

# Preračun EUREF GPS-kampanj na območju Slovenije

Sandi Berk\*, Žarko Komadina\*\*, Marijan Marjanović\*\*\*, Dalibor Radovan\*\*\*\*, Bojan Stopar\*\*\*\*\*

## Povzetek

Geodetska uprava Republike Slovenije se je v začetku leta 2001 odločila za ponovni preračun vseh treh EUREF<sup>1</sup> GPS-kampanj, ki so bile izvedene na območju Slovenije. Prva kampanja sega v leto 1994 (Slovenija in Hrvaška '94), druga v leto 1995 (Slovenija '95) in tretja v leto 1996 (Hrvaška '96). Prvi izračuni kampanj so bili objavljeni (za vsako kampanjo posebej) v letih 1995–1997. Primerjava (v ETRS '89) je dala na nekaterih točkah koordinatna odstopanja do 5 cm. Za koordinate identičnih točk, ki so bile določene v različnih kampanjah, je bilo pričakovati ujemanje vsaj znotraj 1–2 cm. Nepričakovano velika odstopanja so bila osnovni razlog za ponovni preračun.

Izvedbo projekta je prevzel Geodetski inštitut Slovenije, in sicer v sodelovanju s Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter ob pomoči svetovalca z Državne geodetske uprave Republike Hrvaške. Strokovno podporo je nudil tudi Zvezni urad za kartografijo in geodezijo (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie – BKG) iz Frankfurta na Majni, Nemčija.

Rezultat preračuna so nove, bolj kakovostne koordinate vseh točk, določenih v EUREF GPS-kampanjah na območju Slovenije, kar je pomemben korak pri postopnem prehodu na novi državni koordinatni sistem.

## Uvod

Za povezavo slovenskega koordinatnega sistema s skupnim evropskim koordinatnim sistemom (ETRS '89) so bile izvedene tri EUREF GPS-kampanje, ki so vključevale tudi točke na območju Slovenije. Prva kampanja, »Slovenija in Hrvaška '94« (Altiner idr., 1995), je bila izvedena leta 1994 in je trajala štiri dni (30. 5. – 3. 6.). V kampanjo je bilo vključenih osem točk slovenske triangulacijske mreže I. reda, med katerimi jih je pet (Korada, Kucelj, Lendavske gorice, Malija in Velika Kopa), ki so dobile tudi status uradnih EUREF-točk. Za navezavo so bile uporabljene tri referenčne IGS-točke<sup>2</sup> (Gradec, Matera in Wettzell). Izračun koordinat je bil izveden v ITRF '92, trenutek 1994,41, nato pa so bile koordinate transformirane v ETRS '89. Koordinate točk iz tega preračuna so bile sprejete kot uradne na EUREF-simpoziju v Helsinkih, maja 1995.

Druga kampanja, »Slovenija '95« (Altiner idr., 1997a), je bila namenjena zgostitvi točk iz prve kampanje. Izvedena je bila leta 1995 in je trajala sedem dni (25. 9. – 2. 10.). Na območju Slovenije je bilo v kampanjo vključenih osemindeset točk. V kampanjo je bilo vključenih tudi vseh osem točk iz prve kampanje. Kljub temu, da je bila kampanja prvotno zasnovana kot zgostitvena, je bil izračun nato izveden z vklopom na štiri referenčne IGS-točke (Gradec, Matera, Wettzell in Zimmerwald). Izračun koordinat je bil izveden v ITRF '93, trenutek 1995,74, nato pa so bile koordinate transformirane v ETRS '89. Rezultati te kampanje nikoli niso bili predloženi v potrditev na EUREF, čeprav so bile v Sloveniji odtlej v rabi koordinate, dobljene iz te kampanje (Tavčar, 1997) in ne uradne koordinate iz prve kampanje.

\* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

\*\* Geodetska uprava Republike Slovenije, Zemljemerska ulica 12, 1000 Ljubljana

\*\*\* mag., Državna geodetska uprava Republike Hrvatske, Gruška ulica 20, 10000 Zagreb

\*\*\*\* viš. pred. mag., Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

\*\*\*\*\* izr. prof. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

<sup>1</sup> European Reference Frame – evropski referenčni sestav; EUREF je hkrati tudi zaščiteno ime Evropske podkomisije komisije X (ki pokriva področje globalnih in regionalnih geodetskih mrež) pri Mednarodnem združenju za geodezijo.

<sup>2</sup> Permanentne GPS-postaje, ki delujejo v okviru Mednarodne GPS-službe za geodinamiko.

Tretja kampanja, »Hrvaška '96« (Altiner idr., 1997b), je bila namenjena zgostitvi točk iz prve kampanje na območju Hrvaške, vanjo pa je bilo vključenih šest točk na območju Slovenije. Kampanja je bila izvedena leta 1996 in je trajala štirinajst dni (29. 8. – 12. 9.). Med slovenskimi točkami sta bili dve vključeni že v prvo kampanjo (Blegoš in Gorjanci), tri pa tako v prvo kot tudi v drugo kampanjo (Kucelj, Lendavske gorice in Malija). Za navezavo so bile uporabljene tri referenčne IGS-točke (Gradec, Matera in Zimmerwald). Izračun koordinat je bil izveden v ITRF '94, trenutek 1996,68, nato pa so bile koordinate transformirane v ETRS '89.

Zaradi prevelikih odstopanj med koordinatami identičnih točk določenih v omenjenih treh kampanjah je bil izveden ponovni preračun (Altiner idr., 1999), ki pa se je izkazal za neustreznega, o čemer je EUREF TWG<sup>3</sup> razpravljala na sestanku v Tromsøju, junija 2000. Problem je bil v tem, da so se za točke, ki so bile vključene v samo eno izmed kampanj, končni rezultati nanašali na srednji trenutek opazovanj le na teh točkah, ne pa na srednji trenutek opazovanj na vseh točkah, vključenih v preračun.

Začetek aktivnosti v zvezi s ponovnim preračunom sega v leto 2001. Razlogi za ponovni preračun so bili predstavljeni na EUREF-simpoziju v Dubrovniku, maja 2001 (Stopar idr., 2002). Na istem simpoziju je Hrvaška že predstavila ponovni preračun kampanj za svoje območje (Marjanović in Bačić, 2002), ki je bil tudi potrjen s strani EUREF.

### Potek preračuna

Zaradi zahtev glede kakovosti preračunov EUREF GPS-kampanj in predvsem enotnih standardov in strategij je bila prva faza preračuna opravljena na Zveznem uradu za kartografijo in geodezijo (bivši Inštitut za uporabno geodezijo – IfAG) v Frankfurtu na Majni. Delovni obisk v Frankfurtu je trajal tri tedne (20. 10. 2002 – 9. 11. 2002). Nadaljnja obdelava je nato potekala na Geodetskem inštitutu Slovenije. Vzporedno s samim preračunom so bili v začetku leta 2003 vzpostavljeni stiki z EUREF in njegovo TWG. Marca 2003 so bili s strani izvajalcev predstavljeni predhodni rezultati preračuna na sestanku EUREF TWG v Parizu. Soglasno je bilo sprejeto, da EUREF TWG:

- potrjuje ustreznost strategije preračuna EUREF GPS-kampanj,
- sprejema predstavljene predloge za dokončanje preračuna, ki so bili:
  - izločitev opazovanj na točki Lendavske gorice iz kampanj '94 in '96,
  - ponovni preračun kampanj '94 in '96 (brez Lendavskih goric) in
  - ponovni kombinirani izračun, ter
- privoli, da se EUREF-točka Lendavske gorice nadomesti z novo EUREF-točko Donačka gora.

Ob upoštevanju priporočil s sestanka v Parizu je bil preračun zaključen maja 2003. Junija 2003 so bili na 13. EUREF-simpoziju v Toledu predstavljeni končni rezultati preračuna in bili tudi potrjeni s strani EUREF. Po resoluciji št. 1 je uradno ime novega kombiniranega izračuna »EUREF-SLOVENIA-94/95/96«; gre za izboljšanje koordinat točk, zato je bila priporočena zamenjava uradnih koordinat v zbirki EUREF-točk z novimi. Resolucija je tudi omogočila nadomestitev EUREF-točke Lendavske gorice z novo EUREF-točko Donačka gora. Oboje je bilo na zahtevo Geodetske uprave Republike Slovenije tudi storjeno. Projekt ponovnega preračuna je bil tudi formalno zaključen avgusta 2003 (Berk idr., 2003), podrobnejši rezultati preračuna pa bodo objavljeni tudi v zborniku EUREF-simpozija v Toledu.

---

<sup>3</sup> Technical Working Group – Tehnična delovna skupina, ki deluje v okviru EUREF.

## Točke, vključene v preračun

V preračun treh EUREF GPS-kampanj, ki so bile izvedene na območju Slovenije, je bilo skupaj vključenih devetinštirideset točk (vključno s točko Gorjanci, ki leži na slovensko-hrvaški meji); petintrideset izmed njih je točk slovenske triangulacijske mreže I. reda, preostale pa so točke II. reda in geodinamične točke (glej Sliko 1).



Slika 1: Točke na območju Slovenije, vključene v preračun.

Za umestitev mreže so bile uporabljene štiri referenčne IGS-točke. Šest dodatnih novih točk na območju sosednjih držav, ki so ali uradne EUREF-točke ali pa IGS-točke, pa je bilo uporabljenih za izboljšanje geometrije mreže in hkrati kot kontrolne točke (glej Sliko 2). Število referenčnih, kontrolnih, uradnih EUREF-točk in ostalih točk, vključenih v preračun posameznih kampanj, je razvidno iz Preglednice 1.

Kampanja	Sl & Hr '94	Slovenija '95	Hrvaška '96
<b>Referenčne IGS-točke</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
Kontrolne IGS-točke	0	2	2
Kontrolne EUREF-točke	4	3	4
<b>Slovenske EUREF-točke</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>
Slovenske točke triangulacije I. in II. reda	3	31	2
Slovenske geodinamične točke	0	12	1
<b>Skupno število točk</b>	<b>14</b>	<b>57</b>	<b>16</b>

Preglednica 1: Število točk, vključenih v preračun posameznih kampanj.



Slika 2: IGS-točke in uradne EUREF-točke, vključene v preračun.

### Oblika mreže

Skupaj je bilo v vseh treh kampanjah izvedenih petindvajset dnevni serij opazovanj; štiri v prvi kampanji, sedem v drugi kampanji in štirinajst v tretji kampanji. Prva kampanja je bila izvedena brez selitev sprejemnikov; za vse štiri dnevne serije opazovanj je izbor vektorjev identičen. V drugi kampanji je bila četrti dan kampanje izvedena selitev večine sprejemnikov (iz zahodnega na vzhodni del države), posledica tega pa so trije različni izbori vektorjev oziroma tri različne oblike mreže. V tretji kampanji je bilo selitev sprejemnikov več, tako da je bilo potrebnih kar osem različnih izborov vektorjev oziroma osem faz opazovanj. Skupaj so bile vse tri kampanje razdeljene na dvanajst različnih faz.

V posameznih fazah opazovanj je bilo od osem do štiriinšestdeset vektorjev, v posameznih kampanjah pa je bilo različnih vektorjev od trinajst do štiriinšestdeset. Vseh različnih vektorjev je bilo osemdeset. Vektorji so bili opazovani od dveh (Kucelj–Gorjanci), pa do enaindvajsetih dni (Hafelekar–Padova, Hafelekar–Wetzell, Malija–Padova, Padova–Matera). Dolžina najkrajšega vektorja je znašala 7,8 km (Sveta Ana–Ribnica), najdaljšega pa 658,3 km (Padova–Matera). Srednje dolžine vektorjev so bile v posameznih fazah od 21,3 km do 176,9 km, v posameznih kampanjah pa od 23,9 km do 138,5 km. Srednja dolžina vektorjev v vseh treh kampanjah je bila 67,3 km, kolikor je znašala tudi srednja dolžina vektorjev samo iz prve kampanje. Število različnih vektorjev in srednje dolžine vektorjev po fazah opazovanj, po posameznih kampanjah ter v kombiniranem izračunu je razvidno iz Preglednice 2.

<b>Kampanja</b>	<b>SH'94</b>	<b>Slovenija '95</b>				<b>Hrvaška '96</b>							
<b>Faza</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
Št. različnih vektorjev	13	33	11	34	12	8	13	11	12	8	12	13	
	13	64			19								
	80												
Srednja dol. vektorja [km]	67,3	21,3	98,8	23,7	129,0	176,9	119,4	138,5	135,7	176,9	126,1	132,8	
	67,3	23,9			138,5								
	67,3												

Preglednica 2: Število različnih vektorjev in srednje dolžine vektorjev v preračunu posameznih kampanj.

## **Izvedba meritev in obdelava podatkov**

### *Merilni instrumenti*

Uporabljenih je bilo šest različnih tipov GPS-sprejemnikov. Med njimi sta bila najbolj pogosta TRIMBLE 4000SSE in TRIMBLE 4000SSI. Le na nekaterih IGS-točkah so bili uporabljeni sprejemniki ROGUE SNR-8, ROGUE SNR-8C, ROGUE SNR-8000 ali ROGUE SNR-8100.

Uporabljeni so bili štiri različni tipi GPS-anten. Najbolj pogosta sta bila tipa 4000ST L1/L2 GEOD (TRM14532.00) in TR GEOD L1/L2 GP (TRM22020.00+GP). Na nekaterih IGS-točkah so bile nameščene antene DORNE MARGOLIN B (AOAD/M\_B) ali pa DORNE MARGOLIN T (AOAD/M\_T).

### *Strojna in programska oprema*

Vsa obdelava podatkov je bila izvedena na prenosnem računalniku HP Omnibook XE 4500, Intel Pentium 4M, 1,7 GHz, 256 MB RAM. Nameščen je bil operacijski sistem WINDOWS 2000 PROFESSIONAL. Za preračun je bil uporabljen programski paket BERNESE, in sicer različica 4.2 (z dne 16. 11. 2001). Za transformacijo tirnic satelitov in parametrov rotacije Zemlje je bil uporabljen program TRNFSP3N, ki ga je razvil Jan Kouba.

### *Vhodni podatki za preračun*

Uporabljena so bila opazovanja 24-urnih serij s 15-sekundnim intervalom registracije opazovanj na vseh novih točkah ter sočasna opazovanja s 30-sekundnim intervalom registracije opazovanj na IGS-točkah (permanentna opazovanja). Zajem je bil omejen na satelite, ki so bili vsaj 15 ločnih stopinj nad obzorjem. Skupaj je bilo v vseh treh kampanjah okoli 8,8 milijona opazovanj, od tega 1,2 milijona (14 %) v prvi kampanji, 5,1 milijona (58 %) v drugi kampanji in 2,5 milijona (28 %) v tretji kampanji.

Za vklop mreže je bil uporabljen uradni niz koordinat referenčnih točk in ustreznih komponent hitrosti, in sicer v ITRF '96, trenutek 1997,0. Za približne koordinate novih točk so bili uporabljeni rezultati prejšnjih obdelav kampanj.

Podatki o višinah anten so bili za IGS-točke vzeti iz log-datotek, dostopnih preko spletnih strani IGS. Vse ostale višine anten so bile prevzete iz terenskih zapisnikov, pri čemer je bila ponovno preverjena pravilnost njihovih izračunov. Uporabljene so bile korekcije faznih centrov, ki so določeni za posamezne tipe anten.

Uporabljene so bile natančne IGS-tirnice satelitov in parametri rotacije Zemlje, in sicer v ITRF '92 za prvo kampanjo, ITRF '93 za drugo kampanjo in ITRF '94 za tretjo kampanjo. Za izločanje opazovanj na odsekih slabo določenih tirnic satelitov so bili uporabljeni tudi podatki s tako imenovanih sat-crx-datotek, ki se nanašajo na kakovost določitve tirnic satelitov.

### *Faze in strategija preračuna*

Preračun EUREF GPS-kampanj je obsegal tri ključne korake. Najobsežnejši je bil ponovni preračun vseh treh kampanj, in sicer v enotnem referenčnem sestavu ITRF '96. Sledil mu je kombinirani izračun vseh treh kampanj v ITRF '96; rezultati se nanašajo na srednji trenutek opazovanj iz vseh treh kampanj, ki je 1995,55. Zadnji korak je bila transformacija koordinat iz ITRF '96 v ETRS '89.

Najprej so bile natančne IGS-tirnice satelitov in parametri rotacije Zemlje iz originalnih referenčnih sestavov (ITRF '92, ITRF '93 in ITRF '94) transformirane v ITRF '96. Koordinate referenčnih IGS-točk so bile iz ITRF '96, trenutek 1997,0, transformirane v srednje trenutke opazovanj iz posameznih kampanj, z upoštevanjem ustreznih komponent hitrosti teh točk, in sicer po obrazcu

$$\mathbf{X}_{\text{ITRF96}}(t) = \mathbf{X}_{\text{ITRF96}}(1997,0) + \mathbf{V}_{\text{ITRF96}} \cdot (t - 1997,0),$$

kjer so:

$\mathbf{X}_{\text{ITRF96}}(1997,0)$  ... koordinate točke v ITRF '96, trenutek 1997,0,

$\mathbf{X}_{\text{ITRF96}}(t)$  ... koordinate točke v ITRF '96, trenutek  $t$ , in

$\mathbf{V}_{\text{ITRF96}}$  ... komponente hitrosti točke v ITRF '96.

Uporabljen je bil Saastamoinenov model troposfere z dvournim intervalom določitve parametrov za posamezno točko. Za opazovanja so bile vzete uteži v odvisnosti od višinskega kota satelita (COSZ-model). Izbor vektorjev oziroma enojnih razlik (single-differences) je bil izveden po načelu najkrajše možne povezave vseh točk brez zapiranja zank. Izjemoma tak pristop ni bil upoštevan:

- zaradi povečanja števila opazovanj,
- zaradi zmanjšanja števila različnih vektorjev ali pa
- z empiričnimi poskusi zmanjšanja RMS-vrednosti z drugačnimi kombinacijami vektorjev.

Obdelava dvojnih razlik (double-differences) je temeljila na ionosfere prosti linearni kombinaciji L3. Za določitev števila celih valov L5 je bil uporabljen model ionosfere. Za določitev števila celih valov L1 in L2 je bila za kratke vektorje (do 150 km) uporabljena tako imenovana sigma strategija, za ostale vektorje pa kvazi ionosfere prosta strategija.

Prosti dnevni izračuni so bili izvedeni z uporabo strogega korelacijskega modela. Končni izračuni posameznih kampanj so bili izvedeni s kombiniranjem normalnih enačb prostih dnevnih izračunov, končni izračun vseh treh kampanj pa s kombiniranjem normalnih enačb prostih izračunov posameznih kampanj. Za kombinirani izračun vseh treh kampanj so bile na IGS-točkah upoštewane empirično določene komponente hitrosti (na podlagi neprekinjenih večletnih opazovanj), za vse nove točke pa je bil uporabljen a priori model NUVEL1A-NNR, z upoštevanjem evrazijske tektonske plošče.

Na koncu so bile koordinate novih točk iz ITRF '96, trenutek 1995,55, transformirane v ETRS '89, in sicer po obrazcu

$$\mathbf{X}_{\text{ETRS89}}(t) = \mathbf{X}_{\text{ITRF96}}(t) + \mathbf{T}_{\text{ITRF96}} + \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{R}_3_{\text{ITRF96}} & \mathbf{R}_2_{\text{ITRF96}} \\ \mathbf{R}_3_{\text{ITRF96}} & 0 & -\mathbf{R}_1_{\text{ITRF96}} \\ -\mathbf{R}_2_{\text{ITRF96}} & \mathbf{R}_1_{\text{ITRF96}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_{\text{ITRF96}}(t) \cdot (t - 1989,0),$$

kjer so:

- $X_{ETRS89}(t)$  ... koordinate točke v ETRS '89,
- $X_{ITRF96}(t)$  ... koordinate točke v ITRF '96, trenutek  $t$ ,
- $T_{ITRF96}$  ... komponente premika in
- $R_{ITRF96}$  ... komponente zasuka.

Parametri transformacije so bili vzeti iz Specifikacij za vklop referenčnih sestavov v analizi EUREF GPS-kampanj (Boucher in Altamimi, 2001).

## Rezultati preračuna

Predhodni rezultati preračuna so dali zadovoljivo kakovost končnih koordinat povsod, razen na točki Lendavske gorice. Medtem ko je bila ponovljivost koordinat v okviru vseh treh posameznih kampanj zadovoljiva, so se v kombiniranem izračunu pojavila večja odstopanja (2–3 cm). To je nakazovalo na nestabilnost te točke na daljši rok.

Postavljena je bila domneva, da je razlog za nestabilnost dvanajstmetrske piramide na Lendavskih goricah težka gasilska lestev, ki je bila uporabljena za dostop do točke in postavitve antene (glej Sliko 3). S pomočjo kolegov gradbenikov s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, je bilo izvedenih nekaj statičnih izračunov, pri čemer so bili upoštevani teža in položaj lestve ter višina, oblika in način gradnje piramide. Izkazalo se je, da je to lahko razlog za odstopanja.



Slika 3: Gasilska lestev na točki Lendavske gorice – verjetni razlog za težave.

Odločitev po posvetovanjih z Geodetsko upravo Republike Slovenije je bila, da se v končnem preračunu obdrži tudi točko Lendavske gorice, vendar pa se v preračun vključijo le opazovanja iz druge kampanje (Slovenija '95). S tem so bila odpravljena trenja v mreži, ki so nastala zaradi nestabilnosti te točke. Ker je bila točka Lendavske gorice tudi uradna EUREF-točka, je bil predlog Geodetske uprave Republike Slovenije, da jo nadomesti bolj kakovostno stabilizirana točka Donačka gora.

Vsi predlogi so bili sprejeti s strani EUREF TWG po predstavitvi predhodnih rezultatov preračuna na sestanku v Parizu. Ker je bilo ugotovljeno, da piramida na točki Lendavske gorice ni dovolj stabilna, je uporaba te točke za natančne geodetske ali geodinamične meritve odsvetovana.

Končni rezultati preračuna so nove koordinate vseh točk, vključenih v EUREF GPS-kampanje na območju Slovenije, in sicer rezultati kombiniranega izračuna vseh treh kampanj, transformirani v ETRS '89. Seznam končnih koordinat točk je v priloženi preglednici (glej Dodatek 1).

### ***RMS-vrednosti enojnih razlik***

Za primerjavo vplivov posameznih dnevnih izračunov na izračune posameznih kampanj ter vplivov slednjih na končni kombinirani izračun so bile preverjene RMS-vrednosti enojnih razlik. Za posamezne dnevne izračune so RMS-vrednosti 1,0–1,2 mm, medtem ko je povprečna RMS-vrednost za vse tri kampanje 1,1 mm.

### ***RMS-vrednosti koordinat novih točk***

Zaradi morebitnih težav s katero izmed normalnih enačb so bile preverjene RMS-vrednosti koordinat novih točk glede na vklope dnevnih izračunov, izračunov posameznih kampanj ter končnega kombiniranega izračuna. RMS-vrednosti za posamezne dnevne izračune so pod 2 mm za obe horizontalni komponenti ter pod 6 mm po višini. RMS-vrednosti za posamezne kampanje so do 1 mm za obe horizontalni komponenti ter do 4 mm po višini. RMS-vrednosti v končnem kombiniranem izračunu (ki vključujejo tudi napake namestitve ter določitve višin anten) pa so 1,9 mm v smeri sever-jug, 1,1 mm v smeri vzhod-zahod ter 3,9 mm po višini.

### ***Primerjava koordinat na referenčnih točkah***

Z namenom odkrivanja prisotnosti sistematičnih napak v mreži je bilo preverjeno ujemanje koordinat na referenčnih točkah, in sicer za proste dnevne izračune, proste izračune posameznih kampanj ter prosti kombinirani izračun vseh treh kampanj. Stopnja ujemanja je bila ugotovljena z optimalnim vklopom dobljenih prostih izračunov na referenčne točke, in sicer z uporabo 7-parametrične podobnostne transformacije. Dobljene RMS-vrednosti koordinat so bile do 4 mm za proste dnevne izračune iz prve kampanje, do 7 mm za proste dnevne izračune iz druge kampanje ter do okoli 6 mm za proste dnevne izračune iz tretje kampanje. Za proste izračune posameznih kampanj so bile RMS-vrednosti koordinat do 4 mm, za prosti kombinirani izračun vseh treh kampanj pa 2,3 mm.

### ***Ponovljivost koordinat na novih točkah***

Možnost pojava grobih napak je bila odpravljena z analizo popravkov koordinat v izračunih posameznih kampanj glede na končni kombinirani izračun. Ponovljivost koordinat je bila podana v lokalnem geodetskem koordinatnem sistemu. Pri tem je bil učinek pomikov posameznih točk tekom izvedbe kampanj (upoštevaje komponente hitrosti točk) odstranjen. Največji popravki koordinat točk na območju Slovenije iz izračunov posameznih kampanj glede na kombinirani izračun so 6,1 mm v smeri sever-jug (Kucelj, prva kampanja), 3,4 mm v smeri vzhod-zahod (Malija, druga kampanja) in 10,2 mm po višini (Korada, prva kampanja).

### ***Primerjava a priori in ocenjenih komponent hitrosti novih točk***

Komponente hitrosti, določene na podlagi neprekinjenih večletnih opazovanj, so bile na voljo le za štiri referenčne in dve kontrolni IGS-točki. Za vse ostale točke je bil v končnem,



kombiniranem izračunu uporabljen a priori model NUVEL1A-NNR. Da bi lahko ocenili red velikosti napak v koordinatah točk zaradi morebiti preslabega modela, je bila izvedena tudi izravnava, kjer so bile neznane komponente hitrosti upoštevane kot nove neznanke v sistemu (free site velocity estimation). Težava je bila v tem, da je kar štirideset od skupaj petinpetdesetih novih točk določenih samo v eni kampanji. Ko so bile vse te neznane komponente hitrosti upoštevane kot nove neznanke, so ocenjene vrednosti le-teh dosegle celo do 50 cm na leto, kar je seveda nesmisel. Neznane komponente hitrosti so bile zato uvedene kot nove neznanke le na točkah, ki so bile določene vsaj v dveh kampanjah. Takšnih točk je bilo trinajst; seznam teh točk s števili dnevnih serij opazovanj po posameznih kampanjah je podan v Preglednici 3:

	SI & Hr '94	Slovenija '95	Hrvaška '96	Skupaj
Velika Kopa	4	3	7	14
Kucelj	4	7	14	25
Korada	4	7		11
Malija	4	7	14	25
Blegoš		3	6	9
Snežnik	4	7		11
Donačka gora	4	3		7
Gorjanci		3	2	5
Golica	4	3		7
Brusnik	4	7	9	20
Novoselsko brdo	4	3	9	16
Pula (Pulj)	4	3	9	16
Žirje	4		9	13

Preglednica 3: Števila dnevnih serij opazovanj za točke, vključene v več kampanj.

Ker je bil interval opazovanj prekratek, so bili v izravnavi upoštevani a priori standardni odkloni 99,99 za horizontalne in 0,01 za vertikalne komponente hitrosti (Hugentobler idr., 2001). Razlike v končnih koordinatah točk, ko so bile uporabljene a priori ocene komponent hitrosti po modelu oziroma ko so bile komponente hitrosti uvedene kot nove neznanke, so znašale do 1,3 mm v smeri sever-jug (Gorjanci) in do 2,2 mm v smeri vzhod-zahod (Blegoš). Razen ene točke (Koper) so vse točke, ki so določene samo v eni kampanji, tiste iz kampanje Slovenija '95. Na srečo je razlika med srednjim trenutkom opazovanj iz te kampanje (1995,74) ter srednjim trenutkom opazovanj iz vseh treh kampanj (1995,55) le 0,19 (69 dni), tako da je vpliv neznanih komponent hitrosti na končne koordinate teh točk zanemarljiv.

### ***Primerjava koordinat na kontrolnih točkah***

V preračun je bilo vključenih šest kontrolnih točk. Dve med njimi sta IGS-točki, preostale štiri pa so uradne EUREF-točke, določene v novem preračunu hrvaških kampanj (Marjanović in Bačić, 2002). Vse te točke so bile upoštevane kot nove točke v mreži. Ker so njihovi položaji določeni z veliko natančnostjo, je bila izvedena primerjava koordinat, in sicer v ITRF '96, trenutek 1995,55. Največja odstopanja so bila 2,2 mm v smeri sever-jug, 1,6 mm v smeri vzhod-zahod ter 8,5 mm po višini; vsa največja odstopanja so na točki Hafelekar, ki je znana po nekoliko slabši ponovljivosti opazovanj. Na vseh drugih kontrolnih točkah so bila odstopanja reda 1 mm po horizontalnih komponentah ter do 4 mm po višini.

## Zaključek

Odstopanja koordinat med končnim kombiniranim izračunom in novimi izračuni posameznih kampanj dosegajo do okoli 6 mm za horizontalni komponenti ter do okoli 1 cm po višini. Ključ do izboljšanja rezultatov je uporaba enotnega in bolj kakovostnega referenčnega sestava. Izvesti je bilo treba transformacijo tirnic satelitov iz referenčnih sestavov, ki so bili v uporabi v času izvedbe meritev (ITRF '92, ITRF '93 in ITRF '94), v naknadno izboljšani ITRF '96. Poleg tega so k izboljšanju prispevale tudi nekatere spremembe algoritmov v najnovejši različici programske opreme (BERNESE 4.2), uporaba uteži opazovanj glede na višinski kot satelita in upoštevanje korekcij faznih centrov anten glede na višinski kot satelita, izločitev opazovanj za satelite, katerih tirnice so bile (na posameznih odsekih) preslabo določene, ter izločitev opazovanj iz dveh kampanj za točko Lendavske gorice, ki se je izkazala za nestabilno.

Rezultati novega preračuna so dobra osnova za povezavo slovenskega koordinatnega sistema s skupnim evropskim koordinatnim sistemom (ETRS '89). Skupaj je bilo v preračun vključenih skoraj petdeset točk na območju Slovenije. Med njimi so tudi vse točke triangulacijske mreže I. reda. Pet točk sodi med uradne EUREF-točke (Donačka gora, Korada, Kucelj, Malija in Velika Kopa). Koordinate točk iz tega preračuna sodijo v kakovostni razred B (EUREF Product Class B), kar je najvišji razred za rezultate obdelav EUREF GPS-kampanj. Dobljeni niz kakovostno določenih geodetskih točk je tudi dobra osnova za vzpostavitev novega državnega koordinatnega sistema.

## Zahvala

Zahvala gre vsem posameznikom in institucijam, ki so pripomogli k uspešni izvedbi projekta. Poleg strokovne podpore EUREF in njegove TWG ter IfAG/BKG je bila za uspešno izvedbo posebej pomembna tudi finančna podpora s strani EuroGeographicsa ter slovenskega Ministrstva za šolstvo, znanost in šport.

## Literatura in viri

- (Altiner idr., 1995) = Yüksel Altiner, Krešimir Čolić, Branimir Gojčeta, Božena Lipej, Marijan Marjanović, Ljerka Rašić in Hermann Seeger: *Results of the EUREF '94 Croatia and Slovenia GPS Campaign*. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Helsinki, 3.–6. maj, 1995. Erich Gruber in Helmut Hornik, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, München, 1995, str. 51–57
- (Altiner idr., 1997a) = Yüksel Altiner, Peter Franke, Heinz Habrich, Dušan Mišković, Hermann Seeger, Aleš Seliškar in Damjana Tavčar: *Results of the Slovenia '95 GPS Campaign*. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Sofia, 4.–7. junij, 1997. Erich Gruber in Helmut Hornik, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, München, 1997, str. 124–131
- (Altiner idr., 1997b) = Yüksel Altiner, Tomislav Bašić, Krešimir Čolić, Branimir Gojčeta, Marijan Marjanović, Zlatko Medić, Ljerka Rašić in Hermann Seeger: *Results of the CROREF '96 GPS Campaign*. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Sofia, 4.–7. junij, 1997. Erich Gruber in Helmut Hornik, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, München, 1997, str. 108–123

- (Altiner idr., 1999) = Yüksel Altiner, Krešimir Čolić, Branimir Gojčeta, Heinz Habrich, Božena Lipej, Peter Neumaier, Marijan Marjanović, Zlatko Medić, Dušan Mišković, Boško Pribičević, Ljerka Rašić, Hermann Seeger, Aleš Seliškar in Damjana Tavčar: *Results of a Recomputation of the EUREF GPS Campaigns in Croatia and Slovenia*. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Bad Neuenahr - Ahrweiler, 10.–13. junij, 1998. Erich Gruber in Helmut Hornik, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 1999, str. 79–88
- (Berk idr., 2003) = Sandi Berk, Žarko Komadina, Marijan Marjanović, Dalibor Radovan in Bojan Stopar: *Preračun kombinirane rešitve EUREF GPS-kampanj iz let 1994, 1995 in 1996 – »EUREF-SLOVENIA-94/95/96«*. Končno poročilo. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, avgust 2003, 15+240 str.
- (Boucher in Altamimi, 2001) = Claude Boucher in Zuheir Altamimi: *Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>, dostop 16. aprila, 2003
- (Hugentobler idr., 2001) = Urs Hugentobler, Stefan Schaer in Pierre Fridez: *Bernese GPS Software. Version 4.2*. Astronomical Institute of the University of Berne, Bern, 2001
- (Marjanović in Bačić, 2002) = Marijan Marjanović in Željko Bačić: *Computation of the Combined Solution of EUREF GPS Campaigns 1994–1996 in the Republic of Croatia*. Reports on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Dubrovnik, 16.–18. maj, 2001. João Agria Torres in Helmut Hornik, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2002, str. 171–188
- (Stopar idr., 2002) = Bojan Stopar, Božo Koler in Miran Kuhar: *National Report of Slovenia*. Reports on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Dubrovnik, 16.–18. maj, 2001. João Agria Torres in Helmut Hornik, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2002, str. 259–261
- (Tavčar, 1997) = Damjana Tavčar: *Processing Results of the Slovenia 95 GPS Campaign*. Internal Report. Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, 1997

**Dodatek 1: Končne koordinate točk v ETRS '89.**

<b>Točka</b>	<b>Oznaka</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Vivodnik	<b>0166</b>	4271848,3717	1129969,8002	4586202,2398
Grintovec	<b>0167</b>	4270280,3348	1107185,8294	4594618,0260
Rašica	<b>0168</b>	4285934,8862	1110917,2186	4576361,5675
Blegoš	<b>0169</b>	4292630,8733	1079310,1582	4579116,9857
Rodica	<b>0170</b>	4292631,2865	1059570,5463	4584246,9719
Mrzovec	<b>0171</b>	4312783,2382	1059774,1726	4564605,0509
Krim	<b>0172</b>	4303467,6488	1110727,4841	4560823,3455
Kucelj	<b>0173</b>	4293438,8652	1129475,5289	4565201,9016
Sveta Ana	<b>0174</b>	4310107,8137	1134567,6359	4548613,1399
Snežnik	<b>0175</b>	4330964,6405	1115839,0433	4534674,5215
Nanos	<b>0176</b>	4322334,0713	1081616,8734	4550365,6356
Mangart	<b>0179</b>	4280449,3297	1039866,1153	4600998,3164
Malija	<b>0180</b>	4351694,7659	1056274,7204	4526994,5803
Slavnik	<b>0181</b>	4343454,6821	1080327,3447	4530230,0035
Cerk	<b>0185</b>	4327553,0119	1140506,6656	4530962,8680
Kanin	<b>0202</b>	4290595,8844	1025155,9320	4594746,3611
Donačka gora	<b>0214</b>	4252206,9648	1198631,9871	4586161,2923
Žigartov vrh	<b>0215</b>	4239847,2902	1174785,5443	4604282,7316
Uršlja gora	<b>0223</b>	4251420,4695	1136326,8262	4603708,0221
Orljek	<b>0224</b>	4281784,7601	1147343,3717	4571841,5934
Velika Kopa	<b>0372</b>	4244884,5787	1153155,6880	4605345,1339
Mrzlica	<b>0373</b>	4271062,3593	1153198,7171	4580640,1341
Javornik	<b>0374</b>	4273873,0905	1179497,1222	4571245,5667
Gorjanci	<b>0375</b>	4299963,7712	1177803,6981	4547546,8289
Debeli vrh	<b>0376</b>	4321783,4147	1165924,2912	4529550,0195
Grmada	<b>0385</b>	4232819,5525	1197372,5581	4603687,3659
Lokavec	<b>0386</b>	4217271,5174	1193915,6035	4618635,3410
Kamenek	<b>0387</b>	4202414,1624	1221146,5537	4625014,4905
Lendavske gorice	<b>0388</b>	4212714,8103	1246016,0990	4608998,3157
Zglavnica	<b>0396</b>	4291722,0356	1160395,3608	4558817,8428
Košuta	<b>0515</b>	4267391,7462	1091231,0675	4600426,6470
Golica	<b>0516</b>	4268440,6487	1068560,0342	4604390,6810
Jeruzalem	<b>0517</b>	4225126,3443	1227181,2152	4602678,4549
Korada	<b>0518</b>	4310119,7801	1039590,8146	4570877,1389
Kremenjak	<b>0519</b>	4327909,3848	1046425,9885	4551790,2460
Košenjok	<b>0091</b>	4237433,0664	1137800,0097	4615915,5786
Bukovec	<b>BUKO</b>	4241306,2078	1185178,9715	4599003,7250
Kamnik	<b>KAMN</b>	4277737,6687	1115558,1552	4582961,8711
Kovk	<b>KOVK</b>	4316406,7567	1073774,0451	4557317,7550
Kranjska Gora	<b>KRGO</b>	4273804,7365	1043435,2103	4603814,0057
Ljubljana	<b>LJUB</b>	4293738,1221	1110067,7360	4569047,5563
Luče	<b>LUCE</b>	4266917,3586	1119365,4220	4593333,9965
Pasja ravan	<b>PARA</b>	4295775,8094	1088858,1028	4573138,9911
Ponikva	<b>PONI</b>	4260698,7185	1153287,6894	4589224,9732
Postojna	<b>POST</b>	4319956,6270	1095407,9472	4548544,7466
Radovljica	<b>RADO</b>	4276816,6005	1081197,8015	4591886,2350
Ribnica	<b>RIBN</b>	4315183,5936	1135854,1447	4542857,3910
Šentviška gora	<b>SEGO</b>	4300245,0243	1062094,5829	4574775,5009
Koper	<b>SMKP</b>	4346593,4974	1061522,7395	4530253,6013