

ETRS89/D96-17 – REZULTAT GNSS-IZMERE EUREF SLOVENIJA 2016

ETRS89/D96-17 – A RESULT OF THE EUREF SLOVENIA 2016 GNSS CAMPAIGN

Sandi Berk, Oskar Sterle, Klemen Medved, Bojan Stopar

UDK: 521.181(497.4)
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 12. 2. 2020
Sprejeto: 12. 3. 2020

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.43-67
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 12. 2. 2020
Accepted: 12. 3. 2020

IZVLEČEK

Horizontalna sestavina državnega prostorskega referenčnega sistema Slovenije temelji na EUREF GPS-izmerah pasivne GNSS-mreže EUREF-točk v letih 1994–1996. Obe državni aktivni GNSS-mreži – SIGNAL in kombinirana geodetska mreža 0. reda – sta bili vzpostavljeni naknadno, kar povzroča neskladnost koordinat GNSS-točk. Poleg tega naj bi po dobrih dveh desetletjih od vzpostavitve državnega horizontalnega referenčnega koordinatnega sistema (D96) temu 'potekel rok trajanja' tudi zaradi precej dejavne tektonike. V letu 2016 je bila izvedena nova EUREF GNSS-izmera z namenom preveriti in izboljšati kakovost koordinat GNSS-točk v Sloveniji. Prinesla je novo realizacijo ETRS89 v Sloveniji – geodetski datum D17. Slednji zaradi prevelikih koordinatnih razlik glede na D96 ni bil uveljavljen neposredno. Izbran je bil pragmatičen pristop, ki kot se le dá malo spremeni obstoječe koordinate, vendar pa upošteva tudi dejanske spremembe v fizičnem prostoru in odpravlja nastala trenja v GNSS-mrežah. Nove koordinate temeljijo tako na stari (D96) kot tudi novi (D17) realizaciji ETRS89 in so dobile oznako D96-17. Glede na zahtevano natančnost izmere v zemljiškem katastru ostanejo vse doslej določene koordinate zemljiškokatastrskih točk nespremenjene. Glavna korist posodobitve koordinat v ključnih GNSS-mrežah v državi je višja natančnost in točnost določanja položajev v prihodnje.

KLJUČNE BESEDE

D96-17, ETRS89, EUREF, geodetski datum, koordinatni sistem, referenčni sestav

ABSTRACT

The horizontal component of the national spatial reference system of Slovenia is based on EUREF GPS campaigns at the passive GNSS-network of EUREF sites in the years 1994–1996. Both active GNSS networks (the SIGNAL and Zero-Order Combined Geodetic Networks) were established afterwards, which caused inconsistencies in coordinates based on GNSS surveys. Furthermore, the lifetime of the national coordinate reference system (D96) might be expired after two decades from its realization due to relatively active tectonics. A new GNSS campaign was carried out in 2016 in order to validate and improve the quality of coordinates of GNSS sites in Slovenia. The result is a new realization of ETRS89 referred to as D17. However, it was not implemented directly due to substantial coordinate differences when compared to the previous realization. A pragmatic approach was chosen that attempted to keep changes of coordinates as small as possible. It eliminated inconsistencies but also distortions in GNSS networks caused by the changes in physical space. The new coordinates are based on both the old (D96) and new (D17) realizations of ETRS89 and are denoted by D96-17. According to the requirements for the quality of coordinates in the land cadastre surveys, all the previously determined coordinates of cadastral points remain unchanged. The main benefit of the update of coordinates in the core GNSS networks in the country is more precise and accurate positioning in the future.

KEY WORDS

D96-17, ETRS89, EUREF, geodetic datum, coordinate system, reference frame

1 UVOD

Horizontalna sestavina slovenskega državnega prostorskega koordinatnega sistema temelji na kombiniranem izračunu EUREF GPS-izmer, ki so bile izvedene v letih 1994, 1995 in 1996. Izračun je bil predstavljen (Berk in sod., 2004) in potrjen (EUREF Resolutions, 2003) na simpoziju EUREF 2003 v Toledu. Gre za slovensko realizacijo Evropskega terestričnega referenčnega sistema 1989 (ETRS89), ki jo označujemo z ETRS89/D96 (v nadaljevanju: D96 – geodetski datum 1996) – srednja epoha opazovanj za vse tri EUREF GPS-izmere je 1995,55; gre torej za letnico, dobljeno z zaokrožitvijo srednje epohe opazovanj. Ogrodje realizacije je ITRF96/ETRF96.

S časovnim oddaljevanjem od referenčne epohe je, glede na precej dejavno tektoniko na območju Slovenije sicer, kakovostno vzpostavljenemu koordinatnemu sistemu potekel rok uporabe (npr. Caporali in sod., 2011; Sterle, 2015). Zato je Geodetska uprava Republike Slovenije po dveh desetletjih od zadnje EUREF GPS-izmere izvedla novo GNSS-izmero (tokrat so bila uporabljena GPS- in GLONASS-opazovanja), imenovano EUREF Slovenija 2016 (v nadaljevanju: EUREF-izmera 2016), s cilji:

- zagotoviti kakovostne koordinate točk v državnem referenčnem koordinatnem sistemu,
- preveriti in izboljšati skladnost koordinat v državni mreži EUREF-točk in stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL,
- povezati mrežo EUREF-točk in omrežje SIGNAL s kombinirano geodetsko mrežo 0. reda ter
- ugotoviti vplive recentne tektonike na ozemlju Slovenije na kakovost obstoječe realizacije državnega horizontalnega koordinatnega sistema Slovenije.

Izračun osnovne mreže EUREF-izmere 2016, ki je vključevala podniz vseh točk (omejitev na uradne EUREF-točke v Sloveniji in GNSS-postaje 0. reda) in zgoľ meritve za čas izmere na izbranih pasivnih GNSS-točkah (skupaj 21 dnevni sesij), je bil predstavljen (Berk in sod., 2018) in potrjen (EUREF Resolutions, 2018) na simpoziju EUREF 2018 v Amsterdamu. Rezultat je nova realizacija ETRS89 v Sloveniji z oznako ETRS89/D17 (v nadaljevanju: D17 – geodetski datum 2017) – srednja epoha EUREF-izmere 2016 je 2016,75; tudi tu gre za letnico, dobljeno z zaokrožitvijo srednje epohe opazovanj. Ogrodje realizacije je IGB08/ETRF2000.

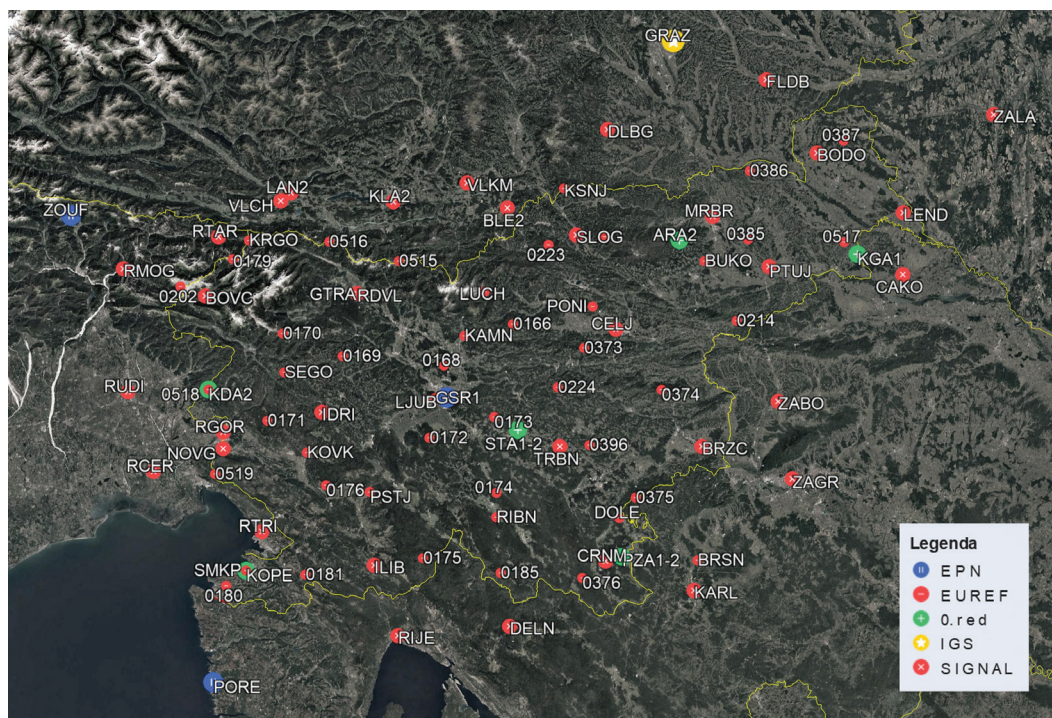
Kot je bilo pričakovati, so razlike med koordinatami točk iz obeh realizacij ETRS89 (D96 in D17) velike – tudi več kot 8 centimetrov. Po predstavitvi D17 v Amsterdamu je bil po enaki metodologiji izveden še izračun celotne mreže, v katerega je bilo vključenih 117 GNSS-točk (Berk, 2019, str. 521), in sicer za celotno EUREF-izmero 2016 (vseh 80 zaporednih dnevnih sesij). Sprejeta je bila pragmatična odločitev, da nova realizacija ne bo uveljavljena neposredno. Dobljene koordinate točk, ki določajo D17, so bile na koncu transformirane v D96. Tako smo dobili ‘osveženi geodetski datum D96’ z oznako D96-17.

Gre za nujno sanacijo zatečenega stanja, ki se zgleduje po podobnih pragmatičnih pristopih (z dodatno transformacijo) v nekaterih drugih evropskih državah (npr. Häkli in sod., 2016; Altiner in Perlt, 2018). Cilj je bil zagotovitev večje skladnosti koordinat GNSS-točk (v uporabi) z njihovimi dejanskimi vrednostmi (v fizičnem prostoru) zaradi izboljšanja kakovosti produktov in storitev GNSS-omrežij. Ključni motiv za pragmatično rešitev je bil podaljšati rok uporabnosti koordinat v državnem referenčnem koordinatnem sistemu, torej izogniti se transformaciji prostorskih podatkovnih zbirk (iz D96 v D17), na primer podatkov zemljiškega katastra.

V omrežju SIGNAL so bile nove koordinate D96-17 uvedene s 1. januarjem 2020, hkrati pa so bile zaradi pridobitve enoličnih mednarodnih oznak (DOMES numbers) spremenjene tudi oznake nekaterih stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL (Obvestilo, 2019). V prispevku sta podrobneje predstavljeni določitev koordinat točk GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016 v D17 in način njihove transformacije v D96-17.

2 PROSTORSKI IN ČASOVNI OBSEG GNSS-IZMERE EUREF SLOVENIJA 2016

V EUREF-izmero 2016 so bile vključene vse točke iz predhodnih EUREF GPS-izmer, ki še omogočajo izvedbo kakovostnih meritev. Izmed 49 točk so tako izpadle trigonometrične točke 1. reda Grintovec (uničena), Lendavske gorice (nestabilen steber) in Žigartov vrh (nestabilen steber, kasneje odstranjen) ter geodinamična točka Pasja ravan (uničena), kar pomeni, da je bilo ponovno izmerjenih skoraj 92 % prvotnih EUREF-točk, na katerih temelji D96. V izmero je bila vključena še nova geodinamična točka (Dole) ter dve EUREF-točki na ozemlju Hrvaške (Brusnik in Pulj), tako da je bilo skupaj v EURE F-izmero 2016 vključenih 48 pasivnih GNSS-točk. Meritve je hkrati izvajalo po pet terenskih ekip z GNSS-sprejemniki Javad Triumph LS2 (Zupančič, 2016; Medved, 2016).

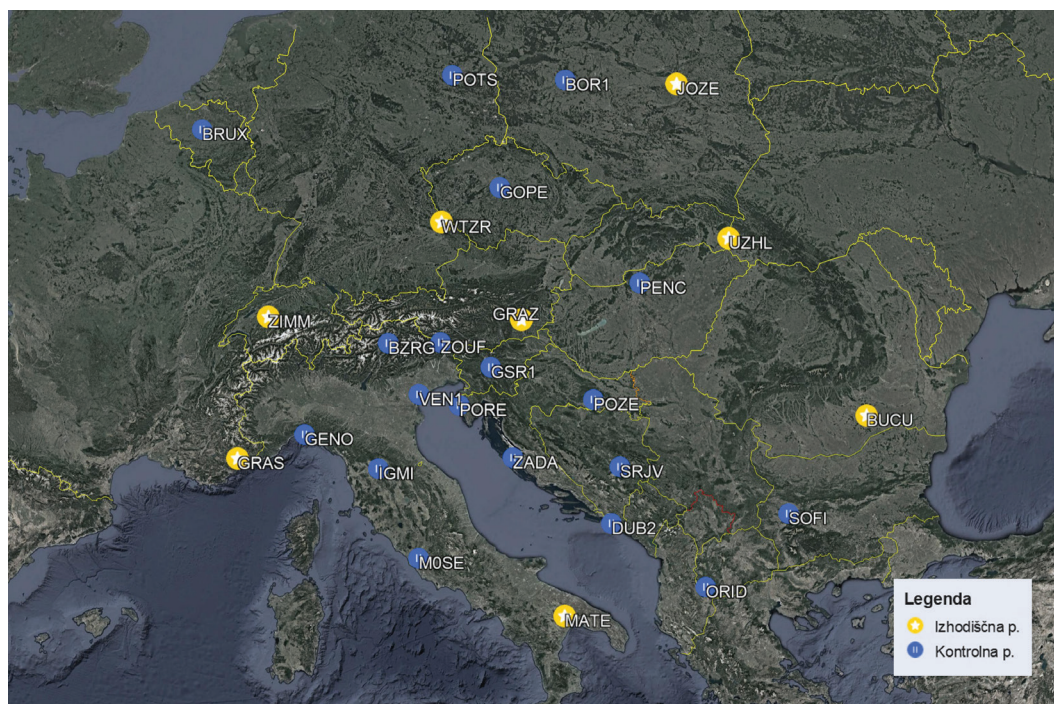


Slika 1: GNSS-točke/postaje na ozemlju države in bližnje okolice, vključene v GNSS-izmero EUREF Slovenija 2016 (podloga: Google Earth, 2018).

Poleg pasivne mreže GNSS-točk sta bili v obdelavo vključeni tudi obe državni omrežji stalnih GNSS-postaj: SIGNAL in kombinirana geodetska mreža 0. reda. V omrežje SIGNAL je bilo med EUREF-izmero 2016 vključenih vseh 16 danes delujočih stalnih GNSS-postaj na ozemlju Slovenije. Poleg tega so bila GNSS-opazovanja pridobljena še za 21 stalnih GNSS-postaj na ozemljih sosednjih držav, predvidenih

za meddržavno izmenjavo podatkov v realnem času: šest v Italiji (izmed katerih so danes v omrežje SIGNAL vključene tri), sedem v Avstriji (izmed katerih so danes v omrežje SIGNAL vključene štiri), ena na Madžarskem ter sedem na Hrvaškem (izmed katerih jih je danes v omrežje SIGNAL vključenih šest). V kombinirani geodetski mreži 0. reda pa je med izvedbo EUREF-izmere 2016 delovalo osem od deset danes delujočih stalnih GNSS-postaj (vključno s koprsko, ki je hkrati del omrežja SIGNAL); manjkali sta takrat še nedelujoči GNSS-postaji 0. reda Areh zahod (ARA1) in Korada zahod (KDA1), torej na dveh lokacijah danes dvojnih GNSS-postaj (slika 1).

Poleg navedenih pa je bilo v obdelavo vključenih še dodatnih 25 stalnih GNSS-postaj omrežij EPN (EUREF Permanent GNSS Network) in/ali IGS (International GNSS Service) v širši okolici Slovenije, in sicer v vlogi izhodiščnih GNSS-postaj za določitev geodetskega datuma GNSS-mreže (angl. reference frame stations; v nadaljevanju: izhodiščne GNSS-postaje) ter kontrolnih GNSS-postaj (slika 2).



Slika 2: Izhodiščne in kontrolne GNSS-postaje, vključene v GNSS-izmero EUREF Slovenija 2016 (podloga: Google Earth, 2018).

Skupaj je bilo tako v končno obdelavo EUREF-izmere 2016 vključenih 69 stalnih GNSS-postaj. Na vseh pasivnih GNSS-točkah je bila izvedena tridnevna (72-urna) statična GNSS-izmera. Zaradi velikega števila točk je bila izmera razdeljena na devet serij s po tremi zaporednimi dnevnimi sesijami. Med temi serijami so bile prekinitve za menjave in selitve terenskih ekip, ki so trajale od tri do največ 11 dni. Dnevne sesije so se pričele in končale ob 10:00 UTC oziroma od 30. oktobra dalje – po prehodu s poletnega nazaj na standardni čas – ob 11:00 UTC. EUREF-izmera 2016 je trajala od 22. avgusta do 10. novembra 2016; skupaj z vmesnimi serijami, ko so se meritve izvajale samo na stalnih GNSS-postajah, torej obsega 80 zaporednih dnevnih sesij. Srednja epoha izmere (tj. 2016,75) je 1. oktober 2016 ob 10:10 UTC (Berk, 2019, str. 8).

3 PODATKI GNSS-IZMERE EUREF SLOVENIJA 2016

Datoteke s surovimi GNSS-opazovanji v formatu RINEX (Receiver INdependent EXchange format, *.16O) za stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL in vanj (v času izmere) vključene postaje sosednjih GNSS-omrežij ter za postaje kombinirane geodetske mreže 0. reda so bile pridobljene z RINEX-portala omrežja SIGNAL (SIGNAL, 2016) oziroma iz internih arhivov Službe za GNSS. RINEX-datoteke za v SIGNAL naknadno vključene stalne GNSS-postaje italijanske Rete GNSS FVG so bile pridobljene prek spletnega portala avtonomne regije Furlanija - Julijska krajina (Rete GNSS FVG, 2016), za v SIGNAL naknadno vključeni postaji v Beljaku (VLCH) in Velikovcu (VLKM) ter za IGS-postajo v Gradcu (GRAZ) od avstrijskega Zveznega urada za meroslovje in geodezijo (BEV), za nadomestno postajo v Zagrebu (ZAGR) pa od hrvaške Državne geodetske uprave (DGU). RINEX-datoteke za IGS- in EPN-postaje so bile pridobljene s ftp-strežnika CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System), gl. Noll (2010) in CDDIS (2016), oziroma prek spletnih strani NASE (National Aeronautics and Space Administration), gl. NASA (2016), nekatere pa tudi s ftp-strežnika EPN (Bruyninx in sod., 2012; EPN RINEX, 2016) in ftp-strežnika OLG (Observatorium Lustbühel Graz), gl. OLG (2016).

Rezultat GNSS-izmer na pasivnih GNSS-točkah je 144 dnevni RINEX-datotek (tj. 48×3). V primerjavi s temi meritvami je bilo na stalnih GNSS-postajah med EUREF-izmero 2016 kar nekaj težav; zgolj 42 postaj (tj. slabih 61 %) je popolnih, torej brez manjkajočih dnevni RINEX-datotek. Skupaj je bilo pripravljenih še 5410 dnevni RINEX-datotek za stalne GNSS-postaje – s ponovnim razrezom opazovanj, ki je bil časovno prilagojen dnevnim sesijam meritev na pasivnih GNSS-točkah. Tako je bilo v končno obdelavo celotne mreže vključenih 5554 dnevni RINEX-datotek (Berk, 2019, str. 521).

Interval registracije GNSS-signalov v vseh pridobljenih RINEX-datotekah je bil 30 sekund. Najmanjši višinski kot registracije GNSS-signalov (angl. elevation cut-off) na pasivnih GNSS-točkah je bil 10° , za večino stalnih GNSS-postaj pa 0° . Za IGS-postajo v Rimu (MOSE) je bil najmanjši višinski kot registracije 3° , za GNSS-postaje v Rete GNSS FVG, kombinirani geodetski mreži 0. reda in omrežju SIGNAL pa 5° , vendar je bil ta za slednje (tj. GNSS-postaje omrežja SIGNAL) še pred pričetkom pete serije EUREF-izmere 2016, tj. 23. septembra 2016 ob 14:00 UTC, zmanjšan na 0° (Berk, 2019, str. 29).

Za večino stalnih GNSS-postaj so bila na voljo opazovanja za GPS- in GLONASS-satelite; opazovanja za ostale sisteme globalne satelitske navigacije pa – skladno s smernicami, veljavnimi med obdelavo EUREF-izmere 2016 (Bruyninx in sod., 2013) – niso bila vključena v obdelavo. Zgolj GPS-opazovanja so bila na voljo za IGS-postaje v Genovi (GENO), Józefoslawu (JOZE) in Zimmerwaldu (ZIMM) ter za GNSS-postaji 0. reda Priložje vzhod (PZA2) in Šentvid pri Stični zahod (STA1). Čeprav so bila na voljo tudi GLONASS-opazovanja za postaji Bruselj (BRUX) in Ohrid (ORID), niso bila uporabljena – v prvem primeru zaradi priporočenega načina tvorbe GNSS-vektorja (BRUX–ZIMM), v drugem pa, ker je bila individualna absolutna kalibracija za ohridsko postajo na voljo samo za GPS-opazovanja (Berk in sod., 2018, str. 3).

Za stalne GNSS-postaje kombinirane geodetske mreže 0. reda in postajo omrežja SIGNAL na Ptuj (PTUJ) ter za osem EPN-postaj, in sicer v Bocnu (BZRG), Bruslju (BRUX), Bukarešti (BUCU), Ohridu (ORID), Pencu (PENC), Rimu (MOSE), Sofiji (SOFI) in Wetzllu (WTZR), so bile uporabljene individualne absolutne kalibracije GNSS-anten. Njihovo neupoštevanje bi lahko prineslo koordinatne razlike

tudi do 10 milimetrov (Araszkiewicz in Völksen, 2017). Individualne absolutne kalibracije za slovenske GNSS-antene so bile izvedene v podjetju GEO++, in sicer s pomočjo robota (Wübbena in sod., 2006). Pripadajoče datoteke ANTEX (ANTenna EXchange format, *.ATX) so bile pridobljene iz internega arhiva Službe za GNSS. Za EPN-postaje so bile ANTEX-datoteke pridobljene prek spletnih strani EPN (EPN, 2016–2018) – uporabljena je bila datoteka EPNC_08.ATX, ki sicer temelji na datoteki IGS08.ATX s kalibracijami GNSS-anten za IGS-postaje, vendar slednja ne vsebuje individualnih absolutnih kalibracij GNSS-anten (Schmid in sod., 2016).

Za stalne GNSS-postaje so bili podatki o uporabljenih GNSS-sprejemnikih in antenah ter njihovi namestitvi pridobljeni iz ustreznih log-datotek. Za stalne postaje kombinirane geodetske mreže 0. reda ter omrežja SIGNAL in vanj (med izmero) vključene postaje sosednjih GNSS-omrežij so bile pridobljene prek spletnih strani omrežja SIGNAL (SIGNAL, 2016) oziroma iz internega arhiva Službe za GNSS. Kot vir podatkov o EPN-postajah je bila uporabljena datoteka EUREF52.STA ter ustrezne log-datoteke, ki so bile pridobljene prek spletnih strani EPN (EPN, 2016–2018) ter s spletnega portala IGS (IGS, 2016).

Za izračun EUREF-izmere 2016 so bile – skladno s smernicami EUREF (Bruyninx in sod., 2013) – uporabljene končne IGS-tirnice/ure (angl. final IGS orbits/clocks) satelitov GPS in GLONASS s pripadajočimi parametri vrtenja Zemlje (angl. Earth rotation parameters – ERP), ki so bili pridobljeni s ftp-strežnika IGS (Kouba, 2009; IGS Orbits, 2017). Vplivi plimovanja oceanov (angl. ocean tide loading displacements) so bili modelirani z uporabo spletne storitve vesoljskega observatorija Onsala (Bos in Scherneck, 2018). Tirnice planetov in Lune (angl. planetary and lunar ephemerides) DE405 so bile pridobljene z Nasinega ftp-strežnika (Standish, 1998; JPL Ephemerides, 2017). Globalni model ionosfere je bil pripravljen s podatki, pridobljenimi s ftp-strežnika Astronomskega inštituta Univerze v Bernu (ION Model, 2018). Model troposfere VMF1 (Vienna Mapping Function), ki temelji na podatkih Evropskega centra za srednjeročne vremenske napovedi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF), je bil pridobljen s ftp-strežnika Tehniške univerze na Dunaju (Boehm in sod., 2006; VMF1 Model, 2018).

Pri določitvi geodetskega datuma so bili za izhodiščne GNSS-postaje uporabljeni produkti EPN v obliki kumulativnih izračunov koordinat in vektorjev hitrosti (Bruyninx in sod., 2012), in sicer zadnji izračun v IGB08 z oznako EPN_A_IGb08_C1934 (IGb08, 2017). Vsi ostali vhodni podatki za izračun EUREF-izmere 2016 pa so bili vzeti s ftp-strežnika Astronomskega inštituta Univerze v Bernu (BSWUSER52, 2017).

4 OBDELAVA PODATKOV GNSS-IZMERE EUREF SLOVENIJA 2016

Za obdelavo EUREF-izmere 2016 je bil uporabljen programski paket 'Bernese GNSS Software', različica 5.2, objavljena 28. februarja 2018, in pripadajoča programska dokumentacija (Dach in sod., 2015; Dach in Fridez, 2017). Upošteevane so bile smernice za določitev koordinat v ETRS89 (t. i. zgoštevitev EUREF), različica 5, objavljena 28. maja 2013 (Bruyninx in sod., 2013). Izračun koordinat točk GNSS-mreže je bil izveden v ITRF2008/IGb08 (Altamimi in sod., 2011; Reischung in sod., 2012), torej v ITRF-u, ki je bil v uporabi med izvedbo EUREF-izmere 2016. Za neodvisno kontrolo transformacije končnih koordinat iz IGB08 v ETRF2000 je bil uporabljen EPN Transformation Service (ETRF/ITRF, 2017), ki sledi tehničnim napotkom EUREF glede transformacij med mednarodnimi in evropskimi terestričnimi referenčnimi sistemi (Altamimi, 2018).

4.1 Izbor izhodiščnih in kontrolnih GNSS-postaj

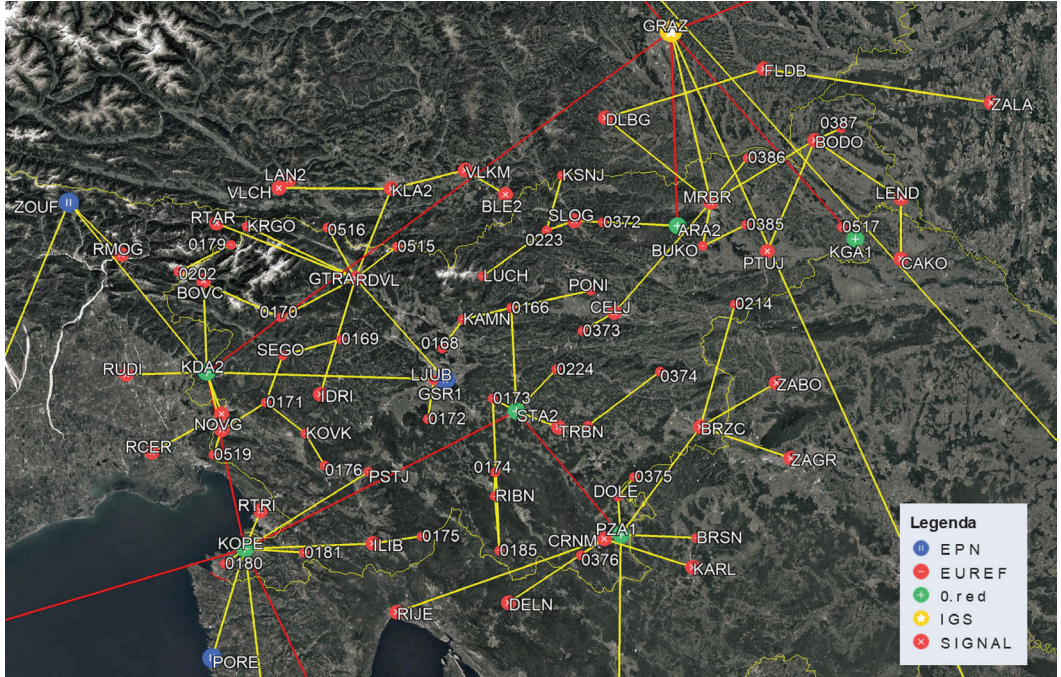
Merila za izbor izhodiščnih GNSS-postaj za določitev geodetskega datuma so temeljila na smernicah EUREF (Bruyninx in sod., 2013). Zahtevano je bilo, da gre za IGS-postaje:

- z najvišjim statusom (angl. core stations) in vključene v mrežo IGS08 (Rebischung in sod., 2012),
- vključene v kumulativni izračun koordinat in vektorjev hitrosti z oznako EPN_A_IGb08_C1934 (IGb08, 2017),
- z neprekinjenimi in verificiranimi časovnimi vrstami (Altamimi, 2003) in po možnosti brez menjav GNSS-opreme v času EUREF-izmere 2016,
- brez manjkajočih dnevni RINEX-datoteke za celoten čas izvedbe EUREF-izmere 2016 – na voljo je moralo biti vseh 80 RINEX-datoteke z vsaj po 1200 epohami (tj. za vsaj 10 ur meritev),
- enakomerno razporejene okoli območja zgojitve EUREF (angl. EUREF densification area) in
- po možnosti že uporabljene v vlogi izhodiščnih GNSS-postaj tudi v predhodnih EUREF GPS-izmerah na območju Slovenije (tj. tistih v letih 1994–1996 in 2007, glej podpoglavje 4.3).

Izmed vseh razpoložljivih IGS-postaj je bilo tako izbranih osem najbližjih, ki kar najbolje izpolnjujejo zgornje zahteve. To so IGS-postaje v Bukarešti (BUCU), Gradcu (GRAZ), Grasseju (GRAS), Materi (MATE), Józefoslawu (JOZE), Užgorodu (UZHL), Wettzllu (WTZR) in Zimmerwaldu (ZIMM). Ostalih 19 uporabljenih EPN-/IGS-postaj (slika 2), vključenih v kumulativni izračun koordinat in vektorjev hitrosti z oznako EPN_A_IGb08_C1934, je imelo pri izračunu EUREF-izmere 2016 status kontrolnih točk – med njimi tudi EPN-postaja v Ljubljani (GSR1).

4.2 Konfiguracija GNSS-mreže

Osnovno načelo pri tvorbi GNSS-vektorjev oziroma tako imenovanih enojnih razlik (angl. single differences) – že pri izračunu osnovne GNSS-mreže za verifikacijo izračuna EUREF-izmere 2016 s strani EUREF Governing Board (EUREF GB) – je bilo zagotoviti čim več opazovanj (strategija MAX-OBS). Vendar pa so bile za pasivne GNSS-točke na voljo zgolj po tri RINEX-datoteke, pa tudi za precej stalnih GNSS-postaj RINEX-datoteke niso bile na voljo za vseh 80 dnevnih sesij. Da bi se konfiguracija GNSS-mreže vseeno nekoliko manj spreminjala med posameznimi serijami pa tudi med dnevnimi sesijami opazovanj, je bila tvorba GNSS-vektorjev izvedena po fazah. Najprej je bilo sestavljeno osnovno ogrodje, ki povezuje osem izhodiščnih GNSS-postaj za določitev datuma GNSS-mreže in šest postaj kombinirane geodetske mreže 0. reda. Pri slednjih je bila tudi na lokacijah dvojnih postaj izbrana samo po ena GNSS-postaja, in sicer Areh vzhod (ARA2), Kog (KGA1), Koper (KOPE), Korada vzhod (KDA2), Prilozje zahod (PZA1) ter Šentvid pri Stični vzhod (STA2). Za stalne GNSS-postaje, ki sestavljajo osnovno ogrodje GNSS-mreže, je bilo na voljo vseh 80 dnevnih RINEX-datoteke, izbrana pa je bila konfiguracija, pri kateri je število opazovanj največje – upošteva vse 80 dnevnih sesij. Nadaljnji izbor GNSS-vektorjev je bil izveden po serijah opazovanj. Za vsako je bila vzeta tista nezapirajoča se kombinacija dodatnih vektorjev (tj. kombinacija, ki ne sestavlja zaključenega lika), za katero je na najneugodnejšo izmed treh dnevnih sesij (z najmanjšim številom opazovanj) število teh opazovanj največje. Pri tem je bila celotna GNSS-mreža zgolj nadgradnja osnovne, torej nadgradnja konfiguracije GNSS-mreže, uporabljene pri izračunu EUREF-izmere 2016 za verifikacijo s strani EUREF GB (Berk in sod., 2018; Berk, 2019, str. 488–496), glej sliko 3.



Slika 3: Tvorba GNSS-vektorjev za GNSS-izmero EUREF Slovenija 2016; osnovno ogrodje – rdeči vektorji – in razširitev mreže – rumeni vektorji (podloga: Google Earth, 2018).

Skupaj je bilo v obdelavo vključenih 118 različnih vnaprej določenih GNSS-vektorjev (angl. predefined baselines). Najdaljši vektor meri 595,6 km (Koper–Matera), najkrajši pa manj kot 1 m (na dvojnih GNSS-postajah 0. reda). Povprečna dolžina vektorjev je 93,4 km, središčna dolžina (mediana) pa 29,8 km. Krajših od 20 km (kratki vektorji) je 48 vektorjev oziroma 40,7 % (Berk, 2019, str. 503).

Za 42 stalnih GNSS-postaj (35,9 % vseh točk mreže) so bila na voljo opazovanja za vseh 80 dnevnih sesij (tj. brez manjkajočih RINEX-datotek) in 41 GNSS-vektorjev (35,3 % vseh vektorjev) je bilo tvorjenih za vseh 80 dnevnih sesij. V GNSS-mrežo je vključenih najmanj 65 in največ 72 ter v povprečju 68,4 dnevnih GNSS-vektorjev (Berk, 2019, str. 521).

4.3 Določitev a priori koordinat in vektorjev hitrosti točk

Približne koordinate točk GNSS-mreže so bile najprej določene za srednjo epoko GNSS-izmere, torej za trenutek 2016,75. Koordinate izhodiščnih in kontrolnih GNSS-postaj so bile vzete iz kumulativnega izračuna v Igb08 z oznako EPN_A_IGb08_C1934 (IGb08, 2017), tj. iz opazovanj za GPS-tedne 834–1934 (od 6. 1. 1996 do 4. 2. 2017). Koordinate so podane za referenčno epoko 2005,0. Transformacija koordinat v izbrano epoko je bila izvedena po enačbi (Altamimi, 2018, str. 5):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{IGb08}(t) = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{IGb08}(t_0) + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}_{IGb08} \cdot (t - t_0), \tag{1}$$

kjer so:

- t ... izbrana ciljna epoha (srednja epoha GNSS-izmere ali posameznih dnevnih sesij),
- t_0 ... referenčna epoha (izhodiščna epoha IGB08 ali srednja epoha GNSS-izmere),
- X, Y, Z ... kartezične koordinate točke in
- V_x, V_y, V_z ... ustrezne komponente vektorja hitrosti.

Nato je bil seznam dopoljen še s približnimi koordinatami ostalih točk mreže. Te koordinate so temeljile na koordinatah, določenih v ETRS89/D96, in sicer v okviru EUREF GPS-izmer v letih 1994–1996 (Berk in sod., 2003 in 2004) za EUREF-točke, v okviru Mini EUREF GPS-izmere v letu 2007 (Mesner in sod., 2007; Sterle in Stopar, 2007; Obvestilo, 2007) za stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL oziroma v okviru naknadnih zgostitev (Obvestilo, 2011) za stalne GNSS-postaje sosednjih omrežij ter v okviru prvih GNSS-izmer geodetske mreže 0. reda (Stopar in sod., 2016, zv. 1, str. 131–143). Približna transformacija v IGB08, epoha 2016,75, je bila izvedena s podobnostno (7-parametrično) transformacijo – enačba (3) –, pri čemer so bili njeni parametri (Berk, 2019, str. 462) določeni na podlagi osmih identičnih točk (Cerk, Donačka gora, Golica, Kamenek, Korada, Kucelj, Malija in Velika Kopa), ki so bile vključene že v izračun osnovne GNSS-mreže za verifikacijo izračuna EUREF-izmere 2016 s strani EUREF GB (Berk in sod., 2018, str. 21).

Koordinate vseh točk GNSS-mreže so bile nato z enačbo (1) transformirane še v koordinate, veljavne za srednje epohe posameznih (80) dnevnih sesij. Razen za izhodiščne in kontrolne GNSS-postaje z znanimi vektorji hitrosti so bili slednji za ostale točke GNSS-mreže privzeti z izhodiščnih oziroma kontrolnih GNSS-postaj. Vzeta je bila najbližja EPN- oziroma IGS-postaja, ki je od dane GNSS-točke ne loči pomembnejša tektonska prelomnica. Med slednje so bili uvrščeni Idrijski prelom in Periadriatski prelom z nadaljevanjem proti vzhodu v Labotski prelom (Placer, 2008). Tak izbor temelji tudi na preteklih raziskavah tektonike s tehnologijo GNSS (npr. Vrabec in sod., 2006; Weber in sod., 2010; Sterle, 2015). Tako so bili uporabljeni vektorji hitrosti s stalnih GNSS-postaj Gradec (GRAZ) za severovzhodno Slovenijo, Ljubljana (GSR1) za osrednjo Slovenijo, Poreč (PORE) za jugozahodno Slovenijo ter Zouf Plan (ZOUF) za severozahodno Slovenijo (Berk, 2019, str. 471–473).

Že pri izračunu osnovne GNSS-mreže za verifikacijo izračuna EUREF-izmere 2016 s strani EUREF GB (Berk in sod., 2018, str. 11–13) je bila izvedena tudi analiza vplivov uporabe različnih a priori vektorjev hitrosti. Uporaba zgoraj opisanih privzetih vektorjev hitrosti in tistih, ki so določeni z linearno interpolacijo med zgoraj navedenimi EPN-/IGS-postajami (po Delaunayjevih trikotnikih), dá tako rekoč iste rezultate izračuna; vpliv dobljenih razlik pri ocenah vektorjev hitrosti na končne koordinate točk znaša do 0,01 mm in je torej za časovni obseg EUREF-izmere 2016 (80 dni) povsem zanemarljiv. Tudi če uporabimo kar globalna modela NUVEL-1 (Argus in Gordon, 1991) ali NUVEL-1A (DeMets in sod., 1994), so razlike med končnimi koordinatami točk manjše od 0,2 mm (Berk in sod., 2018, str. 18).

4.4 Določitev končnih koordinat točk v IGB08

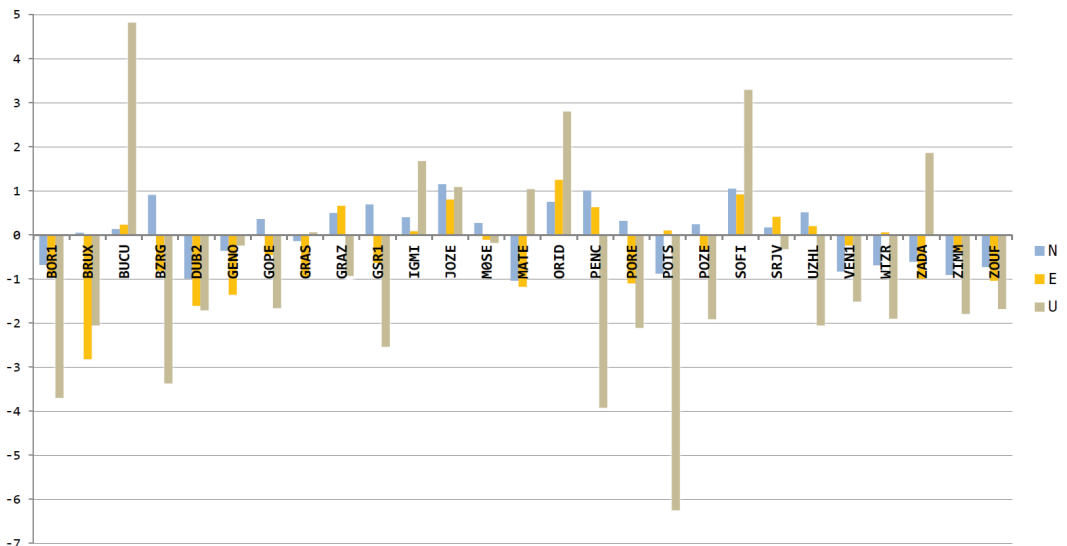
Vse tehnične podrobnosti posameznih faz izračuna EUREF-izmere 2016 so opisane v poročilu o izračunu osnovne GNSS-mreže, pripravljenem za potrebe verifikacije s strani EUREF GB (Berk in sod., 2018); za izračun celotne GNSS-mreže je bil uporabljen povsem enak postopek. Končni rezultat izračuna so datoteke koordinat GNSS-točk (station CoorDinates, *.CRD) in datoteke v formatu SINEX (Solution

INdependent EXchange format, *.SNX), ki vključujejo podatke o uporabljeni programski in strojni opremi za obdelavo GNSS-mreže, informacije o uporabljenih GNSS-sprejemnikih in antenah, morebitnih individualnih absolutnih kalibracijah, elementih ekscentričnosti, parametrih izračuna ter opazovanih in njihovi kakovosti v obliki variančno-kovariančne matrike. Rezultat izračuna posameznih dnevnih sesij je:

- 80 datotek s koordinatami vseh GNSS-točk v srednjih epohah za vsako posamezno dnevno sesijo – datoteke FINdđđđ0.CRD – in
- 80 datotek v formatu SINEX – datoteke FINdđđđ0.SNX,

kjer je dđđđ zaporedna številka dneva v letu (dan pričetka meritev).

Končni rezultat izračuna GNSS-mreže v IGB08 je datoteka s koordinatami vseh GNSS-točk v srednji epohi EUREF-izmere 2016 (tj. 2016,75) – datoteka SVN16_IGb08.CRD – in pripadajoča datoteka v formatu SINEX – datoteka SVN19167.SNX, ki sta na voljo na portalu Prostor (EUREF2016, 2020). Gre za rezultat izravnave opazovanj iz vseh 80 dnevnih sesij, pri kateri je bilo uporabljenih 199.177.984 opazovanj in določenih 616.922 neznank (Berk, 2019, str. 594). Datum GNSS-mreže je bil določen na podlagi izbranih osmih izhodiščnih GNSS-postaj (slika 2) in treh vezi med koordinatnimi neznankami (angl. minimum constraint solution); praktično je bil določen z optimalno translatorno (3-parametrično) transformacijo (pomiki oziroma translacije po X -, Y - in Z -osi). Kot neznanke v mreži so bile določene samo koordinate GNSS-točk, ne pa tudi njihovi vektorji hitrosti; komponente slednjih so bile obravnavane kot dane količine. Uporabljene so bile tudi relativne vezi med koordinatnimi neznankami (angl. relative constraint positions), in sicer za nivelirani višinski razliki na dvojnih GNSS-postajah 0. reda v Prilozju in Šentvidu pri Stični (Berk, 2019, str. 622).



Slika 4: Odstopanja koordinat [mm] v IGB08, epoha 2016,75, na izhodiščnih in kontrolnih GNSS-postajah EUREF-izmere 2016.

Odstopanja tako dobljenih končnih koordinat na osmih izhodiščnih GNSS-postajah EUREF-izmere 2016 v IGB08 od njihovih koordinat iz kumulativnega izračuna z oznako EPN_A_IGb08_C1934 (IGb08, 2017), pretvorjenih v epoho 2016,75, v lokalnem geodetskem koordinatnem sistemu (N , E , U) za vsako posamezno točko (tj. $IGb08_{EPN}$ minus $IGb08_{SVN16}$), so po višini (U) od $-2,1$ mm v Užgorodu (UZHL)

do 4,8 mm v Bukarešti (BUCU) in za horizontalni koordinati (N, E) od -1,2 mm v Materi (MATE) do 1,2 mm v Józefosławu (JOZE). Odstopanja končnih koordinat na 19 kontrolnih GNSS-postajah so po višini od -6,3 mm v Potsdamu (POTS) do 3,3 mm v Sofiji (SOFI) in za horizontalni koordinati od -2,8 mm v Bruslju (BRUX) do 1,3 mm v Ohridu (ORID); na EPN-postaji v Ljubljani (GSR1) so odstopanja po višini -2,5 mm in za horizontalni koordinati do 0,7 mm, glej sliko 4.

Kot mera kakovosti ujemanja koordinat iz neposredne primerjave oziroma po izvedeni optimalni transformaciji izbranega niza (veznih) točk je bil uporabljen korenjen srednji kvadratni pogrešek (angl. Root Mean Square error; v nadaljevanju: RMS) koordinat, in sicer po enačbi:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot n - p} \sum_{i=1}^n (N_i^2 + E_i^2 + U_i^2)}, \tag{2}$$

kjer sta n število uporabljenih (veznih) točk, p pa število parametrov transformacije (0 za neposredno primerjavo koordinat, 3 za translatorsno, 6 za togo in 7 za podobnostno transformacijo).

RMS koordinat po optimalni translatorsni (3-parametrični) transformaciji koordinat izhodiščnih GNSS-postaj (učinek uporabe vezi med neznankami pri izravnavi mreže) znaša 1,5 mm, RMS koordinat iz neposredne primerjave koordinat kontrolnih GNSS-postaj pa 1,7 mm (Berk, 2019, str. 712).

4.5 Transformacija koordinat točk v ETRF2000 (ETRS89/D17)

Koordinate v novi realizaciji ETRS89 v Sloveniji z oznako ETRS89/D17 so bile skladno s smernicami EUREF (Bruyninx in sod., 2013) določene s transformacijama:

- iz IGB08/ITRF2008 v ITRF2000 in nato še
- iz ITRF2000 v ETRF2000.

Transformacijo koordinat točk med dvema terestričnima referenčnima sestavoma (TRF_A in TRF_B) v izbrani epohi izvedemo po poenostavljeni enačbi za podobnostno (7-parametrično) transformacijo (Altamimi, 2018, str. 1):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{TRF_B} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{TRF_A} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_Z & R_Y \\ R_Z & D & -R_X \\ -R_Y & R_X & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{TRF_A}, \tag{3}$$

kjer so:

- $[\cdot]_{TRF_A}$... vektor koordinat točk v izvornem terestričnem referenčnem sestavu (npr. ITRF2008),
- $[\cdot]_{TRF_B}$... vektor koordinat točk v ciljnem terestričnem referenčnem sestavu (npr. ITRF2000),
- D ... razlika enot merila,
- T_X, T_Y, T_Z ... pomiki po koordinatnih oseh in
- R_X, R_Y, R_Z ... zasuki okoli koordinatnih osi skladno z IERS-konvencijami (Petit in Luzum, 2010, str. 31).

Gre za poenostavljeno različico Helmertove transformacije, kar je sprejemljivo zaradi zelo majhnih zasukov.

Opombe k enačbam (3), (5) in (6) ter k preglednicam 1–9: enačbe so zapisane v splošni obliki (z vsemi parametri), zato so tudi v pripadajočih preglednicah s transformacijskimi parametri povsod navedeni vsi parametri

(tudi ničelni); izbor ničelnega parametra pa dejansko pomeni ustrezno zmanjšanje števila parametrov transformacije, zato govorimo o 6-parametrični togi transformaciji, 3-parametrični translatorski transformaciji ipd.

Parametri transformacije iz ITRF2008 v ITRF2000 ($T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z$), ki veljajo za referenčno epoho 2000,0, so podani skupaj z njihovimi odvodi po času ($\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{D}, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z$), torej gre v splošnem lahko za 14-parametrično transformacijo; glej preglednico 1.

Preglednica 1: Parametri transformacije iz ITRF2008 v ITRF2000 (ITRF2008 Transformations, 2018).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
\dot{T}_x [mm/y]	\dot{T}_y [mm/y]	\dot{T}_z [mm/y]	\dot{D} [ppb/y]	\dot{R}_x [mas/y]	\dot{R}_y [mas/y]	\dot{R}_z [mas/y]	
-1,9	-1,7	-10,5	1,34	0,00	0,00	0,00	2000,0
0,1	0,1	-1,8	0,08	0,00	0,00	0,00	

Opombi k enotam v preglednicah 1–9: ppb (angl. parts-per-billion) je 10^{-9} , mas (angl. miliarcsecond) pa je 10^{-3} ločne sekunde.

Dejanski parametri transformacije za izbrano epoho so bili določeni po enačbi (Altamimi, 2018, str. 5):

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P} \cdot (t - t_0), \tag{4}$$

kjer so:

- t ... izbrana epoha – srednja epoha GNSS-izmere (2016,75),
- t_0 ... referenčna epoha – izhodiščna epoha transformacije (2000,0),
- $P(t)$... parameter transformacije ($T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y$ ali R_z) v izbrani epohi,
- $P(t_0)$... parameter transformacije ($T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y$ ali R_z) v referenčni epohi in
- \dot{P} ... ustrezen odvod (sprememba) parametra transformacije (za $T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y$ ali R_z) po času.

Dobljeni parametri transformacije za srednjo epoho EUREF-izmere 2016 (tj. 2016,75) so v preglednici 2.

Preglednica 2: Uporabljeni parametri transformacije iz ITRF2008 v ITRF2000 (Berk in sod., 2018, str. 16).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
-0,225	-0,025	-40,65	2,68	0,00	0,00	0,00	2016,75

Transformacijo koordinat točk med ITRF2000 in ETRF2000 v izbrani epohi izvedemo po enačbi (Altamimi, 2018, str. 2):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ETRF2000}(t) = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF2000}(t) + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{R}_3 & \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 & \dot{D} & -\dot{R}_1 \\ -\dot{R}_2 & \dot{R}_1 & \dot{D} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF2000}(t) \cdot (t - t_0), \tag{5}$$

kjer so:

- t ... izbrana epoha – srednja epoha GNSS-izmere (2016,75),
- t_0 ... referenčna epoha – izhodiščna epoha ETRS89 (1989,0),
- \dot{D} ... odvod (sprememba) enote merila po času,
- T_1, T_2, T_3 ... zamiki med izhodišči realizacij ITRF in
- $\dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$... komponente Eulerjevega vektorja za Evrazijo.

Parametri transformacije iz ITRF2000 v ETRF2000 so v preglednici 3.

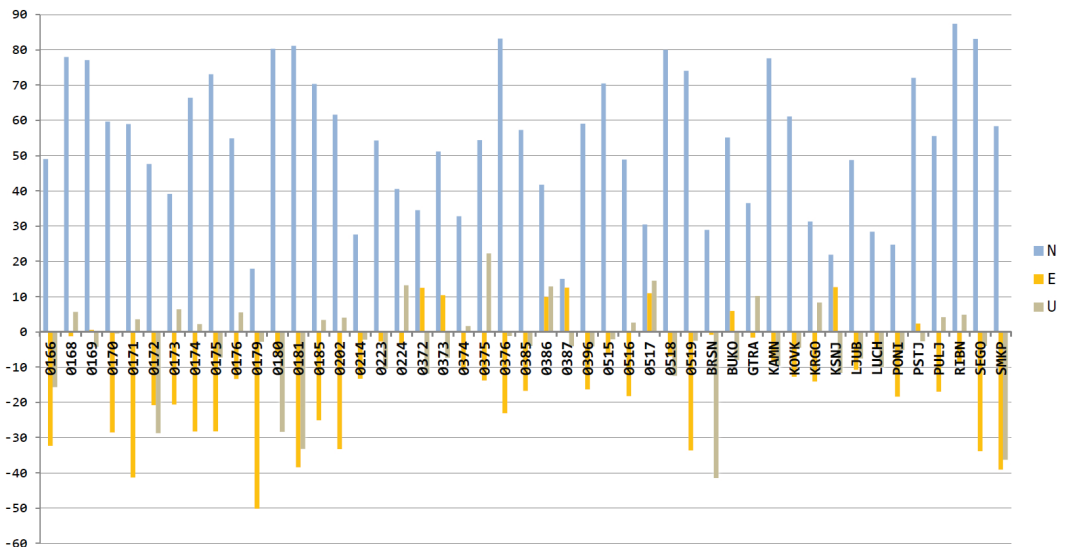
Preglednica 3: Uporabljeni parametri transformacije iz ITRF2000 v ETRF2000 (Altamimi, 2018, str. 8).

T_1 [mm]	T_2 [mm]	T_3 [mm]	D [ppb]	R_1 [mas]	R_2 [mas]	R_3 [mas]	Epoha
\dot{T}_1 [mm/y]	\dot{T}_2 [mm/y]	\dot{T}_3 [mm/y]	\dot{D} [ppb/y]	\dot{R}_1 [mas/y]	\dot{R}_2 [mas/y]	\dot{R}_3 [mas/y]	
54,0	51,0	-48,0	0,00	0,000	0,000	0,000	1989,0
0,0	0,0	0,0	0,00	0,081	0,490	-0,792	

Dobljene koordinate GNSS-točk v ETRF2000 – datoteka SVN16_D17.CRD – so prav tako na voljo na portalu Prostor (EUREF2016, 2020). Določajo novo realizacijo ETRS89 v Sloveniji z oznako ETRS89/D17 – geodetski datum 2017.

5 ANALIZA REZULTATOV GNSS-IZMERE EUREF SLOVENIJA 2016

Pri vseh analizah ujemanja koordinat v nadaljevanju je za njihova odstopanja uporabljen termin ‘popravki koordinat’, in sicer v smislu potrebnih sprememb koordinat iz obstoječe realizacije ETRS89 v Sloveniji (D96) v vsakokratni referenčni niz koordinat (ob različnih preizkušanih scenarijih), ki izhaja iz nove realizacije ETRS89 (D17). Gre za popravke koordinat (angl. coordinate residuals), dobljene na podlagi izravnave koordinat pri določitvi optimalne transformacije med obema nizoma: 6-parametrične (toge) oziroma 0-parametrične pri neposredni primerjavi koordinat. Parametri optimalne transformacije so določeni z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov, torej ob pogoju $\sum(N^2 + E^2 + U^2) = \min$. Vsi navedeni popravki N - in E -koordinat so precej blizu popravkom northing (n) in easting (e) koordinat v TM-projkciji (razlike so predvsem v zvezi z meridiansko konvergenco in elipsoidno višino), popravki U -koordinat pa so tako rekoč enaki popravkom elipsoidnih višin (b).

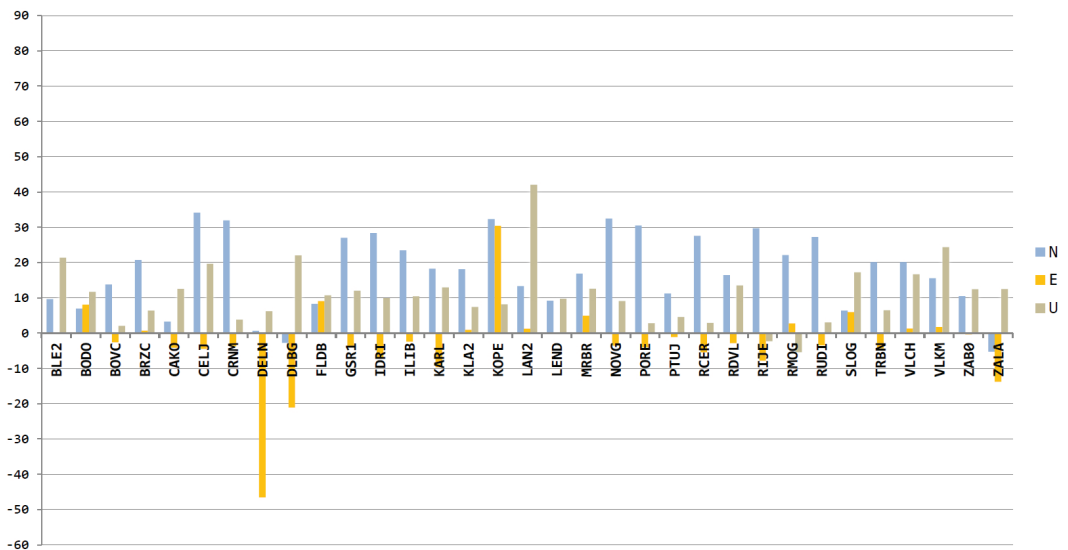


Slika 5: Popravki koordinat [mm] iz D96 v D17 na EUREF-točkah, vključenih v obe realizaciji ETRS89 v Sloveniji.

Najprej je bila izvedena neposredna primerjava koordinat GNSS-točk iz kombiniranega izračuna EUREF GPS-izmer v letih 1994–1996 (Berk in sod., 2004, dodatek 4) ter iz izračuna EUREF-izmere 2016. V obe realizaciji ETRS89 je skupaj vključenih 47 EUREF-točk, od tega dve točki na ozemlju Hrvaške (Brusnik in Pulj). Popravki pri prehodu iz D96 v D17 (tj. D17 minus D96) so po višini (U) od -41,4

mm na Brusniku (BRSN) do 22,2 mm na Gorjancih (0375) in za horizontalni koordinati (N , E) od $-50,2$ mm na Mangartu (0179) do 87,4 mm v Ribnici (RIBN); med slovenskimi točkami je največji zabeležen popravek po višini $-36,3$ mm v Kopru, na pomolu (SMKP), glej sliko 5. RMS koordinat EUREF-točk iz neposredne primerjave – enačba (2) – znaša 36,1 mm (Berk, 2019, str. 729–730).

Nato je bila izvedena še neposredna primerjava koordinat stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL in vanj vključenih postaj sosednjih omrežij, in sicer iz Mini EUREF GPS-izmere v letu 2007 (Obvestilo, 2007) oziroma naknadnih zgostitev omrežja (Obvestilo, 2011), ter iz izračuna EUREF-izmere 2016. Iz nadaljnjih analiz so bile tu izločene nekatere stalne GNSS-postaje sosednjih omrežij, in sicer v Gorici (RGOR), Trbižu (RTAR), Trstu (RTRI) in Zagrebu (ZAGR), saj so predvidene zgolj kot nadomestne postaje (pri daljšem izpadu bližnjih postaj) in torej doslej niso vplivale na določanje položajev točk v Sloveniji. Tako je bilo v primerjavo vključenih 33 stalnih GNSS-postaj, od tega 17 postaj sosednjih omrežij. Popravki koordinat pri prehodu iz D96 v D17 (tj. D17 minus D96) so po višini (U) od $-5,4$ mm v Možnici (RMOG) do 42,1 mm v Vajškri (LAN2) in za horizontalni koordinati (N , E) od $-46,6$ mm v Delnicah (DELN) do 34,1 mm v Celju (CELJ); med slovenskimi postajami pa znašajo največji popravki po višini od 2,1 mm v Bovcu (BOVC) do 19,7 mm v Celju (CELJ) in za horizontalni koordinati od $-6,9$ mm v Idriji (IDRI) do 34,1 mm v Celju (CELJ), glej sliko 6. RMS koordinat stalnih GNSS-postaj iz neposredne primerjave – enačba (2) – znaša 15,7 mm (Berk, 2019, str. 737–738 in 745).



Slika 6: Popravki koordinat [mm] iz D96 v D17 na stalnih GNSS-postajah omrežja SIGNAL in vanj vključenih postajah sosednjih omrežij.

K rezultatom obeh analiz (sliki 5 in 6) pritiče nekaj komentarjev. Viden je tako različen razpon kot tudi trend odstopanj D96- in D17-koordinat. Slednje lahko razumemo kot razhajanje regresijskih ploskev odstopanj po posameznih koordinatah (upoštevaje lokacije točk) iz obeh nizov, torej na podlagi EUREF-točk in stalnih GNSS-postaj. Formalno je D96 realiziran z EUREF-točkami (v nadaljevanju: $D96_{EUREF}$), ki so bile vključene v EUREF GPS-izmere v letih 1994–1996. Zavedati se moramo, da je bilo omrežje SIGNAL vzpostavljeno dobro desetletje kasneje. D96-koordinate stalnih GNSS-postaj (v

nadaljevanju: D96_{SIGNAL}) temeljijo na Mini EUREF GPS-izmeri v letu 2007, ki je sicer vključevala tudi pet uradnih EUREF-točk (Donaučka gora, Korada, Kucelj, Malija in Velika Kopa), vendar pa te potem niso bile uporabljene pri določitvi datuma GNSS-mreže (Obvestilo, 2007), ampak je dejansko šlo za novo realizacijo ETRS89, in sicer na način, da se le-ta kar se da približa prvotni. Težava pri tem je bila nepoznavanje geodinamike ozemlja Slovenije; pri modeliranju vektorjev hitrosti na GNSS-točkah je bil uporabljen kar globalni model NUVEL-1A (DeMets in sod., 1994). Odstopanja pa med drugim izhajajo tudi iz različnih ogrodij obeh realizacij (ITRF96/ETRF96 oz. ITRF2005/ETRF96), razlik v kakovosti ITRF-ov v času obeh realizacij in kakovosti tirnic GNSS-satelitov ter ne nazadnje iz starosti posamezne realizacije (več kot desetletje oziroma več kot dve desetletji), relativni odnosi v geodetski mreži se namreč zaradi delovanja tektonike s časom spreminjajo.

V nadaljevanju so bile izvedene različne primerjave koordinat obeh nizov GNSS-točk (EUREF-točk in stalnih GNSS-postaj), in sicer ob predhodni izvedbi optimalnih translatorskih, togih in podobnostnih (3-, 6- in 7-parametričnih) transformacij. Pri tem so bili izločani tudi posamezni podnizi točk (npr. stalne GNSS-postaje sosednjih omrežij, vse stalne GNSS-postaje s koordinatnimi odstopanji, večjimi od 30 mm, vse EUREF-točke s koordinatnimi odstopanji, večjimi od 40 mm). Izvedene so bile tudi primerjave koordinat ob predhodni redukciji le-teh na referenčni elipsoid (tj. pri $h = 0$). Iz niza EUREF-točk so bile kot nezanesljive izločene točke na Mangartu (0179) in Debelem vrhu (0376), v Kranjski Gori (KRGO) in Ribnici (RIBN) ter obe hrvaški točki – torej na Brusniku (BRSN) in v Pulju (PULJ). Izmed stalnih GNSS-postaj so bile zaradi slabše kakovosti določitve koordinat izločene vse naknadno vključene postaje sosednjih omrežij ter še postaja v Kopru (KOPE), za katero je bilo ugotovljeno, da je lokalno nestabilna (npr. Berk in sod., 2019, slika 3).

Na koncu sta bili izbrani transformaciji, ki sta vključevali prečiščena niza:

- 41 izbranih EUREF-točk in
- 15 izbranih stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL.

S pomočjo obeh prečiščenih nizov točk sta bili določeni optimalni togi (6-parametrični) transformaciji med D96 in D17 – enačba (3) pri $D = 0$ (enakost meril) –, in sicer posebej za EUREF-točke in posebej za stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL.

Parametri optimalne toge (6-parametrične) transformacije iz D96_{EUREF} v D17, določeni na podlagi 41 izbranih EUREF-točk, so v preglednici 4.

Preglednica 4: Optimalni parametri transformacije EUREF-točk iz D96_{EUREF} v D17 (Berk, 2019, str. 774).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
-298,88	265,67	208,88	0,00	24,308	-2,025	39,832	2016,75

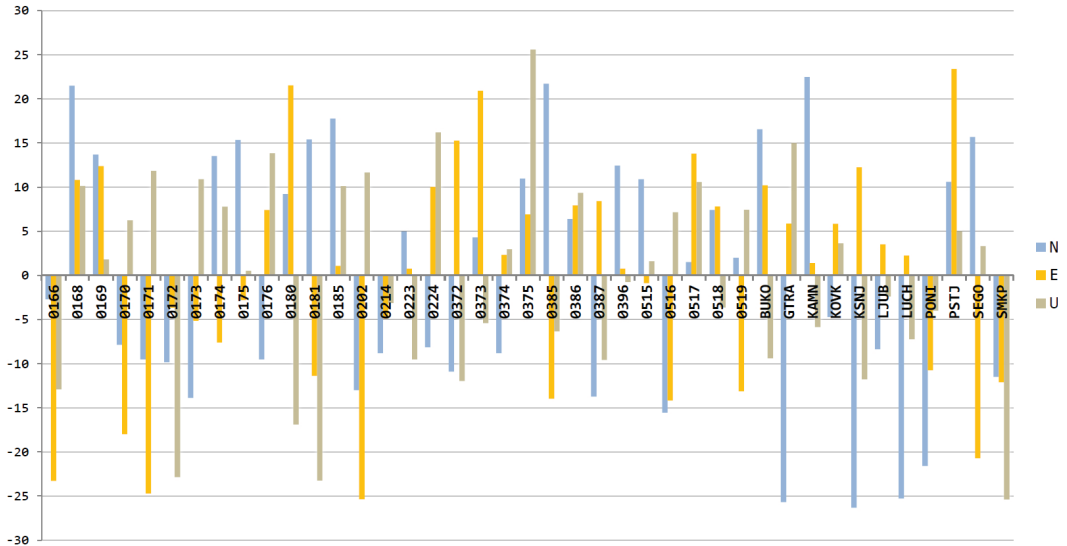
Za obratno transformacijo lahko uporabimo parametre z nasprotnimi predznaki, ki so v preglednici 5.

Preglednica 5: Optimalni parametri transformacije EUREF-točk iz D17 v D96_{EUREF} (Berk, 2019, str. 778).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
298,88	-265,67	-208,88	0,00	-24,308	2,025	-39,832	2016,75

Označimo z D17_{TRANS,5} koordinate, dobljene iz končnih D17-koordinat EUREF-izmere 2016, in sicer s transformacijo s parametri v preglednici 5. Popravki koordinat po izvedbi takšne toge (6-parametrične) transformacije

(tj. $D17_{\text{TRANS}_5}$ minus $D96_{\text{EUREF}}$) znašajo za izbranih 41 EUREF-točk po višini (U) od $-25,4$ mm v Kopru, na pomolu (SMKP), do $25,6$ mm na Gorjancih (0375) in za horizontalni koordinati (N , E) od $-26,3$ mm na Košenjaku (KSNJ) do $23,4$ mm v Postojni (PSTJ), glej sliko 7. RMS koordinat po optimalni togi (6-parametrični) transformaciji prečiščenega niza EUREF-točk – enačba (2) – znaša $13,0$ mm (Berk, 2019, str. 773–774).



Slika 7: Popravki koordinat [mm] iz D96 v D17 na izbranih EUREF-točkah po izvedbi optimalne toge (6-parametrične) transformacije.

Parametri optimalne toge (6-parametrične) transformacije iz $D96_{\text{SIGNAL}}$ v D17, določeni na podlagi 15 izbranih stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL, so v preglednici 6.

Preglednica 6: Optimalni parametri transformacije stalnih GNSS-postaj iz $D96_{\text{SIGNAL}}$ v D17 (Berk, 2019, str. 782).

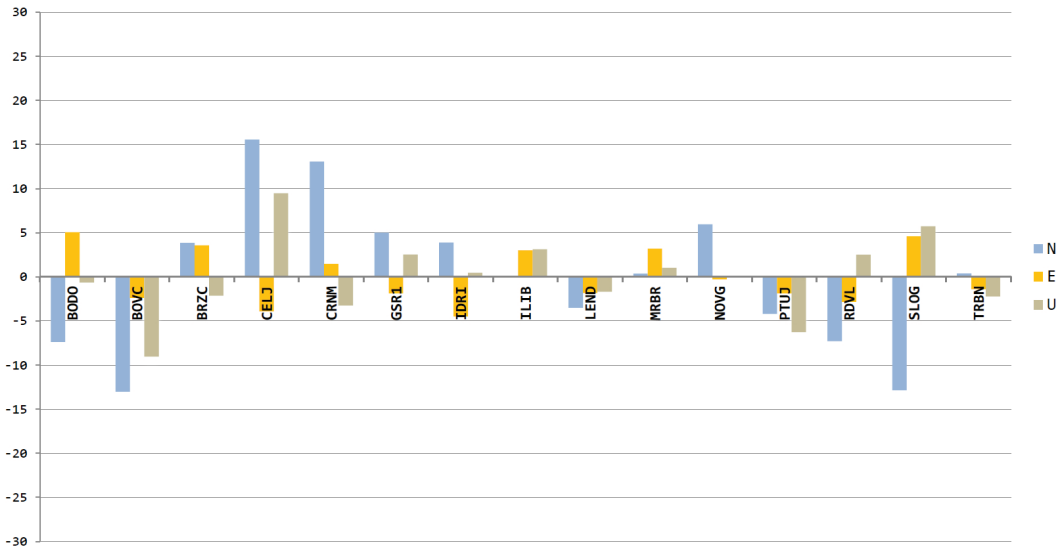
T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
-174,39	-68,60	193,65	0,00	11,272	-5,321	8,907	2016,75

Za obratno transformacijo uporabimo parametre z nasprotnimi predznaki, ki so v preglednici 7.

Preglednica 7: Optimalni parametri transformacije stalnih GNSS-postaj iz D17 v $D96_{\text{SIGNAL}}$ (Berk, 2019, str. 786).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
174,39	68,60	-193,65	0,00	-11,272	5,321	-8,907	2016,75

Označimo z $D17_{\text{TRANS}_7}$ koordinate, dobljene iz končnih D17-koordinat EUREF-izmere 2016, in sicer s transformacijo s parametri iz preglednice 7. Popravki koordinat po izvedbi takšne toge (6-parametrične) transformacije (tj. $D17_{\text{TRANS}_7}$ minus $D96_{\text{SIGNAL}}$) znašajo za izbranih 15 stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL po višini (U) od $-9,0$ mm v Bovcu (BOVC) do $9,5$ mm v Celju (CELJ) in za horizontalni kooordinati (N , E) od $-13,0$ mm v Bovcu (BOVC) do $15,6$ mm v Celju (CELJ); na stalni GNSS-postaji v Ljubljani (GSR1) znašajo popravki po višini $2,5$ mm in za horizontalni koordinati do $5,0$ mm, glej sliko 8. RMS koordinat po optimalni togi (6-parametrični) transformaciji prečiščenega niza stalnih GNSS-postaj – enačba (2) – znaša $6,0$ mm (Berk, 2019, str. 781–782), kar je primerljivo z ujemanjem leta 2008 ponovljene realizacije ETRS89 v Nemčiji s predhodno realizacijo v letu 2002 (Altiner in Perl, 2018).



Slika 8: Popravki koordinat [mm] iz D96 v D17 na izbranih stalnih GNSS-postajah omrežja SIGNAL po izvedbi optimalne toge (6-parametrične) transformacije.

S tako določeno optimalno togo (6-parametrično) transformacijo iz $D96_{\text{SIGNAL}}$ v D17 – parametri v preglednici 6 – je bil ocenjen tudi dejanski premik stalne GNSS-postaje v Kopru (KOPE) med GNSS-izmerama v letih 2007 in 2016. Ocene komponent premika GNSS-antene so: 36,1 mm proti vzhodu, 6,2 mm proti severu in 0,8 mm navzgor (Berk, 2019, str. 789); posebej komponenta premika proti vzhodu (tj. v smeri proti obali, pravokotno nanjo) je izrazita, saj presega šestkratnik RMS-ja koordinat iz optimalne transformacije.

6 DOLOČITEV KONČNIH KOORDINAT TOČK (ETRS89/D96-17)

Za določanje koordinat z GNSS v Sloveniji sta bili pomembni tako mreža EUREF-točk kot tudi omrežje stalnih GNSS-postaj. Na prve so bile vezane GNSS-izmere pred vzpostavitvijo omrežja SIGNAL, vključno z osnovnim nizom približno 2000 veznih točk vsedržavnega modela transformacije med D48/GK in D96/TM, na druge pa velika večina GNSS-izmere od začetka leta 2008. Novo določene koordinate vseh aktivnih in pasivnih GNSS-točk v Sloveniji z oznako ETRS89/D96-17 temeljijo tako na realizaciji ETRS89/D96 (Berk in sod., 2003 in 2004) kot tudi na realizaciji ETRS89/D17 (Berk in sod., 2018) in so dobile oznako D96-17. Izbrana rešitev kar najbolj ohranja tako koordinate EUREF-točk ($D96_{\text{EUREF}}$) kot tudi točk omrežja SIGNAL ($D96_{\text{SIGNAL}}$), hkrati pa upošteva geometrijske odnose v GNSS-mreži, ki so veljali med izvedbo EUREF-izmere 2016, torej relativne premike zaradi delovanja tektonike v obdobju dobrih 20 let (Berk, 2019, str. 792). Prvo je pomembno zaradi ohranjanja kakovosti koordinat vseh točk v zbirkah prostorskih podatkov, določenih s tehnologijo GNSS – brez ponovne transformacije –, drugo pa zaradi zagotavljanja kar najvišje kakovosti določanja položaja z uporabo GNSS v prihodnje. Kakovost določanja položaja v realnem času kot tudi z naknadno obdelavo je namreč odvisna tudi od kakovosti koordinat GNSS-točk, uporabljenih za navezavo oziroma za določitev datuma GNSS-mreže. Izboljšanje kakovosti je bilo že zaznано, na primer pri ponovni določitvi koordinat točk kontrolne GNSS

-mreže po uveljavitvi novih koordinat (D96-17) stalnih GNSS-postaj v omrežju SIGNAL (Kontrolna GNSS-mreža, 2020).

Za določitev končnih D96-17-koordinat vseh točk EUREF-izmere 2016 je bila izbrana kompromisna transformacija koordinat, ki temelji na obeh prečiščenih nizih EUREF-točk oziroma stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL. Koordinate GNSS-točk v D96-17 so težišča položajev, dobljenih z obema optimalnima transformacijama končnega niza koordinat v D17, torej optimalne toge (6-parametrične) transformacije, določene na podlagi 41 izbranih EUREF-točk, ter optimalne toge (6-parametrične) transformacije, določene na podlagi 15 izbranih stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D96-17} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D17} + \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}_{EUREF} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}_{SIGNAL} \right) + \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix}_{EUREF} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix}_{SIGNAL} \right) \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D17}, \quad (6)$$

kjer so:

- D ... razlika enot merila iz preglednice 5 (matrika $[\cdot \cdot]_{EUREF}$) in iz preglednice 7 (matrika $[\cdot \cdot]_{SIGNAL}$); v obeh primerih velja $D = 0$, saj gre za togi transformaciji,
- T_x, T_y, T_z ... pomiki po koordinatnih oseh iz preglednice 5 (vektor $[\cdot]_{EUREF}$) in iz preglednice 7 (vektor $[\cdot]_{SIGNAL}$) ter
- R_x, R_y, R_z ... zasuki okoli koordinatnih osi iz preglednice 5 (matrika $[\cdot \cdot]_{EUREF}$) in iz preglednice 7 (matrika $[\cdot \cdot]_{SIGNAL}$).

Tako vzpostavljena transformacija po enačbi (6) je tudi toga (6-parametrična) transformacija; kot vidimo, so njeni parametri kar aritmetične sredine ustreznih parametrov obeh optimalnih togih (6-parametričnih) transformacij (iz preglednic 5 in 7); podani so v preglednici 8.

Preglednica 8: Parametri končne transformacije GNSS-točk iz D17 v D96-17 (Berk, 2019, str. 811).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
236,635	-98,535	-201,265	0,00	-17,790	3,673	-24,3695	2016,75

Za obratno transformacijo uporabimo parametre z nasprotnimi predznaki, ki so v preglednici 9.

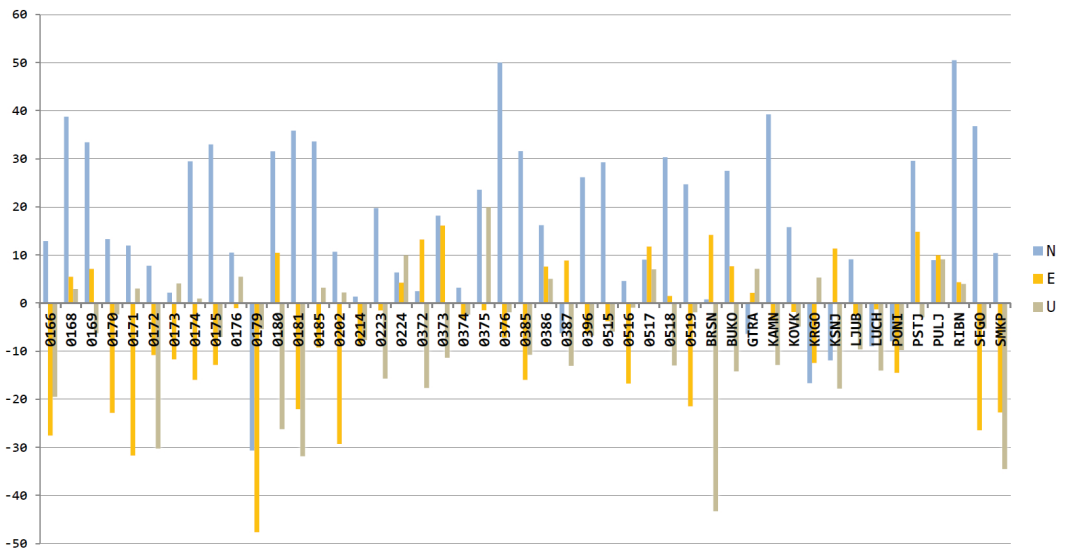
Preglednica 9: Parametri končne transformacije GNSS-točk iz D96-17 v D17 (Berk, 2019, str. 808).

T_x [mm]	T_y [mm]	T_z [mm]	D [ppb]	R_x [mas]	R_y [mas]	R_z [mas]	Epoha
-236,635	98,535	201,265	0,00	17,790	-3,673	24,3695	2016,75

Transformacija iz D17 v D96-17 – enačba (3) s parametri v preglednici 8 – je bila uporabljena za določitev novih, izboljšanih koordinat vseh točk EUREF-izmere 2016 v državnem referenčnem koordinatnem sistemu. Dobljene koordinate GNSS-točk so bile za stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL in vanj vključene postaje sosednjih omrežij tudi že objavljene v obvestilu Službe za GNSS (Obvestilo, 2019) in

v posodobljenih log-datotekah (SIGNAL, 2016). Koordinate vseh točk, vključenih v EUREF-izmero 2016 – datoteka SVN16_D96-17.CRD –, so na voljo na portalu Prostor (EUREF2016, 2020).

Izvedena je bila še primerjava starih (D96) in novih, izboljšanih (D96-17) koordinat tako za EUREF-točke kot tudi za stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL in vanj vključene postaje sosednjih omrežij (Berk, 2019, str. 820–833). Popravki koordinat za 47 EUREF-točk z obema nizoma koordinat (tj. D96-17 minus $D96_{EUREF}$) znašajo po višini (U) od $-43,3$ mm na Brusniku (BRSN) do $20,0$ mm na Gorjancih (0375) in za horizontalni koordinati (N , E) od $-47,7$ mm na Mangartu (0179) do $50,5$ mm v Ribnici (RIBN); med slovenskimi točkami je največji zabeležen popravek po višini $-34,5$ mm v Kopru, na pomolu (SMKP), glej sliko 9.

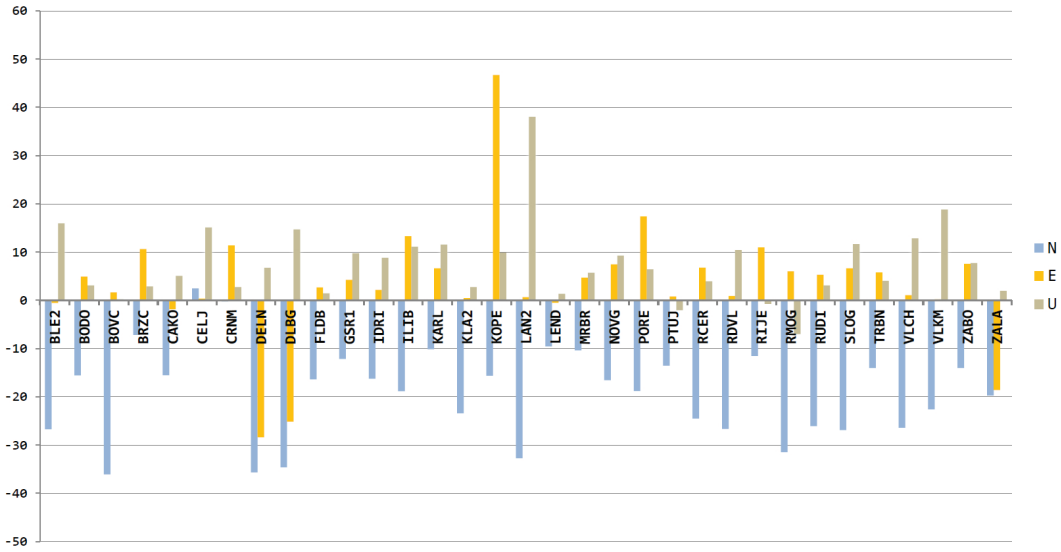


Slika 9: Popravki koordinat [mm] iz D96 v D96-17 na EUREF-točkah z obema nizoma koordinat.

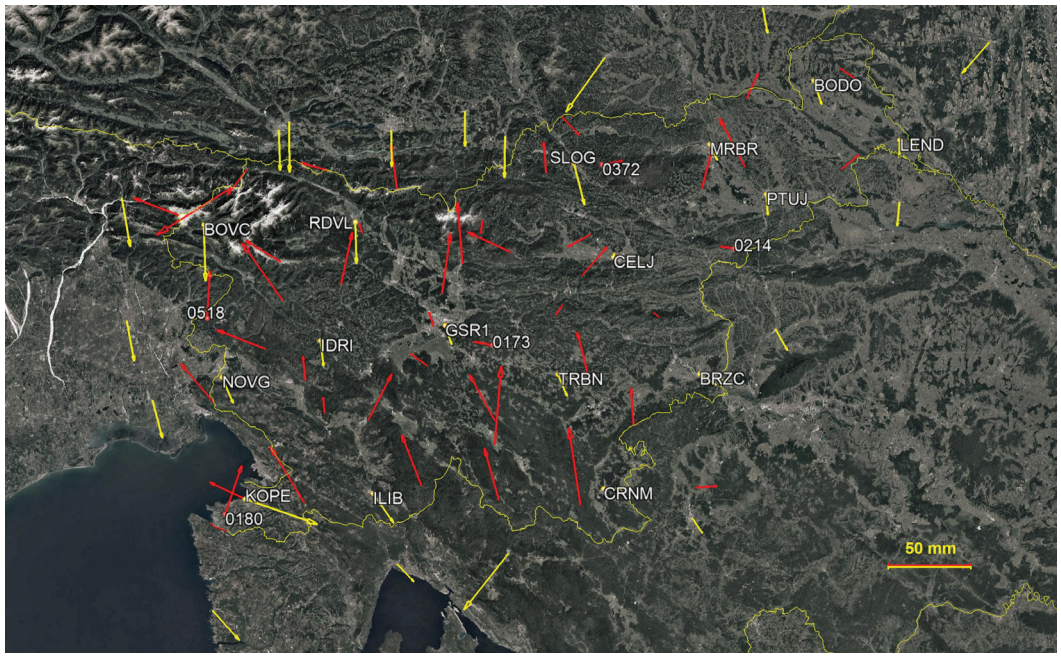
Popravki koordinat za 33 stalnih GNSS-postaj z obema nizoma koordinat (tj. D96-17 minus $D96_{SIGNAL}$) znašajo po višini (U) od $-7,0$ mm v Možnici (RMOG) do $38,1$ mm v Vajškri (LAN2) in za horizontalni koordinati (N , E) od $-36,1$ mm v Bovcu (BOVC) do $46,7$ mm v Kopru (KOPE), kjer je šlo v večjem delu za dejanski premik GNSS-antene; med slovenskimi postajami znašajo popravki po višini od $-2,0$ mm na Ptujju (PTUJ) do $15,1$ mm v Celju (CELJ); na stalni GNSS-postaji v Ljubljani (GSR1) znašajo popravki po višini $9,8$ mm in za horizontalni koordinati do $-12,2$ mm, glej sliko 10.

Popravki horizontalnih koordinat (N , E) ob uveljavitvi D96-17-koordinat na EUREF-točkah in stalnih GNSS-postajah omrežja SIGNAL in vanj vključenih postaj sosednjih omrežij (sliki 9 in 10) so v grafični obliki – z vektorji horizontalnih popravkov – prikazani na sliki 11. Najdaljši vektor horizontalnega popravka na EUREF-točkah meri $56,7$ mm na Mangartu (0179); povprečna dolžina horizontalnih vektorjev popravkov na EUREF-točkah je $25,1$ mm, središčna (mediana) pa $25,0$ mm. Najdaljši vektor horizontalnega popravka na stalnih GNSS-postajah meri $49,3$ mm v Kopru (KOPE); povprečna dolžina horizontalnih vektorjev popravkov na stalnih GNSS-postajah je $22,3$ mm, središčna pa $22,6$ mm. Povprečna dolžina horizontalnih vektorjev popravkov na postajah omrežja SIGNAL brez vanj vključenih

postaj sosednjih omrežij in brez koprške postaje, ki se je premaknila, je 16,9 mm, središčna pa 15,2 mm. Videti je, kakor da si vektorji z EUREF-točk in stalnih GNSS-postaj 'prihajajo naproti'; rezultat je uskladitev oziroma premostitev koordinatnih razlik med $D96_{EUREF}$ in $D96_{SIGNAL}$.



Slika 10: Popravki koordinat [mm] iz D96 v D96-17 na stalnih GNSS-postajah omrežja SIGNAL in vanj vključenih postajah sosednjih omrežij z obema nizoma koordinat.



Slika 11: Vektorji horizontalnih popravkov ob privzemu D96-17-koordinat na EUREF-točkah – rdeča barva – in stalnih GNSS-postajah – rumena barva (podloga: Google Earth, 2018).

RMS koordinat EUREF-točk in stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL in vanj vključenih postaj sosednjih omrežij iz neposredne primerjave izvornih ($D96_{\text{EUREF}}$ in $D96_{\text{SIGNAL}}$) ter izboljšanih koordinat ($D96-17$) – enačba (2) – znaša 17,2 mm (Berk, 2019, str. 821) in je lahko v pomoč pri oceni realno dosegljive kakovosti določanja koordinat z navezavo na državni horizontalni referenčni koordinatni sistem, kot je bil realiziran pred 1. januarjem 2020, torej pred začetkom uporabe novih, izboljšanih koordinat. Za najnatančnejša inženirska dela je sicer mogoče ohraniti višjo kakovost predhodno določenih koordinat z izvedbo naknadne transformacije v $D96-17$, ki odpravi sistematični del koordinatnih odstopanj. Za GNSS-mrežo z geodetskim datumom, vezanim na EUREF-točke, je treba izvesti togi (6-parametrični) transformaciji:

- iz $D96_{\text{EUREF}}$ v $D17$ s parametri iz preglednice 4 in nato še
- iz $D17$ v $D96-17$ s parametri iz preglednice 8.

Za GNSS-mrežo z geodetskim datumom, vezanim na stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL, je treba izvesti togi (6-parametrični) transformaciji:

- iz $D96_{\text{SIGNAL}}$ v $D17$ s parametri iz preglednice 6 in nato še
- iz $D17$ v $D96-17$ s parametri iz preglednice 8.

Dobljeni sistematični popravki koordinat znašajo v obeh primerih ($D96-17$ je ‘na pol poti’ med $D96_{\text{EUREF}}$ in $D96_{\text{SIGNAL}}$) največ do 10 mm po višini (U), za horizontalni koordinati pa do 24 mm (N) oziroma do 12 mm (E). Največji popravki N - in U -koordinat se pojavijo v najzahodnejšem delu države (Breginjski kot), največji popravki E -koordinat pa v najjužnejšem delu države (Obkolpje).

7 SKLEP

Izračun EUREF-izmere 2016 je prinesel novo realizacijo ETRS89 v Sloveniji (ETRS89/D17), ki je bila tudi verificirana s strani EUREF GB. Vendar pa so koordinatna odstopanja glede na prvotno realizacijo (ETRS89/D96) prevelika, da bi lahko novo realizacijo uveljavili brez ponovne transformacije vseh prostorskih podatkovnih zbirk v državi.

Pragmatična rešitev za nastalo težavo je bila uporaba optimalne toge (6-parametrične) transformacije iz $D17$ v $D96$. Nove koordinate z oznako ETRS89/D96-17 kar najbolj ohranjajo tako koordinate EUREF-točk kot tudi koordinate stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL, hkrati pa ohranjajo geometrijske odnose v obeh mrežah iz časa izvedbe GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016, torej dobrih 20 let po vzpostavitvi $D96$. Primerjava z neodvisno obdelavo časovnih vrst koordinat za stalne GNSS-postaje omrežja SIGNAL pokaže dobro ujemanje geometrije mreže; odstopanja koordinat po izvedeni optimalni togi (6-parametrični) transformaciji so večinoma reda velikosti 1–2 mm za horizontalne koordinate in 3–6 mm po višini (Sterle in Stopar, 2019).

Koordinate $D96-17$ bistveno izboljšajo skladnost mreže EUREF-točk, kombinirane geodetske mreže 0. reda in omrežja SIGNAL, kar zagotavlja višjo natančnost in točnost določanja koordinat v državnem referenčnem koordinatnem sistemu. Glede na predpisano natančnost (Pravilnik, 2007, 35. člen) uveljavitev novih koordinat ne bo vplivala na meritve v zemljiškem katastru; koordinate v vseh prostorskih podatkovnih zbirkah v državi ostanejo nespremenjene.

V okviru izračuna GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016 izvedene analize pa potrjujejo domnevo, da zaradi precej dejavne tektonike na ozemlju države statični geodetski datum ne more povsem ustrezati

potrebam sodobne geodezije, vsaj ne na dolgi rok. Zato bo v prihodnje za zagotavljanje ustrezne kakovosti državnega referenčnega koordinatnega sistema očitno treba izbirati med preostalimi tremi mogočimi scenariji (Stopar in sod., 2015):

- periodične nove realizacije ETRS89 na vsakih 10 do največ 20 let,
- prehod na poldinamičen geodetski datum oziroma
- prehod na dinamičen (4R) geodetski datum.

Skladno s strategijo EUREF za prihodnje realizacije ETRS89 (Bruyninx in sod., 2017) se za zdaj zdi optimalen prehod na koordinatni sistem s poldinamičnim geodetski datumom – po terminologiji IAG je to polkinematičen referenčni sestav (Poutanen in Häkli, 2018) –, ki pa zahteva homogeno in dovolj gosto vseevropsko polje vektorjev hitrosti (Medved in sod., 2018). To bo omogočilo dovolj kakovostno transformacijo koordinat poljubne točke v državi v poljubno izbrano epoho. Časovna sestavina bo tako slej ko prej postala obvezna sestavina določitve položaja – enakovredna koordinatam točke – in ne zgolj metapodatek.

Zahvala

Za koristne nasvete pri obdelavi GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016 se zahvaljujemo članom Upravnega odbora EUREF (EUREF GB), še posebej Carine Bruyninx, Rolfu Dachu in Ambrusu Kenyeresu. Za pomoč pri pridobivanju podatkov omrežja SIGNAL in kombinirane geodetske mreže 0. reda se zahvaljujemo Niku Fabianiju in Klemnu Ritlopu z Geodetskega inštituta Slovenije. Za posredovane podatke omrežja CROPOS se zahvaljujemo Marijanu Marjanoviču z Državne geodetske uprave (DGU) v Zagrebu, za posredovane podatke omrežja APOS pa Helmutu Titzu z Zveznega urada za meroslovje in geodezijo (BEV) na Dunaju. Del predstavljenih raziskav je v okviru raziskovalnega programa P2-0227 Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Literatura in viri:

- Altamimi, Z. (2003). Discussion on How to Express a Regional GPS Solution in the ITRF. Report on the Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Ponta Delgada, Portugalska, 5.–8. junij 2002. EUREF publication, št. 12. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, zv. 29, str. 162–167. Frankfurt na Majni: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie. <http://www.euref.eu/symposia/book2002/162-167.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.
- Altamimi, Z. (2018). Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. EUREF Technical Note 1, Version June 28, 2018. IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), 11 str. <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L. (2011). ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, 85 (8), 457–473. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>
- Altiner, Y., Perlt, J. (2018). Geodätischer Raumbezug von GNSS-Messungen – Der Beitrag des BKG zur Realisierung 2016. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 143 (2), 114–120. DOI: <https://doi.org/10.12902/zfz-0201-2018>
- Arszkiewicz, A., Völsken, C. (2017). The Impact of the Antenna Phase Center Models on the Coordinates in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*, 21 (2), 747–757. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0564-7>
- Argus, D. F., Gordon, R. G. (1991). No-Net-Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model NUVEL-1. *Geophysical Research Letters*, 18 (11), 2039–2042. DOI: <https://doi.org/10.1029/91GL01532>
- Berk, S. (2019). Obdelava GNSS-kampanje »EUREF Slovenija 2016«. Končno poročilo, 1106 str. + 12 prilog. Ljubljana (2. oktober 2019), Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Berk, S., Fabiani, N., Koler, B., Komadina, Ž., Kuhar, M., Medved, K., Oven, K., Pavlovič Prešeren, P., Režek, J., Ritlop, K., Sterle, O., Stopar, B., Triglav Čekada, M. (2019). National Report of Slovenia to the EUREF 2019 Symposium in Tallinn. Report on the Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Talin, Estonija, 21.–24. maj 2019, št. 29, 6 str. <http://www.euref.eu/symposia/2019Tallinn/05-24-p-Slovenia.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.
- Berk, S., Komadina, Ž., Marjanovič, M., Radovan, D., Stopar, B. (2003). Kombinirani izračun EUREF GPS-kampanj na območju Slovenije. *Geodetski vestnik*, 47 (4),

414–422. http://www.geodetski-vestnik.com/47/4/gv47-4_414-422.pdf, pridobljeno 27. 11. 2019.

Berk, S., Komadina, Ž., Marjanovič, M., Radovan, D., Stopar, B. (2004). The Recomputation of the EUREF GPS Campaigns in Slovenia. Report on the Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Toledo, Španija, 4.–7. junij 2003. EUREF publication, št. 13. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, zv. 33, str. 132–149. Frankfurt na Majni: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie. <http://www.euref.eu/symposia/book2003/4-02-Berk.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.

Berk, S., Sterle, O., Medved, K., Komadina, Ž., Stopar, B. (2018). Computation of the EUREF Slovenia 2016 GNSS Campaign. Report on the Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Amsterdam, Nizozemska, 30. maj–1. junij 2018, št. 28, 27 str. + 7 prilog. <http://www.euref.eu/symposia/2018Amsterdam/01-03-p-Berk.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.

Boehm, J., Werl, B., Schuh, H. (2006). Troposphere Mapping Functions for GPS and Very Long Baseline Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Operational Analysis Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111 (B2), 406, 9 str. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>

Bos, M. S., Scherneck, H.-G. (2018). Free Ocean Tide Loading Provider. Onsala Space Observatory / Onsala rymdobservatorium. <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>, pridobljeno 11. 1. 2018.

Bruyninx, C., Altamimi, Z., Brockmann, E., Caporali, A., Dach, R., Dousa, J., Fernandes, R., Gianniu, M., Habrich, H., Ihde, J., Jivall, L., Kenyeres, A., Lidberg, M., Pacione, R., Poutanen, M., Szafranek, K., Söhne, W., Stangl, G., Torres, J., Völksen, C. (2017). Implementation of the ETRS89 in Europe: Current Status and Challenges. Proceedings of the Symposium on Reference Frames for Applications in Geosciences (REFAG 2014, Kirchberg, Luksemburg). International Association of Geodesy Symposia, 146, 135–145. DOI: https://doi.org/10.1007/1345_2015_130

Bruyninx, C., Altamimi, Z., Caporali, A., Kenyeres, A., Lidberg, M., Stangl, G., Torres, J. A. (2013). Guidelines for EUREF Densifications. Version 5. IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), 9 str.

Bruyninx, C., Habrich, H., Söhne, W., Kenyeres, A., Stangl, G., Völksen, C. (2012). Enhancement of the EUREF Permanent Network Services and Products. Proceedings of the 2009 IAG Symposium “Geodesy for Planet Earth” (2009, Buenos Aires, Argentina). International Association of Geodesy Symposia, 136, 27–34. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_4

BSWUSER52 (2017). Bernese Software 5.2 Users Server, <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER52/>, pridobljeno 22. 9. 2017.

Caporali, A., Lidberg, M., Stangl, G. (2011). Lifetime of ETRS89 Coordinates. Report on the Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Kišinjev, Moldavija, 25.–28. maj 2011, št. 21, 4 str. <http://www.euref.eu/symposia/2011Chisinau/01-03-p-Caporali.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.

CDDIS (2016). Crustal Dynamics Data Information System. National Aeronautics and Space Administration (IGS RINEX Data). <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/daily/2016/>, pridobljeno 5. 12. 2016.

Dach, R., Fridez, P. (2017). Bernese GNSS Software, Version 5.2. Tutorial, 166 str. Bern: Astronomical Institute, University of Bern.

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software, Version 5.2. User manual, 852 str. Bern: Astronomical Institute, University of Bern.

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S. (1994). Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions. *Geophysical Research Letters*, 21 (20), 2191–2194. DOI: <https://doi.org/10.1029/94GL02118>

EPN (2016–2018). EUREF Permanent GNSS Network. <http://www.epncb.oma.be>, pridobljeno 5. 12. 2016–5. 2. 2018.

EPN RINEX (2016). EUREF Permanent GNSS Network (EPN RINEX Data). <ftp://ftp.epncb.oma.be/pub/obs/2016/>, pridobljeno 23. 12. 2016.

ETRF/ITRF (2017). EUREF Permanent GNSS Network (ETRF/ITRF Transformation), http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/, pridobljeno 5. 2. 2018.

EUREF2016 (2020). Koordinate ključnih GNSS-točk. Portal Prostor. Geodetska uprava Republike Slovenije, <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/drzavni-prostorski-koordinatni-sistem/zbirka-podatkov-drzavnih-geodetskih-tock/#tab3-1643>, pridobljeno 13. 3. 2020.

EUREF Resolutions (2003). EUREF 2003 Resolutions. 13th Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Toledo, Španija, 4.–7. junij 2003. http://www.euref.eu/html/resolutions_toledo2003.pdf, pridobljeno 27. 11. 2019.

EUREF Resolutions (2018). EUREF 2018 Resolutions. 28th Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), Amsterdam, Nizozemska, 30. maj–1. junij 2018. <http://www.euref.eu/symposia/2018Amsterdam/06-01-Resolutions-EUREF2018.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.

Google Earth (2018). Google Earth Pro, različica 7.3.1.4507. DigitalGlobe 2012, <https://www.google.com/earth/>, pridobljeno 9. 4. 2018.

Häkli, P., Lidberg, M., Jivall, L., Norbeck, T., Tangen, O., Weber, M., Pihlak, P., Aleksejenko, I., Paršeliunas, E. (2016). The NKG2008 GPS Campaign – Final Transformation Results and a New Common Nordic Reference Frame. *Journal of Geodetic Science*, 6 (1), 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1515/jogs-2016-0001>

IgB08 (2017). Class A EPN Station Positions and Velocities (IgB08), ftp://epncb.oma.be/epncb/station/coord/EPN/EPN_A_IgB08.SSC, pridobljeno 26. 4. 2017.

IGS (2016). International GNSS Service. <http://www.igs.org/network>, pridobljeno 5. 12. 2016.

IGS Orbits (2017). International GNSS Service (Final Orbits/Clocks and Earth Rotation Parameters). <ftp://www.igs.org/pub/product/>, pridobljeno 18. 9. 2017.

ION Model (2018). Astronomical Institute, University of Bern (Global Ionosphere Model). <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2016/>, pridobljeno 22. 1. 2018.

ITRF2008 Transformations (2018). Transformation parameters from ITRF2008 to past ITRFs, http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt, pridobljeno 14. 2. 2018.

JPL Ephemerides (2017). Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration (JPL Ephemerides). <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ascii/de405/>, pridobljeno 26. 9. 2017.

Kontrolna GNSS-mreža (2020). Mreža kontrolnih GNSS-točk. Portal Prostor. Geodetska uprava Republike Slovenije, <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih>

- podatkov/državni-prostorski-koordinatni-sistem/zbirka-podatkov-drzavnih-geodetskih-tock/#tab4-1643, pridobljeno 31. 1. 2020.
- Kouba, J. (2009). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products. Version 2.1, 34 str. International GNSS Service. <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf>, pridobljeno 16. 12. 2019.
- Medved, K. (2016). GNSS-kampanja »EUREF Slovenija 2016«. *Geodetski vestnik*, 60 (4), 752–758. http://www.geodetski-vestnik.com/60/4/gv60-4_medved.pdf, pridobljeno 27. 11. 2019.
- Medved, K., Berk, S., Sterle, O., Stopar, B. (2018). Izzivi in dejavnosti v zvezi z državnim horizontalnim koordinatnim sistemom Slovenije. *Geodetski vestnik*, 62 (4), 567–586. DOI: <http://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.04.567-586>
- Mesner, N., Berk, S., Mahnič, G., Radovan, D. (2007). Izračun Mini EUREF GPS-kampanje 2007. Tehnično poročilo, 15 str. + priloge. Ljubljana (13. december 2007), Geodetski inštitut Slovenije.
- NASA (2016). National Aeronautics and Space Administration. <https://cdsis.nasa.gov/index.html>, pridobljeno 5. 12. 2016.
- Noll, C. E. (2010). The Crustal Dynamics Data Information System: A Resource to Support Scientific Analysis Using Space Geodesy. *Advances in Space Research*, 45 (12), 1421–1440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Obvestilo (2007). Izračun koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL – uskladitev s slovenskim geodetskim datumom D96. Služba za GPS, Geodetski inštitut Slovenije. http://www.gu-signal.si/sites/default/files/Obvestilo_MiniEUREF07_21_12_2007.pdf, pridobljeno 16. 12. 2019.
- Obvestilo (2011). Izračun koordinat stalnih postaj sosednjih omrežij, vključenih v omrežje SIGNAL – uskladitev s slovenskim geodetskim datumom D96. Služba za GPS, Geodetski inštitut Slovenije. http://www.gu-signal.si/sites/default/files/Porocilo_izracunSosednjihPP_26_01_2011.pdf, pridobljeno 16. 12. 2019.
- Obvestilo (2019). Nove koordinate stalnih postaj omrežja SIGNAL na osnovi GNSS-izmere »EUREF Slovenija 2016« (koordinate ETRS89/D96-17). Služba za GNSS, Geodetski inštitut Slovenije in Geodetska uprava Republike Slovenije. http://www.gu-signal.si/sites/default/files/Obvestilo_12_12_2019-EUREF_SVN_2016.pdf, pridobljeno 16. 12. 2019.
- OLG (2016). Lustbühel Observatory / Observatorium Lustbühel Graz (RINEX Data). <ftp://olggps.oeaw.ac.at/pub/2016/>, pridobljeno 23. 12. 2016.
- Petit, G., Luzum, B. (2010). IERS Conventions. IERS Technical Note No. 36, 179 str. Frankfurt na Majni: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, <https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf>, pridobljeno 27. 11. 2019.
- Placer, L. (2008). Principles of the Tectonic Subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51 (2), 205–217. DOI: <http://doi.org/10.5474/geologija.2008.021>
- Poutanen, M., Häkli, P. (2018). Future of National Reference Frames – from Static to Kinematic? *Geodesy and Cartography*, 67 (1), 117–129. DOI: <https://doi.org/10.24425/118697>
- Pravilnik (2007). Pravilnik o urejanju mej ter spreminjanju in evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru. Uradni list RS, št. 8/07, 26/07, 48/18 in 51/18 – popr. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV7341>, pridobljeno 12. 12. 2019.
- Rebischung, P., Griffiths, J., Ray, J., Schmid, R., Collilieux, X., Garayt, B. (2012). IGS08: The IGS Realization of ITRF2008. *GPS Solutions*, 16 (4), 483–494. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0248-2>
- Rete GNSS FVG (2016). Rete GNSS. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. <https://www.regione.fvg.it/rafvig/cms/RAFVG/ambiente-territorio/conoscere-ambiente-territorio/FOGLIA1/>, pridobljeno 1. 12. 2016.
- Schmid, R., Dach, R., Collilieux, X., Jäggi, A., Schmitz, M., Dillsner, F. (2016). Absolute IGS Antenna Phase Center Model IGS08.atx: Status and Potential Improvements. *Journal of Geodesy*, 90 (4), 343–364. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0876-3>
- SIGNAL (2016). Omrežje SIGNAL, Geodetska uprava Republike Slovenije. <http://www.gu-signal.si>, pridobljeno 28. 11. 2016.
- Standish, E. M. (1998). JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405. Interoffice Memorandum, 312.F-98-048. Pasadena: JET Propulsion Laboratory.
- Sterle, O. (2015). Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija, št. 27/GO, 194 str. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Sterle, O., Stopar, B. (2007). Izračun Mini EUREF GPS-kampanje 2007. Tehnično poročilo, 13 str. Ljubljana (10. december 2007): Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Sterle, O., Stopar, B. (2019). Analitični del delovanja GNSS-omrežij. Končno poročilo, 24 str. + priloge. Ljubljana (november 2019), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Ambrožič, T., Pavlovič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Kregar, K., Štebe, G., Urbanič, T., Goršič, J., Mencin, A., Berk, S., Fabiani, N., Mesner, N., Caserman, M., Bric, V., Triglav Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2016). Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem. Končno poročilo, 3 zv., 216, 152 in 538 str. + priloge. Ljubljana (15. september 2016), Geodetski inštitut Slovenije in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Stopar, B., Režek, J., Komadina, Ž., Medved, K., Berk, S., Bajec, K., Oven, K., Koler, B., Urbanič, T., Kuhar, M., Pavlovič Prešeren, P., Sterle, O. (2015). Aktivnosti pri vzpostavitvi sodobnega geodetskega referenčnega sistema v Sloveniji. *Geodetska (r)evolucija*. 43. Geodetski dan, Sežana, 9.–10. april 2015. Zbornik posveta, str. 37–56. Ljubljana: Zveza geodetov Slovenije, in Nova Gorica: Primorsko geodetsko društvo.
- VMF1 Model (2018). Vienna University of Technology / Technische Universität Wien (VMF1 Troposphere Model). <http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/>, pridobljeno 1. 2. 2018.
- Vrabec, M., Pavlovič Prešeren, P., Stopar, B. (2006). GPS Study (1996–2002) of Active Deformation along the Periadriatic Fault System in Northeastern Slovenia: Tectonic Model. *Geologica Carpathica*, 57 (1), 57–65. <http://www.geologicacarpathica.com/browse-journal/volumes/57-1/article-344/>, pridobljeno 26. 4. 2017.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovič Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B. (2010). GPS-Derived Motion of the Adriatic Microplate from Istria Peninsula and Po Plain Sites and Geodynamic Implications. *Tectonophysics*, 483 (3–4), 214–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.001>
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G., Schumann, C. (2006). Absolute GNSS

Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern. Proceedings of the IGS Workshop "The International GNSS Service (IGS): Perspectives and Visions for 2010 and beyond", Darmstadt, Nemčija, 8.–12. maj 2006, 12 str. http://www.geopp.de/media/docs/pdf/gppigs06_pabs_g.pdf, pridobljeno 27. 11. 2019.

Zupančič, M. (2016). Poročilo projekta EUREF SLO 2016. Interno poročilo, 8 str. Ljubljana (november 2016), Geodetska uprava Republike Slovenije.



Berk S., Sterle O., Medved K., Stopar B. (2020). ETRS89/D96-17 – rezultat GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016. Geodetski vestnik, 64 (1), 43–67.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.43-67>

Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.

Geodetska uprava Republike Slovenije, Urad za geodezijo
Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: sandi.berk@gov.si

doc. dr. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: oskar.sterle@fgg.uni-lj.si

mag. Klemen Medved, univ. dipl. inž. geod.

Geodetska uprava Republike Slovenije, Urad za geodezijo
Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: klemen.medved@gov.si

prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si