonika, deformacija tektonskih plošč, spremljanje morske gladine, rotacijske osi Zemlje...),
- navigacija, državni/regionalni geodetski referenčni sistemi, kartiranje, določevanje koordinat novih točk...

Terestrični referenčni sistem predstavlja enega izmed **najbolj pomembnih konceptov geodezije in geodinamike**. Temelji na ti. idealnem referenčnem sistemu označenem kot **dogovorjeni terestrični referenčni sistem** (CTRS, angl. *Conventional Terrestrial Reference System*) (glej

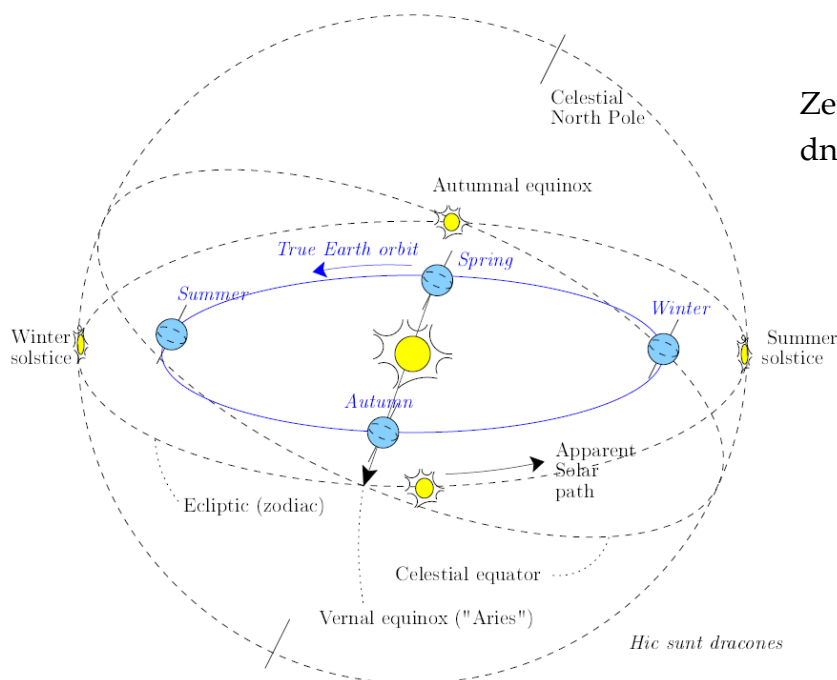
2. Gibanje Zemlje

Glede na vesolje, ima Zemlja sledeča gibanja:

- Revolucija Zemlje okoli Sonca,
- Gibanje rotacijske osi Zemlje (orientacija rotacijske osi) in
- Rotacija Zemlje okoli svoje osi.

Ima tudi naravni satelit (Luno) in številne umetne satelite – dodatno periodično gibanje – **orbitalno gibanje satelitov**. Vsa ta gibanja vplivajo na položaj, orientacijo, velikost in obliko Zemlje in zato pomembno vplivajo na izbiro in definiranje referenčnih sistemov.

2.1. Revolucija okoli Sonca



Zemlja potrebuje 365,242374 dni da obkroži Sonce.

Slika 1: Gibanje Zemlje okoli Sonca (vir: Vermeer, M. 2019. *Geodesy The science underneath*. Aalto University. <https://users.aalto.fi/~mvermeer/geodesy.pdf>)

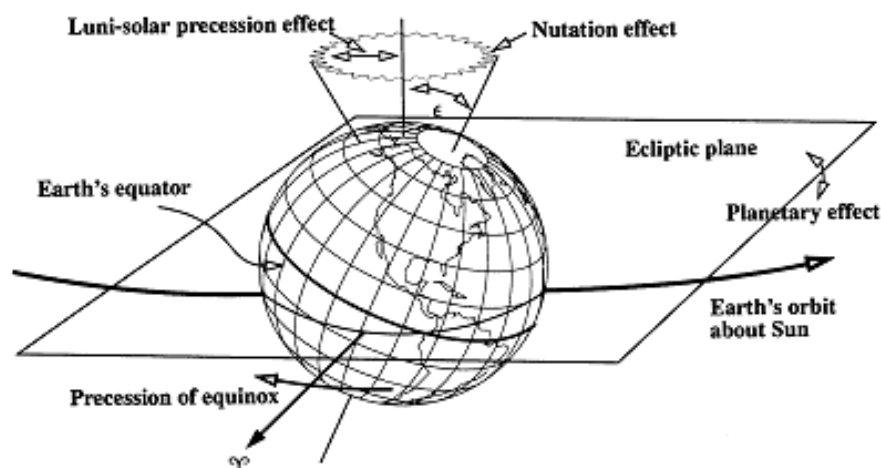
2.2. Gibanje rotacijske osi Zemlje

Orientacija rotacijske osi Zemlje se spreminja s časom. Relativno glede na inercialni sistem (vesolje), sta dve glavni gibanji **precesija** in **nutacija**. Vzrok je v težnosti Sonca, Lune in ostalih planetov in v sploščenosti Zemlje (zaradi »izbokline« okoli ekvatorja).

Precesijo (*lunisolarna* precesija) povzroča privlačnost Sonca, Lune (in drugih planetov – *splošna* precesija) in sploščena oblika Zemlje. Rotacijska os je zato glede na ekliptiko nagnjena za približno

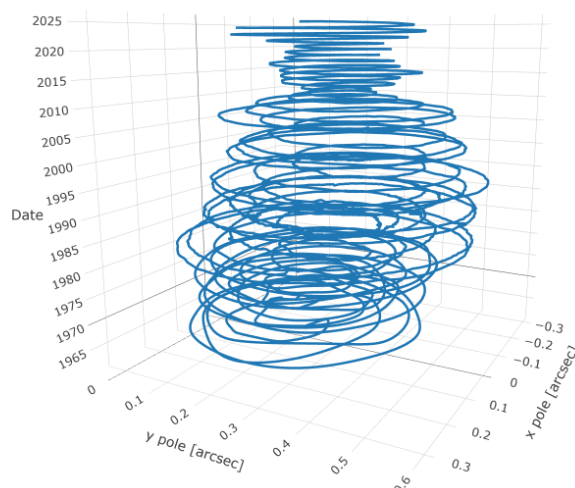
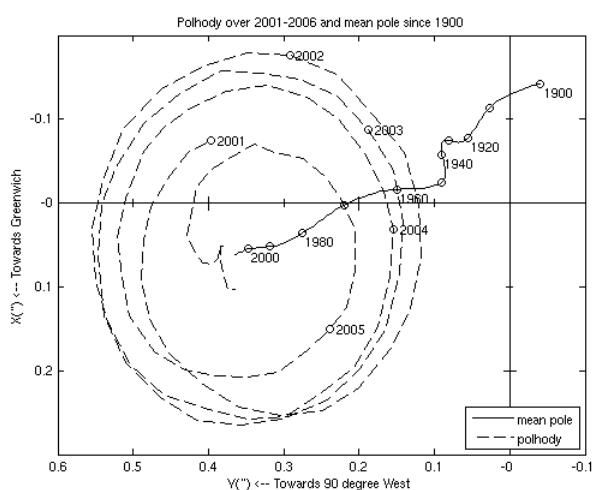
23,5° in oscilira z obhodnim časom okoli 25 800 let. V enem letu se rotacijska os premakne za približno 50,3", za kolikor se vsako leto spremeni tudi smer pomladišča (presečišče ekliptike in ekvatorja) glede na vesolje. Kako si lahko predstavljamo precesijo? Enako gibanje rotacijske osi opravi vrtavka na površini Zemlje (<https://www.youtube.com/watch?v=ty9QSiVC2g0>).

Nutacija ima vzroke predvsem v nagnjenosti orbite Lune okoli Zemlje glede na ekliptiko (okoli 5°), ima amplitudo okoli 9,2" in obhodni čas okoli 18,6 let.



Slika 2: Prikaz precesije in nutacije (vir: https://www.researchgate.net/figure/Precession-and-nutation-effects-for-the-Earth_fig2_233943154)

Poleg precesije in nutacije obstaja še **gibanje polov**, ki ga opišemo glede na telo Zemljo. Po obliki je skoraj krožno gibanje in ima amplitudo okoli 9 m (0,3"). Glavni del predstavljata *Chandlerjeva perioda* (433 dni – izhaja iz dejstva, da je Zemlja elastično, deformabilno telo) in *letna perioda* (365 dni, ki ima vzrok v atmosferi). Poleg teh dveh periodičnih gibanj rotacijska os počasi tudi leze, kar je posledica sprememb v porazdelitvi mas v notranjosti Zemlje (npr. post-glacialno dviganje površja Zemlje).



Slika 3: Prikaz gibanja polov (vir: <https://www.iers.org/IIERS/EN/Science/EarthRotation/PolarMotionPlot.html>, <https://datacenter.iers.org/plottool/publicv2/3d.php?reset=true>)

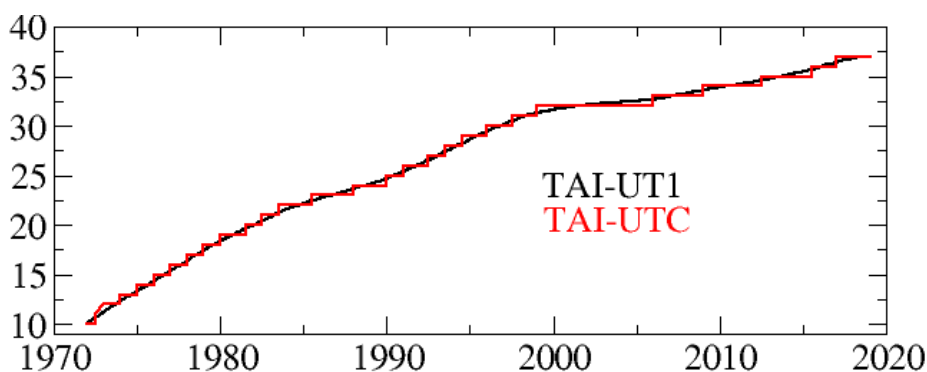
Rotacijska os je obremenjena tudi z **manjšimi motnjami orientacije rotacijske osi**, ki imajo periode od nekaj dni do nekaj let in imajo vzroke v spremembah porazdelitve atmosfere, oceanov, celinskih voda, tudi izbruhi vulkanov in potresi lahko vplivajo na orientacijo rotacijske osi Zemlje.

2. 3. Rotacija Zemlje okoli svoje osi

Zemlja se zasuka okoli lastne osi v enem **sončnem dnevu**, ki znaša 24h 00m. Sončni dan predstavlja čas med dvema zaporednima prehodoma Sonca pri izbranem meridianu. Sončni dan se zaradi eliptičnosti poti Zemlje okoli sonca preko leta spreminja.

Za razliko od sončnega dne, je **zvezdni dan** čas med dvema zaporednima prehodoma polmadišča pri izbranem meridianu in znaša 23h 56m.

Hitrost rotacije Zemlje ni stalna in se s časom spreminja. V splošnem se rotacija Zemlje upočasnjuje, tudi do nekaj ms na dan. Mera je odstopanje dolžine dneva od 86 400 s (angl. *Length of Day* – LOD).



Slika 4: Sprememba dolžine dneva (UT1) glede na atomski čas (TAI) in prikaz spremembe UTC časa (vir: <https://betime.be/en/legal-time/leap-second.php>)

3. Gibanje točk na površini Zemlje

Zemlja je kompleksen dinamični sistem, kjer številni geofizikalni (geodinamični) procesi povzročajo deformacije površja, ki se izražajo kot premiki točk. Položaj poljubne točke zato opredelimo kot:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_R(t_0) + \dot{\mathbf{X}}_R(t - t_0) + \sum \Delta \mathbf{X}_i(t) \quad (1)$$

V enačbi (1) so količine opredeljene kot:

- $\mathbf{X}(t)$ – položaj točke v poljubnem trenutku (t),
- t_0 – referenčna epoha (izbrana epoha),
- $\mathbf{X}_R(t_0)$ – referenčni položaj $\mathbf{X}_R(t_0)$ v referenčni epohi t_0 ,
- $\dot{\mathbf{X}}_R$ – konstanten vektor hitrosti (globalna geotektonika, (~10 cm/leto) in
- $\sum \Delta \mathbf{X}_i(t)$ – niz premikov točke v trenutku (t), ki so posledica geodinamičnega dogajanja. Premiki so posledica:
 - Plimovanje trdne Zemlje (~30 cm),
 - Plimovanje oceanov (do nekaj cm),
 - Plimovanje atmosfere (do nekaj cm),
 - Post-glacialno dviganje površja (~cm/leto),
 - Gibanje polov (nekaj mm)
 - Potresi, vulkansko delovanje,
 - Lokalni vplivi, podzemne vode...

4. Vrste referenčnih sistemov

Referenčni sistem **opredelimo** tako, da določimo:

- Položaj izhodišča,
- Orientacijo vseh treh koordinatnih osi,
- Merilo in
- Vrsto koordinatnega sistema – kako bodo predstavljene koordinate točk (kartezični, elipsoidni, krogelni, projekcijski).

Terestrični referenčni sistemi (angl. *Terrestrial Reference Systems* – TRS) so pripeti na Zemljo in z njo rotirajo in potujejo okoli Sonca. Lahko so:

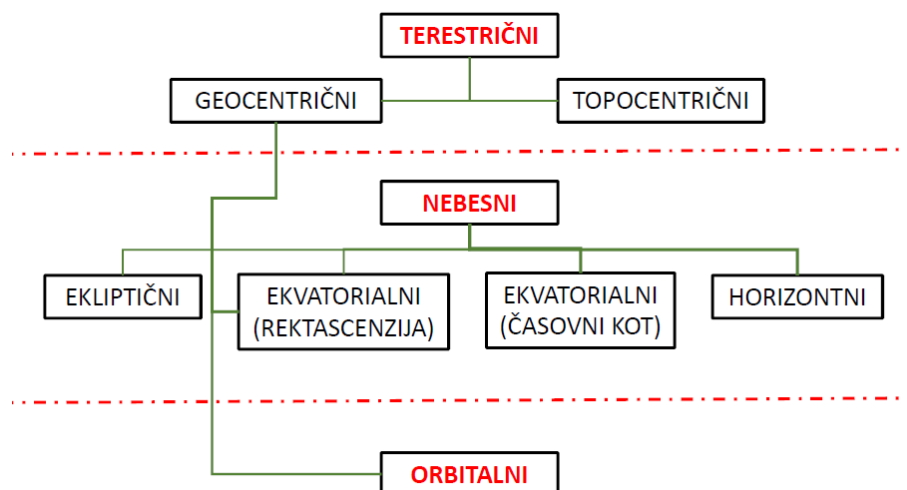
- geocentrični (izhodišče je v ali blizu središča Zemlje) ali
- topocentrični (izhodišče je na ali v bližini površine Zemlje).

S terestričnimi referenčnimi sistemi opisujemo gibanje točk glede na Zemljo in modeliramo geodetska opazovanja.

Nebesni referenčni sistemi (angl. *Celestial Reference Systems* – CRS) ne potujejo okoli Sonca, lahko pa rotirajo skupaj z Zemljo. Z nebesnimi sistemi opisujemo položaje nebesnih teles (in satelitov).

Zaradi enormne velikosti vesolja, izhodišče sistema nima vpliva na določanje položaja nebesnih teles. Izhodišče pa mora biti izbrano tako, da je le-ta ti. **inercialni sistem** (ni podvržen zunanjim silam - pospeškom). V grobem poznamo štiri vrste nebesnih sistemov:

- ekliptični sistem – **ne** rotira z Zemljo (najboljši približek inercialnega sistema),
- ekvatorialni sistem (rektascenzija) – ne rotira z Zemljo,
- ekvatorialni sistem (časovni kot) – rotira z Zemljo in
- horizontni nebesni sistem – rotira z Zemljo.



Slika 5: Vrste referenčnih sistemov

Pri vzpostavitvi referenčnega sistema moramo opredeliti **referenčne točke, pole, ploskve in osi**:

- za definiranje izhodišča – referenčne točke:
 - težišče Zemlje, baricenter Zemlja-Luna, baricenter Zemlja-Luna-Sonce, točka na površini Zemlje

- referenčni poli, ploskve in osi:
 - primarni pol = primarna (z) os – os simetrije sistema: npr. rotacijska os Zemlje, smer zenita,
 - primarna ploskev – pravokotna na primarni pol: npr. ekvatorska ploskev, ekliptična ploskev, horizontalna ploskev
 - sekundarna ploskev – pravokotna na primarno ploskev in vsebuje primarni pol: npr. začetni meridian, lahko izbrana preko dogovora (Greenwich meridian), ali ne (smer pomladišča),
 - sekundarni pol = sekundarna (x) os – presečišče primarne in sekundarne ploskve in
 - terciarna (y) os je pravokotna na primarno in sekundarno os (levo ali desno sučen sistem)

Geodetska opazovanja, ki se bodo izvajala v okviru referenčnih sistemov:

- geometrična geodezija: terestrična opazovanja (smeri, dolžine, zenitne razdalje) in satelitska opazovanja (GNSS, VLBI, SLR, LLR, DORIS) – vezano na referenčni elipsoid (neobčutljiva na težnostno polje Zemlje),
- fizikalna geodezija: višinske razlike in gravimetrična opazovanja, astronomska opazovanja – vezana na geoid (težnostno polje Zemlje).

5. Definiranje, vzpostavitev in vzdrževanje referenčnih sistemov

Obravnava referenčnih sistemov (definicija, vzpostavitev in vzdrževanje) pomeni opredelitev pojmov:

- **Referenčni sistem**: predstavlja niz definicij, konstant, dogovorov, modelov in parametrov, s katerimi lahko opredelimo geometrične in fizikalne količine na Zemlji.
- **Referenčni sestav**: predstavlja realizacijo oz. materializacijo referenčnega sistema, to je niz fizično stabiliziranih geodetskih točk na površju Zemlje, ki imajo koordinate (in vektorje hitrosti) določene v referenčnem sistemu. V okviru sestava se opredeli tudi modele geofizikalnih procesov in opazovanja, s katerimi povezujemo geodetske točke med seboj.
- **Geodetski datum**: predstavlja niz parametrov, dogovorov, ki nedvoumno (enolično) povežejo referenčni sistem z referenčnim sestavom (kot primer koordinate izhodišča koordinatnega sistema, usmerjenost osi in merilo).

Ključno:

- Referenčni sistem mora biti povsem neodvisen od referenčnega sestava in geodetskega datuma.
- Geodetski datum mora biti izveden neodvisno od opazovanj, ki bodo izvedene v referenčnem sestavu.
- Vzpostavitev referenčnega sestava mora biti neodvisna od geodetskega datuma in slediti principom/navodilom referenčnega sistema.

Tu definirajmo tudi **koordinatni sistem**, s čimer bomo opisali le način podajanja koordinat točk (pravokotni kartezični (x, y, z), geodetski (φ, λ, h), krogelni (φ, λ, h), ravninski ($e, n, H = h - N$) ...).

Tak način opredelitve referenčnih sistemov velja tako za nebesne kot tudi za terestrične referenčne sisteme.

TRS in CRS sta **povezana** preko *precesije, nutacije, parametrov gibanja pola in rotacije Zemlje*. V CRS predstavimo orientacijo rotacijske osi Zemlje, hitrost rotacije Zemlje in njuni spremembi v času. Na rotacijsko os se nato naslanja TRS.

Mednarodna služba, ki skrbi za podajanje podatkov/produktov rotacije Zemlje in za definicijo, vzpostavitev ter vzdrževanje TRS in CRS je **IERS** (angl. *International Earth Rotation Service*), ki zagotavlja (<https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/About/Objectives/objectives.html>):

- Definicijo ICRS (angl. *International Celestial Reference System*) in realizacijo ICRF (angl. *International Celestial Reference Frame*),
- Definicijo ITRS (angl. *International Terrestrial Reference System*) in realizacijo ITRF (angl. *International Terrestrial Reference Frame*),
- Parametre rotacije Zemlje, s katerimi povežemo ICRF in ITRF,
- Geofizikalne podatke/modele, s katerimi pojasnimo/interpretiramo prostorske in časovne spremembe v ICRF, ITRF in parametre rotacije Zemlje,
- Standarde, konstante in modele za splošno uporabo ICRF, ITRF in parametrov rotacije Zemlje.

5. 1. Terestrični referenčni sistem - TRS

S terestričnim referenčnim sistemom podamo parametre, s katerimi bomo enolično lahko opredelili položaj poljubne točke na Zemlji in njegove spremembe v času – opredelimo CTRS.

CTRS predstavlja 3-razsežni pravokotni kartezični koordinatni sistem, ki ima podano **izhodišče, orientacije** vseh treh osi in **merilo**.

V okviru Zemlje, geodinamičnih nalog ali (satelitske) geodezije velja:

- Izhodišče predstavlja masno središče Zemlje, ki vključuje celotno Zemljo, vso vodo (oceani) in atmosfero.
- Merilo določa SI enota za meter.
- Orientacijo določa ekvatorska ravnina (oziroma rotacijska os Zemlje).
- Koordinatni sistem je na Zemljo pričvrščen in rotira skupaj z Zemljo.

5. 1. 1. Transformacija v okviru TRS – 7-parametrična transformacija

Pod temi pogoji, se **transformacijo med dvema terestričnima referenčnima sistemoma** opredeli kot:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{T} + m\mathbf{R}\mathbf{X}_1 \quad (2)$$

Kjer so v enačbi (2) količine opredeljene kot:

- $\mathbf{X}_1$ – koordinate točke v prvem TRS,
- $\mathbf{X}_2$ – koordinate točke v drugem, transformiranem, TRS,
- $\mathbf{T}$, m in $\mathbf{R}$ – 7 parametrov transformacije, trije parametri premika, merilo in rotacijska matrika, ki vsebuje tri parametre zasuka.

Pri TRS se pričakuje, da bodo **različne realizacije TRS med seboj zelo podobne**, zato se enačba (2) poenostavi v:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1 + \mathbf{T} + \Delta m\mathbf{X}_1 + \bar{\mathbf{R}}\mathbf{X}_1 \quad (3)$$

Če pričakujemo majhne zasuke, majhne premike in majhno spremembo merila, so v enačbi (3) parametri enaki:

- modeliranje premikov: $\mathbf{T} = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T$, velikostnega reda manj kot 100 m,
- modeliranje spremembe merila: $m = 1 + \Delta m$, kjer je $\Delta m < 10^{-5}$ in
- modeliranje zasukov: $\bar{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$ in so ω_x , ω_y in $\omega_z (< 10^{-5})$ parametri zasukov.

Položaj točke je obremenjen s številnimi vplivi (glej poglavje 3.), ki jih lahko opredelimo v 3 kategorije:

1. **kategorija:** vplivi, ki jih lahko analitično modeliramo na nivoju 1 mm ali bolje. To so ti. »a-priori« modeli in jih apliciramo na nivoju obdelave geodetskih opazovanj. Primer takih modelov so: plimovanje trdne Zemlje, oceanov, atmosfere, gibanje polov. Ti modeli so izpeljani na osnovi geofizikalnih modelov (ne geodetskih opazovanj) in so določeni z mm točnostjo ali bolje.
2. **kategorija:** ti. dogovorjeni modeli, za katerimi ni nobene fizikalne osnove, a jih je potrebno določiti. Primer je orientacija osi sestava in njene spremembe v času (izbira smeri začetnega meridiana), ali časovna referenca stanja ur satelitov pri GNSS.
3. **kategorija:** so ti. »uporabni« modeli in so namenjeni za geodinamične procese in druge vplive, za katere matematičnega modela še ne poznamo (jih ne moremo uvrstiti v 1. kategorijo). So namenjeni znanstvenemu namenu (npr. po-potresna relaksacija, post-glacialno dviganje površja, navidezni premiki točk zaradi zamenjave geodetske opreme (GNSS)).

5. 2. Terestrični geodetski datum

V primeru **tradicionalnega 2-razsežnega geodetskega referenčnega sistema** moramo določiti 4 parametre (dva premika, zasuk in merilo), in sicer:

- premika zagotovimo tako, da fundamentalni geodetski točki z astronomskimi koordinatami določimo koordinate na površini Zemlje (Φ , Λ in φ , λ – povezava z ξ , η),
- zasuk zagotovimo tako, da med dvema geodetskima točkama izmerimo astronomski azimut (A) in
- merilo določimo s prototipom metra.

Tako določen geodetski datum se skozi čas ne spreminja. S terestričnimi opazovanji sedaj lahko določimo koordinate vseh geodetskih točk v tem geodetskem referenčnem sistemu in vzpostavimo geodetski referenčni sestav (primer astro-geodetski datum Slovenije).

V primeru **modernih TRS**, ki so **3-raszežni**, geodetski datum predstavlja niz sedmih (in samo sedmih) parametrov (tri premiki, tri zasuk in merilo), s katerimi bomo terestrični referenčni sistemi »pripeli« na Zemljo. S tem geodetski datum zagotovimo z minimalnim številom parametrov in z njimi ne vplivamo na kakovost referenčnega sistema. To lahko naredimo z **neodvisnimi opazovanji** (glede na opazovanja, ki jih uporabljamo v okviru TRF), ali z **dogovorjenimi parametri**.

5. 2. 1. Določitev izhodišča – masno središče Zemlje

Masno središče opredelimo preko gravimetričnih parametrov, ki jih uporabimo pri izračunu orbit satelitov – le-ti krožijo okoli masnega središča Zemlje. Merska tehnika, ki je »občutljiva« na masno

središče Zemlje je SLR (angl. *Satellite Laser Ranging*). Ob podanih koordinatah satelitov se preko SLR lahko določijo koordinate geodetskih točk na Zemlji v geocentričnem referenčnem sistemu.

5. 2. 2. Določitev orientacije koordinatnih osi

Teoretično bi lahko izhajali iz glavnih smeri vztrajnostnega momenta Zemlje, a je natančnost določitve orientacije teh osi preslaba. Zato je **orientacija** določena tako, da *se os z postavi v položaj rotacijske osi Zemlje v letu 1984 (dogovor)*. Leto izhaja iz predhodnih globalnih referenčnih sistemov, ki so bili določeni v »pred-satelitski« dobi. Sprememba orientacije je določena kot ti. angl. »no-net-rotation« (NNR) pogoj za vektorje hitrosti točk v referenčnem sestavu.

5. 2. 3. Določitev merila

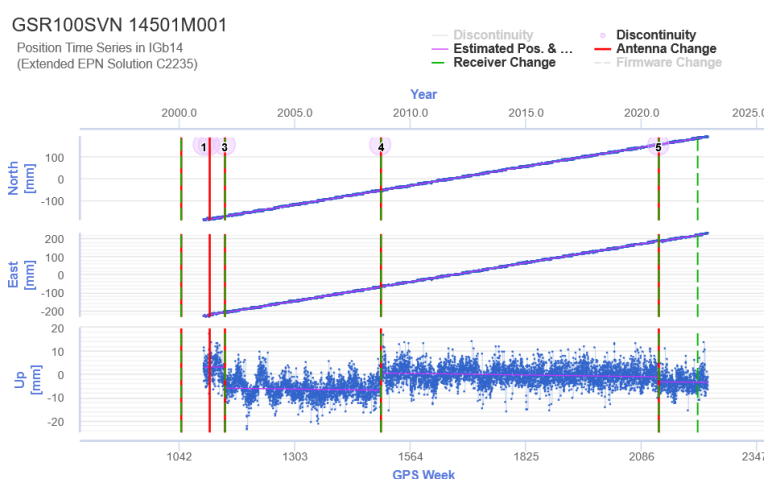
Merilo definira **niz konstant**, in sicer:

- hitrost svetlobe c : posledica satelitskih geodetskih opazovanj, ki temeljijo na EMV (GNSS, SLR, VLBI, DORIS),
- produkt gravitacijske konstante in mase Zemlje GM : posledica težnostne enačbe pri določevanju položajev satelitov in
- relativistični popravki: posledica relativnostne teorije pri satelitski geodeziji (vpliv težnostnega polja, hitrosti svetlobe, gibanja satelitov...).

Cilj je definirati meter ki je opredeljen v SI, s tem da se opredeli čas pri težnostnih enačbah z upoštevanjem relativnostnih vplivov.

5. 3. Terestrični referenčni sestav - TRF

TRF **predstavlja** niz fizično stabiliziranih geodetskih točk (postaj, observatorijev), ki imajo določene koordinate v izbranem TRS. TRF **vzpostavimo** tako, da izhajamo iz geodetskih merskih tehnik, s katerimi določimo položaj geodetskih točk na Zemlji v različnih epohah – dobimo časovne vrste koordinat.



Slika 6: Časovne vrste koordinat stalno delujoče postaje GSR1 v globalnem TRF

(<http://www.epncb.oma.be/products/services/timeseries/index.php?station=GSR100SVN&type=ITRS>)

Položaj točke v poljubnem trenutku (t) določim na osnovi satelitskih opazovanj, kjer:

- Geodinamične modele/vplive kategorije 1 odstranimo iz opazovanj in
- Kot neznanke ocenimo koordinate točke v epohi izvedenih opazovanj (na dnevni osnovi).

Na osnovi ponovljenih opazovanj (iz časovnih vrst) ocenimo:

- referenčni položaj $\mathbf{X}_R(t_0)$ v referenčni epohi t_0 in
- pripadajoči linearni vektor hitrosti $\dot{\mathbf{X}}_R$.

Vzdrževanje TRF pomeni, da skozi daljše časovno obdobje določamo koordinate geodetskih točk v TRF in pridobivamo vedno »daljše« časovne vrste. TRF posodabljam z rezultati – časovnimi vrstami, ki še niso bile vključene v zadnjo realizacijo. V praksi to pomeni, da imamo več različnih realizacij TRS.

5.3.1. Transformacije v okviru TRF – 14-parametrična transformacija

Položaj točke v okviru TRF je za poljuben trenutek t opredeljen kot:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_R(t_0) + \dot{\mathbf{X}}_R(t - t_0) + \epsilon \quad (4)$$

Kjer je $\mathbf{X}_R(t_0)$ referenčni položaj v referenčni epohi t_0 in $\dot{\mathbf{X}}_R$ pripadajoči konstanten vektor hitrosti (ϵ predstavlja slučajne pogreške). Geodetska opazovanja v okviru obdelave »reduciramo« za pogreške 1. kategorije modelov. Ker globalne geo-tekonike (v detajle) ne moremo dovolj točno modelirati, to je z mm točnostjo, so položaji točk v TRF obremenjeni s konstantnim vektorjem hitrosti – točka se skozi čas giblje linearno.

Z enačbo (3) smo v poglavju 5.1. (stran 7) prikazali, kako izvedemo transformacijo med dvema TRS. Ker imamo v okviru TRF časovno odvisne položaje točk (vektor hitrosti v enačbi (5)), moramo določiti tudi model transformacije vektorjev hitrosti. Transformacija je v TRF, ki temelji na enačbi (6), določena s **14-parametri**, in sicer:

- s **7 parametri transformacije koordinat točk** – trije parametri premika $\mathbf{T}$, parameter spremembe merila $m = 1 + \Delta m$ in tremi parametri zasukov $\bar{\mathbf{R}}$ (glej poglavje 5.1. na strani 7), in
- s **7 parametri transformacije vektorjev hitrosti točk**:
 - parametri spremembe premikov v času: $\dot{\mathbf{T}} = [\dot{t}_x \quad \dot{t}_y \quad \dot{t}_z]^T$,
 - modeliranje spremembe merila v času: $\dot{m} = 1 + \Delta \dot{m}$ in
 - modeliranje spremembe zasukov v času: $\dot{\bar{\mathbf{R}}} = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{bmatrix}$ ($\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y$ in $\dot{\omega}_z$ parametri spremembe zasukov v času).

Transformacijski parametri koordinat so podani za **izbran referenčni trenutek** (npr. t_t), medtem ko so transformacijski parametri vektorjev hitrosti konstantni v času. V poljubnem trenutku so transformacijski parametri koordinat enaki:

$$\alpha(t) = \alpha(t_t) + \dot{\alpha}(t - t_t) \quad (7)$$

Kjer v enačbi (7) α predstavlja kateregakoli izmed transformacijskih parametrov koordinat.

Transformacija položaja in vektorja hitrosti med dvema TRF je v **trenutku t_t** dana z:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2 &= \mathbf{X}_1 + \mathbf{T} + \Delta m \mathbf{X}_1 + \bar{\mathbf{R}} \mathbf{X}_1 \\ \dot{\mathbf{X}}_2 &= \dot{\mathbf{X}}_1 + \dot{\mathbf{T}} + \Delta \dot{m} \mathbf{X}_1 + \dot{\bar{\mathbf{R}}} \mathbf{X}_1 \end{aligned} \quad (8)$$

Drugi del enačbe (8) dobimo tako, da prvi del odvajamo po času. Ker pričakujemo majhne vrednosti transformacijskih parametrov, zanemarimo produkte parametrov in vektorjev hitrosti.

Enačba (8) prikazuje transformacijo položaja in vektorja hitrosti za referenčno epoho podanih 14 transformacijskih parametrov t_t . Za poljuben trenutek t , sta transformiran položaj točke in vektor hitrosti podana z:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_2(t) &= \mathbf{X}_{R,1} + \dot{\mathbf{X}}_{R,1}(t - t_0) + \mathbf{T} + \Delta m \mathbf{X}_{R,1} + \bar{\mathbf{R}} \mathbf{X}_{R,1} + (t - t_t) \left(\dot{\mathbf{T}} + \Delta \dot{m} \mathbf{X}_{R,1} + \dot{\bar{\mathbf{R}}} \mathbf{X}_{R,1} \right) \\ \dot{\mathbf{X}}_2 &= \dot{\mathbf{X}}_1 + \dot{\mathbf{T}} + \Delta \dot{m} \mathbf{X}_{R,1} + \dot{\bar{\mathbf{R}}} \mathbf{X}_{R,1}\end{aligned}\quad (9)$$

Enačba (9) predstavlja osnovo za izravnavo 14-parametrične transformacije. Vzdrževanje TRF se izvaja tako, da se predhodne realizacije TRF in zadnji niz časovnih vrst koordinat točk preko 14-parametrične transformacije združi v končno realizacijo TRF. Rezultat je nova, najsodobnejša in najkakovostnejša realizacija TRF.

6. International Terrestrial Reference Frame - ITRF

Terestrični referenčni sistem **ITRF** predstavlja **najbolj kakovostno realizacijo** globalnega, na Zemljo pričvrščenega, terestričnega sistema, zaradi česar je postal osnova številnim ostalim terestričnim referenčnim sistemom (regionalnim, lokalnim), kot tudi številnim geodinamičnim procesom/modelom. Kakovost zagotavlja zelo dolg niz satelitskih opazovanj različnih merskih tehnik, ki se med seboj razlikujejo in zato dopolnjujejo.

Za definicijo, realizacijo in vzpostavitev je zadolžena služba IERS, ki podaja tudi vse potrebne podatke/rezultate/modele za dostop do ITRF. **Definiran** je preko ITRS, kjer je določeno:

- Sistem je geocentričen, kjer se masno središče določi na osnovi celotne Zemlje, vključno z vsemi oceani (morji, celinskimi vodami) in celotno atmosfero,
- Enota za dolžino je meter (SI),
- Orientacija je določena z orientacijo rotacijske osi Zemlje, ki jo je podala služba BIH za trenutek 1984.0 in
- Časovne spremembe orientacije so zagotovljene s pogojem NNR horizontalnih premikov tektonskih plošč na celotni Zemlji.

Realizacija ITRS je podana preko ITRF, rezultati so objavljeni na spletni strani ITRF: <https://itrf.ign.fr/>. ITRF se s časom posodablja, vsaka nova realizacija je označena z ITRFyy[yy], zadnja aktualna realizacija je ITRF2020, s posodobitvijo ITRF2020-u2023. Prejšnje realizacije so ITRF88, -89, -90, -91, -92, -93, -94, -96, -97, -2000, -2005, -2008, 2014. Zaradi manjšega obsega opazovanj in slabše kakovosti samih realizacij so bile realizacije v začetku objavljene na vsako leto. Z daljšanjem časovnih vrst koordinat referenčnih točk, z večanjem kakovosti geodetskih opazovanj in večanjem kakovosti geodinamičnih modelov pa je kakovost ITRF narasla. Količina podatkov je velika, kar pomeni veliko daljši čas obdelave in se zato ITRF posodablja redkeje.

Prehodi med različnimi realizacijami ITRF so podani preko 14-parametrične transformacije, parametri pa so podani na sliki 7.

Transformation parameters from ITRF2020 to past ITRFs.

SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS----->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2014	-1.4	-0.9	1.4	-0.42	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.0	-0.1	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	
ITRF2008	0.2	1.0	3.3	-0.29	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.0	-0.1	0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.7	0.1	-1.4	0.65	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.3	-0.1	0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	-0.2	0.8	-34.2	2.25	0.00	0.00	0.00	2015.0
rates	0.1	0.0	-1.7	0.11	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	6.5	-3.9	-77.9	3.98	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	6.5	-3.9	-77.9	3.98	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	6.5	-3.9	-77.9	3.98	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	-65.8	1.9	-71.3	4.47	-3.36	-4.33	0.75	2015.0
rates	-2.8	-0.2	-2.3	0.12	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	14.5	-1.9	-85.9	3.27	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	26.5	12.1	-91.9	4.67	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	24.5	8.1	-107.9	4.97	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	29.5	32.1	-145.9	8.37	0.00	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	24.5	-3.9	-169.9	11.47	0.10	0.00	0.36	2015.0
rates	0.1	-0.6	-3.1	0.12	0.00	0.00	0.02	

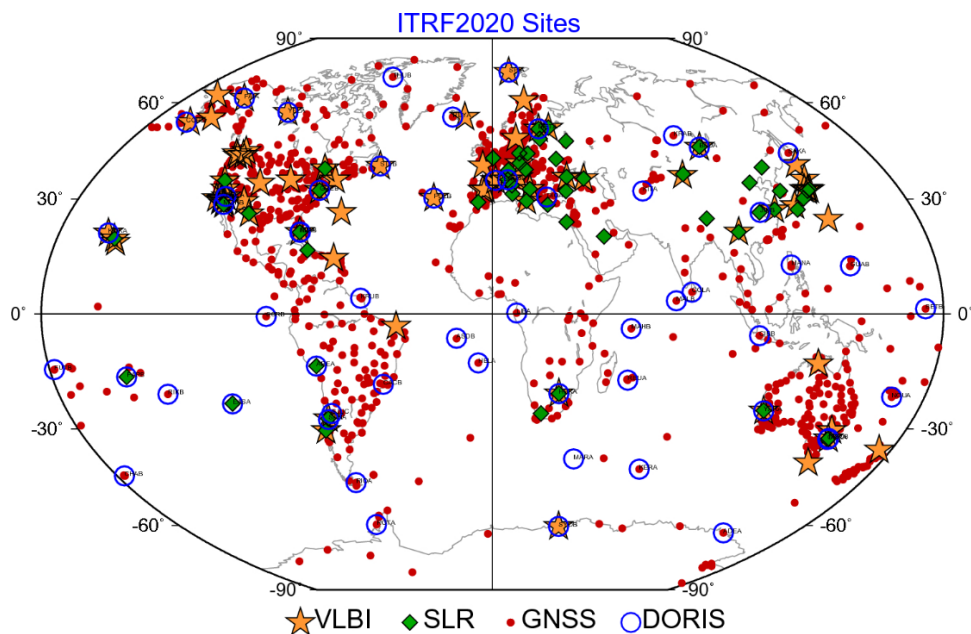
Note : These parameters are derived from those already published in the IERS Technical Notes and Annual Reports, and from the transformation parameters between ITRF2020, ITRF2014 and ITRF2008. They supersede all values published in the past IERS/ITRF documentations. The transformation parameters should be used with the standard model (1) given below and are valid at the indicated epoch.

Slika 7: Parametri 14-parametrične transformacije med različnimi realizacijami ITRF (vir: [https://itrf.ign.fr/doc ITRF/Transfo-ITRF2014 ITRFs.txt](https://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt))

Merske tehnike, ki so uporabljene za realizacijo ITRF so:

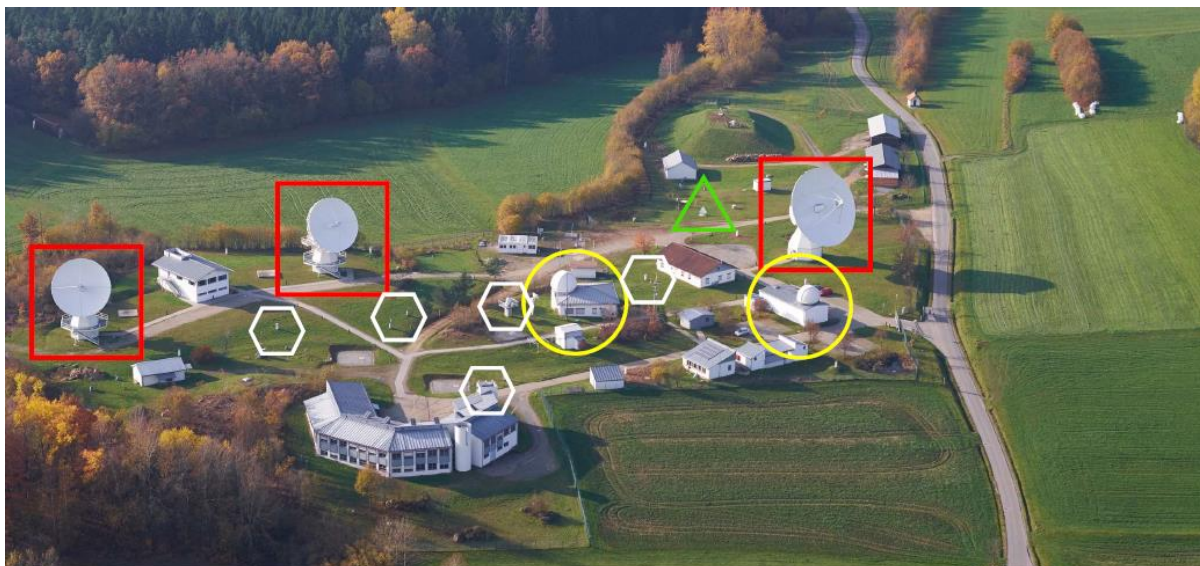
- VLBI (angl. *Very Long Baseline Interferometry*) pod okriljem IVS (angl. *International VLBI Service*),
- SLR (angl. *Satellite Laser Ranging*) in LLR (angl. *Lunar Laser Ranging*) pod okriljem ILRS (angl. *International Laser Ranging Service*),
- GNSS (angl. *Global Navigation Satellite Systems*) pod okriljem IGS (angl. *International GNSS Service*) in
- DORIS (angl. *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) pod okriljem IDS (angl. *International DORIS Service*).

Rezultate vseh merskih tehnik zagotavljajo neprofitne organizacije v okviru IAG (angl. *International Association of Geodesy*). Opazovanja različnih satelitskih merskih tehnik zagotavljajo številne postaje in observatoriji (geodetske točke) po svetu.



Slika 8: Geodetska mreža ITRF različnih merskih tehnik – 1835 postaj na 1243 lokacijah (Altamimi in sod., 2023, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>)

Slika 8 prikazuje lokacije geodetskih točk v okviru mreže ITRF in merske tehnike po posameznih točkah. Zaradi same narave izvajanja različnih merskih tehnik je število točk različno. Največ je GNSS in DORIS točk, saj je ti dve tehniki najlažje uporabiti. VLBI in SLR/LLR točke so vezane na geodetske/astronomske observatorije in jih je zaradi tega bistveno manj.



Slika 9: Geodetski observatorij Wettzel, Nemčija, in prikaz različnih merskih tehnik (vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Geodetic_Observatory_Wettzell#/media/File:Geod%C3%A4tisches_Observatorium_Wettzell_2014.jpg)

Observatoriji z različnimi tehnikami, kot npr. Wettzel, Nemčija (slika 9), so ključnega pomena, a je potrebno geodetske točke različnih merskih tehnik povezati med seboj. To lahko naredimo s terestričnimi ali GNSS opazovanji. Take točke označimo kot »vezne« točke ITRF (angl. *tie points*) in imajo ključno vlogo pri združevanju referenčnih sistemov posameznih merskih tehnik v končnega.

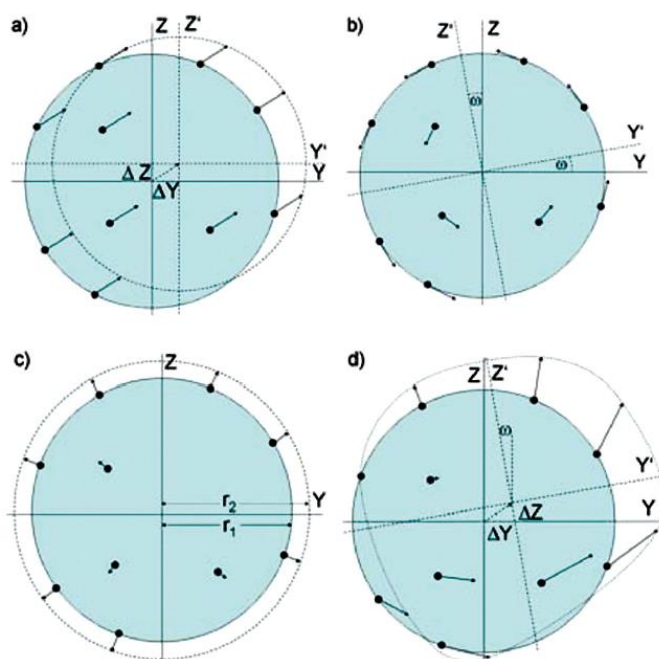
Različne merske tehnike se uporabljajo iz dveh razlogov. Prvi je seveda večje število zelo kakovostnih opazovanj. Drugi pa izhaja iz lastnosti posameznih tehnik, ki so (lahko) občutljiva na različne datumske parametre, saj:

- Izhodišče zagotavljata merski tehniki SLR, saj sateliti krožijo okoli težišča Zemlje, merijo pa se razdalje do satelitov,
- Merilo zagotavljata merski tehniki VLBI in SLR,
- Orientacija je bila v prvih realizacijah zagotovljena s predhodnimi realizacijami sistemov BIH, kasneje pa z NNR pogojem vektorjev hitrosti do predhodne realizacije. Primer, pri ITRF2014 je orientacija določena na osnovi vektorjev hitrosti 127 referenčnih točk, tako da ni spremembe orientacije med ITRF2008 in ITRF2014. Tu se vidi, da orientacijo določamo na osnovi opazovanj, ki se izvajajo v okviru referenčnega sestava (glej poglavje 5.).

Za realizacijo ITRF2020 so pri vseh datumskih parametrih izhajali iz ITRF2014:

- **Izhodišče:** ni premika in spremembe premika glede na SLR in VLBI rezultate v obdobju 1993 – 2021,
- **Merilo:** ni razlike v merilu in časovnih spremembah merila glede na SLR in VLBI rezultate v obdobju 1993 – 2021,
- **Orientacija:** ni razlike v orientaciji in časovnih spremembah orientacije v trenutku 2015 med ITRF2020 in ITRF2014. Pogoje zagotavlja 131 postaj na 105-ih lokacijah.

Zagotovitev geodetskega datuma orientacije iz vektorjev hitrosti geodetskih točk, ki so določene na osnovi merskih tehnik znotraj ITRF je lahko problematično, saj s prostorsko transformacijo vplivamo na samo realizacijo TRF in s tem kršimo definicije iz TRS, kar prikazuje slika 10.

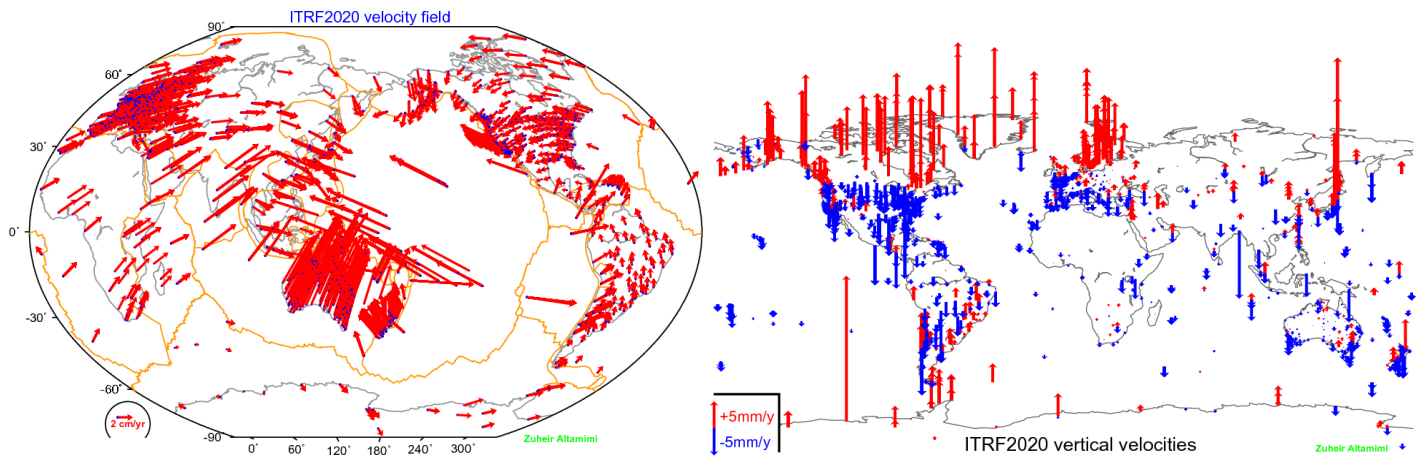


Slika 10: Vpliv premikov referenčnih točk se lahko preko transformacije prenese na datumske parametre (Drewes, 2009)

Dostop do ITRF je podan preko:

- Položajev in vektorjev hitrosti geodetskih postaj, ki so določene v ITRF,
- Uporabo preciznih efemerid satelitov GNSS, ki jih zagotavlja služba IGS in so podane v ITRF in
- Uporabo modelov/konstant/definicij, ki jih zagotavlja IERS za ustrezno obdelavo opazovanj (npr. opazovanj GNSS).

Kakšna je **kakovost aktualnega ITRF**? Natančnost izhodišča sestava je na nivoju 0,1 mm/leto, medtem ko je kakovost merila na nivoju 0,01 ppb/leto ($\sim 0,06$ mm/leto).



Slika 11: Horizontalni in vertikalna komponenta vektorjev hitrosti točk v ITRF2014 (Altamimi in sod., 2023)

ITRF ni edini globalni referenčni sestav. Poznamo tudi WGS84 (GPS), PZ90 (GLONASS), GTRF (GALILEO), CGCS 2000 (BDS), JGS (QZSS). Vsi so teoretično usklajeni z ITRF, praktično pa na nivoju do 10 cm (WGS84), celo mm (GTRF).

7. European Terrestrial Reference Frame 1989 – ETRF89

Koordinatni sestav ITRF je globalni in zato za potrebe lokalnih ali regionalnih območij ni uporaben. Predvsem je problem v velikih vektorjih hitrosti (npr. na območju Evrope 2,5 cm/leto v smeri SV) zaradi zagotovitve orientacije sestava. V letu 1987 se je na glavni skupščini IUGG v Vancouvru, Kanada, vzpostavila pod-komisija IAG za Referenčne sisteme imenovana EUREF (angl. *EUropean REference Frame* - <http://www.euref.eu/>).

Naloga EUREF je **definiranje, vzpostavitev in vzdrževanje evropskega geodetskega referenčnega sistema** (EGRS angl. *European Geodetic Reference System*), ki je sestavljen iz dveh komponent:

- ETRS (angl. *European Terrestrial Reference System*) – horizontalna komponenta in
- EVRS (angl. *European Vertical Reference System*) – višinska komponenta.

Poleg same realizacije EGRS je naloga EUREF tudi pomoč pri implementaciji EGRS po posameznih državah EU, pri razvoju metod in tehnologij v povezavi z referenčnimi sistemi in pri sodelovanju z različnimi službami, kot so INSPIRE, EuroGeographics in tudi z Geodetskimi upravami držav EU.

ETRS je bil **zasnovana** s sledečimi parametri:

- Definiran na podlagi ITRS,
- Identičen z ITRF ob trenutku 1989,0,
- Pričvrščena za stabilni del Evrope (tektonske plošče Evrazije) in
- Skladen z WGS84 na nivoju metra.

Realizacije ETRS, to so ETRF, se izvedejo ob vsaki realizaciji ITRF, zato je trenutno aktualna realizacija poimenovana ETRF2020 in temelji na ITRF2020 (<http://etrs89.ensg.ign.fr/>). Prejšnje realizacije so bile ETRF89, -90, -91, -92, -93, -94, -96, -97, -2000, -2005, -2008 in -2014. **Povezava med posamezno realizacijo ITRF in ETRF** je v osnovi podana s 14-parametrično transformacijo, kjer pa velja:

- Ker ETRF sovpada z ITRF za leto 1989,0, so vsi transformacijski parametri za koordinate enaki 0,
- Ker ETRF le rotira glede na ITRF, so transformacijski parametri za premike in merilo pri vektorjih hitrostih enaki 0, torej so
- Samo še trije transformacijski parametri rotacij vektorjev hitrosti različni od 0 (spremembe zasukov skozi čas).

Naknadno je bilo ugotovljeno, da so bile začetne realizacije ETRF določene s slabšo kakovostjo (glede na novejšo realizacije), zato se je v transformacijo uvedlo še 3 parametre premikov koordinat. Transformacija iz ITRF v ETRF je na koncu določena s 6-parametrično (časovno odvisno) prostorsko transformacijo in ima obliko:

$$\mathbf{X}_E(t) = \mathbf{X}_I(t) + \mathbf{T} + (t - 1989.0)\dot{\mathbf{R}}\mathbf{X}_I(t) \quad (10)$$

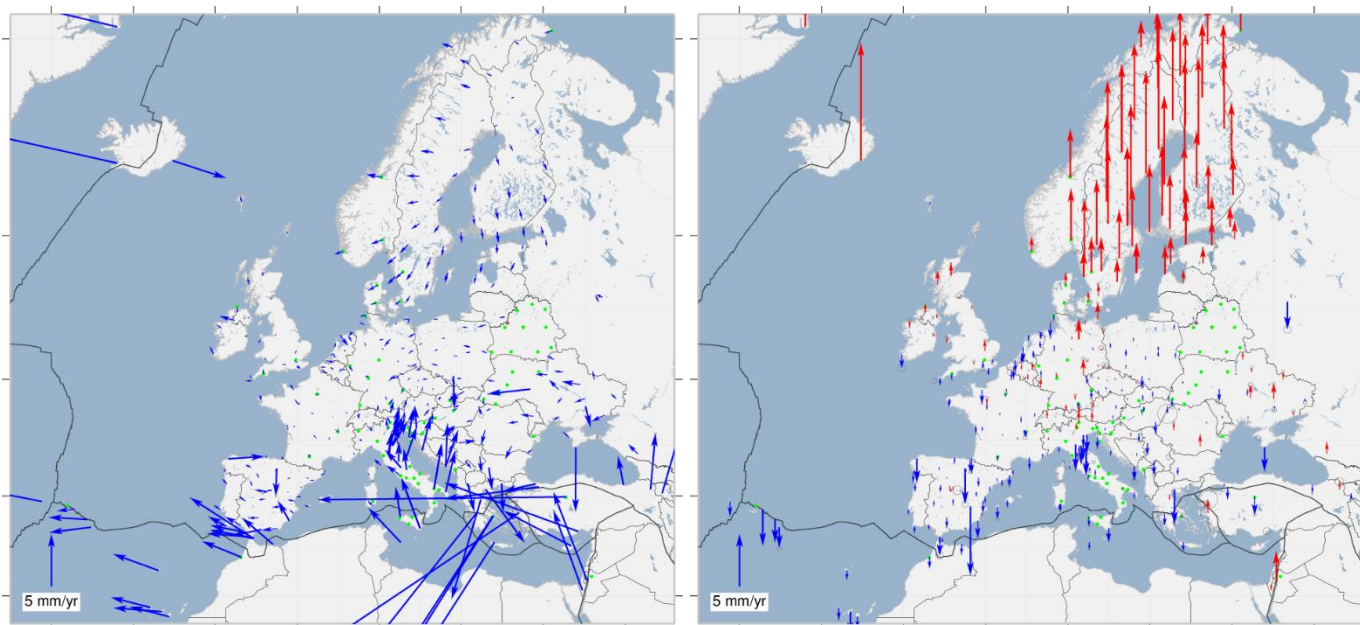
V enačbi (10) je z $\mathbf{X}_I(t)$ predstavljen položaj točke v ITRF za trenutek t , $\mathbf{T}$ vektor premika med ITRF in ETRF, $\dot{\mathbf{R}}$ rotacijska matrika vektorjev hitrosti in $\mathbf{X}_E(t)$ položaj točke v ETRF (trenutek t).

ETRF _{yy}	T1 mm	T2 mm	T3 mm	D 10 ⁻⁹	R1 mas	R2 mas	R3 mas
ETRF2020	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.086	0.519	-0.753
ETRF2014	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.085	0.531	-0.770
ETRF2005	56.0	48.0	-37.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.054	0.518	-0.781
ETRF2000	54.0	51.0	-48.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.081	0.490	-0.792
ETRF97	41.0	41.0	-49.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.200	0.500	-0.650
ETRF96	41.0	41.0	-49.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.200	0.500	-0.650
ETRF94	41.0	41.0	-49.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.200	0.500	-0.650
ETRF93	19.0	53.0	-21.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.320	0.780	-0.670
ETRF92	38.0	40.0	-37.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.210	0.520	-0.680
ETRF91	21.0	25.0	-37.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.210	0.520	-0.680
ETRF90	19.0	28.0	-23.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.110	0.570	-0.710
ETRF89	0.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000
rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.110	0.570	-0.710

Slika 12: Parametri 14-parametrične transformacije iz ITRF_{yy} v ETRF_{yy} (vir: <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1-Mar-04-2024.pdf>)

Razlike med ITRF in ETRF znašajo okoli $2,5 \text{ cm} \cdot (t - 1989)$ in se nanašajo le na horizontalni komponenti. Odražajo seveda potovanje stabilne Evrazije glede na celotno Zemljo.

Velikostni red premikov točk v ETRF je zaradi pričvrščenosti ETRF na Evrazijo majhna, na nivoju milimetrov ali celo zanemarljiva. Lokacije na obrobju Evrope, kjer prihaja do stika Evrazije in ostalih (mikro) tektonskih plošč, pa izkazujejo bistveno večje premike. Vektorje hitrosti v ETRF2014 (rezultati za ETRF2020 še niso na voljo!), levo horizontalna, desno višinska komponenta, prikazuje slika 13.



Slika 13: Vektorjev hitrosti točk v ETRF2014 (vir: https://www.epncb.oma.be/products-services/coordinates/posvel_map.php)

Hrbtenica vzdrževanja referenčnega sestava ETRF je omrežje stalno delujočih postaj GNSS na območju Evrope EPN (angl. *European Permanent GNSS Network*), ki je dostopno preko spletne strani <https://www.epncb.oma.be/>. V okviru EPN je dostop do podatkov, rezultatov, postopkov itd. možen z:

- Dostopom do opazovanj GNSS postaj omrežja EPN pri naknadni obdelavi, kot tudi v realnem času (naloge podatkovnih centrov),
- Dostop do rezultatov obdelave opazovanj GNSS postaj omrežja EPN, to so ocenjene koordinate in vektorji hitrosti v ITRF in ETRF (aktualna realizacija), parametri troposfere, ionosfere (naloge analiznih centrov),
- Dostop do časovnih vrst koordinat in vektorjev hitrosti postaj GNSS in
- Dostop do postopka in aplikacije za transformacije med vsemi možnimi ITRF, ETRF in med ITRF in ETRF.

ETRF predstavlja izredno natančen in časovno stabilen referenčni sestav, v katerem so zelo kakovostno določene tako koordinate kot tudi vektorji hitrosti geodetskih točk. Ker pa ETRF ni globalen referenčni sestav, ni skladen z ITRF in zato (teoretično) ne s satelitskimi opazovanji. Relacija med koordinatami satelitov GNSS in koordinatami točk v ETRF ni enaka kot relacija dobljena iz opazovanj GNSS. V okviru enojnih in dvojnih faznih razlik je napaka za enkrat še zanemarljiva, a bo s časom prerasla natančnost opazovanj GNSS. Takrat bo potrebno vse obdelave opazovanj GNSS izvajati v ITRF in na koncu le koordinate ITRF transformirati v ETRF.