

Idejni projekt za kombinirano geodetsko mrežo ničtega reda

Sandi Berk¹, Katja Bajec², Dominik Fajdiga³, Dalibor Radovan⁴,
Žarko Komadina⁵, Klemen Medved⁶, Tomaž Ambrožič⁷, Božo Koler⁸, Miran Kuhar⁹,
Polona Pavlovčič Prešeren¹⁰, Simona Savšek¹¹, Oskar Sterle¹² in Bojan Stopar¹³

Povzetek

Predstavljen je idejni projekt kombinirane geodetske mreže Slovenije. Kombinirana geodetska mreža omogoča združitev treh stebrov geodezije, ki obsegajo geokinetiko, težnost in rotacijo Zemlje. Na državnem nivoju bo pomenila kakovostni temelj sodobne geoinformacijske infrastrukture. Namenjena bo povezavi in zavarovanju obstoječih državnih geodetskih referenčnih ogrodij, ki se zaradi specifičnih zahtev različnih geodetskih merskih tehnik delijo na klasične terestrične, nivelmanske, gravimetrične in GNSS-mreže. Te med seboj niso fizično povezane. Permanentne in ponavljajoče se meritve na točkah kombinirane geodetske mreže omogočajo modeliranje časovno odvisnih sprememb, kar je nujno za vzdrževanje kakovosti državnega geodetskega referenčnega sistema na dolgi rok. Takšno omrežje ponuja tudi dodatne možnosti interdisciplinarnih raziskav.

Uvod

V zadnjih dveh desetletjih se geodetska znanost in stroka soočata z dramatičnim izboljšanjem kakovosti in operativnosti geometrične določitve položaja, zahvaljujoč predvsem satelitskim tehnologijam. GNSS nadomešča klasične merske tehnologije določitve položaja v znanstvenih in praktičnih aplikacijah. V nasprotju s tem pa ni bilo podobnega napredka pri nalogah določitve in modeliranja težnostnega polja Zemlje vse do pojava novih satelitskih misij v zadnjih petih letih.

Podatki, pridobljeni iz satelitskih misij, namenjeni raziskovanju težnostnega polja Zemlje, kot so CHAMP, GRACE in GOCE, glej npr. (Rummel, 2011), v kombinaciji s ponovljenimi absolutnimi meritvami težnega pospeška omogočajo, da se ta razkorak med horizontalno in višinsko komponento položaja zmanjša. Nivelmanske meritve, ki še vedno omogočajo najnatančnejšo določitev višin oz. višinskih razlik, skupaj s podatki težnosti zagotavljajo kakovostno višinsko komponento koordinatnega sistema ter dajejo vpogled v njene časovne spremembe.

¹ Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.

² Katja Bajec, univ. dipl. inž. geod.

³ Dominik Fajdiga, univ. dipl. inž. geod.

⁴ viš. pred. dr. Dalibor Radovan, univ. dipl. inž. geod.

(vsi Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana)

⁵ Žarko Komadina, univ. dipl. inž. geod.

⁶ mag. Klemen Medved, univ. dipl. inž. geod.

(oba Geodetska uprava Republike Slovenije, Zemljemerska ulica 12, 1000 Ljubljana)

⁷ izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič, univ. dipl. inž. geod., univ. dipl. inž. rud.

⁸ doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

⁹ doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.

¹⁰ asist. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

¹¹ doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.

¹² asist. mag. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.

¹³ prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

(vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana)

Kombinacijo klasičnih geodetskih merskih postopkov (nivelman, gravimetrija) in satelitske tehnologije (GNSS in satelitske misije za spremljanje težnostnega polja Zemlje) je možno doseči samo prek mreže skupnih točk, kar imenujemo **kombinirana geodetska mreža**. Gre za združitev treh stebrov geodezije, ki obsegajo geokinematiko, težnost in rotacijo Zemlje, glej npr. (Plag in sod., 2009). Permanentne in ponavljajoče se meritve na točkah kombinirane geodetske mreže omogočajo modeliranje časovno odvisnih sprememb zemeljskega površja, težnostnega polja Zemlje ter njene atmosfere in hidrosfere.

Idejni projekt kombinirane geodetske mreže Slovenije, ki je predstavljen v nadaljevanju, je bil pripravljen kot CRP-projekt z naslovom Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture. Snovanje kombinirane geodetske mreže Slovenije se zgleduje po nekaterih že vzpostavljenih državnih in regionalnih kombiniranih geodetskih mrežah, npr. v Švici (Brockmann in sod., 2006) in v Skandinaviji (Poutanen in sod., 2007), s težnjo po vključitvi v Evropsko kombinirano geodetsko mrežo – ECGN, glej npr. (Ihde in sod., 2005) in (Ihde in sod., 2006).

Izhodišča za vzpostavitev kombinirane geodetske mreže 0. reda

Slovenija ima nekaj geodetskih referenčnih omrežij: državno omrežje stalnih GNSS-postaj SIGNAL, astrogeodetsko mrežo, trigonometrično mrežo, gravimetrično mrežo in nivelmansko mrežo. Točke teh mrež in omrežij so stabilizirane na različne načine. Vsak poseg (zaradi gradnje, uničenja) v katerikoli točko kateregakoli omrežja pomeni poseg v referenčno geodetsko osnovo države. Prostorsko-časovna stabilnost referenčne osnove je neposredno povezana s časovno stabilnostjo vseh geodetskih (referenčnih) točk. Izhodišče za kombinirano geodetsko mrežo, ki bi zajela čim več merskih tehnik na vsaki točki oz. postaji, je, da bo vsaka postaja omrežja tudi ustrezno geodetsko in pravno zavarovana. Tako bi lahko vzpostavili robustno omrežje, kjer kakršenkoli poseg v določeno geodetsko točko ne bi pomenil posega v realizacijo državnega geodetskega referenčnega sistema.

Kombinirana geodetska mreža bo zagotavljala kakovostno:

- referenčno ogrodje državnega omrežja stalnih GNSS-postaj,
- referenčno ogrodje državnega horizontalnega/terestričnega referenčnega sistema,
- referenčno ogrodje državnega višinskega referenčnega sistema,
- referenčno ogrodje državnega gravimetričnega referenčnega sistema ter
- večnamensko kalibracijsko mrežo tako za preverjanje kakovosti in ustreznosti merilnih instrumentov kot tudi metod in postopkov geodetske izmere.

Zaradi navedenih vlog smo jo poimenovali kar **kombinirana geodetska mreža 0. reda**, saj so mreže 1. redov za posamezne referenčne sisteme že vzpostavljene, mreža 0. reda pa jih bo na kakovosten način povezala v celoto.

Namen vzpostavitve kombinirane geodetske mreže 0. reda je kontinuirano (neprekinjeno ali periodično) izvajanje vseh možnih geodetskih opazovanj najvišje kakovosti za potrebe realizacije državnega geodetskega referenčnega sistema. Kot vemo, je treba za praktično uporabnost koordinatni sistem fizično vzpostaviti oziroma materializirati. V geodeziji praktično realizacijo referenčnega sistema izvedemo s fizično postavitvijo točk oz. postaj, na katerih in med katerimi izvajamo ustrezne geodetske meritve z namenom določitve koordinat teh točk v referenčnem sistemu. Praktično realizacijo referenčnega sistema imenujemo referenčni sestav.

Kakovostna geoinformacijska infrastruktura v obliki kombinirane geodetske mreže 0. reda bo ponudila tudi vrsto sekundarnih možnosti uporabe. Pomembna sta znanstveno-raziskovalni in aplikativni vidik, npr. pri geodinamičnih raziskavah, spremljanju vplivov globalnih sprememb ipd. Prav tako je takšna mreža zelo pomembna pri izvajanju različnih inženirskih nalog, kot so spremljanje morebitnih horizontalnih in vertikalnih pomikov naravnega in grajenega okolja, in s tem pri zaščiti pred naravnimi nesrečami.

Zasnova kombinirane geodetske mreže 0. reda

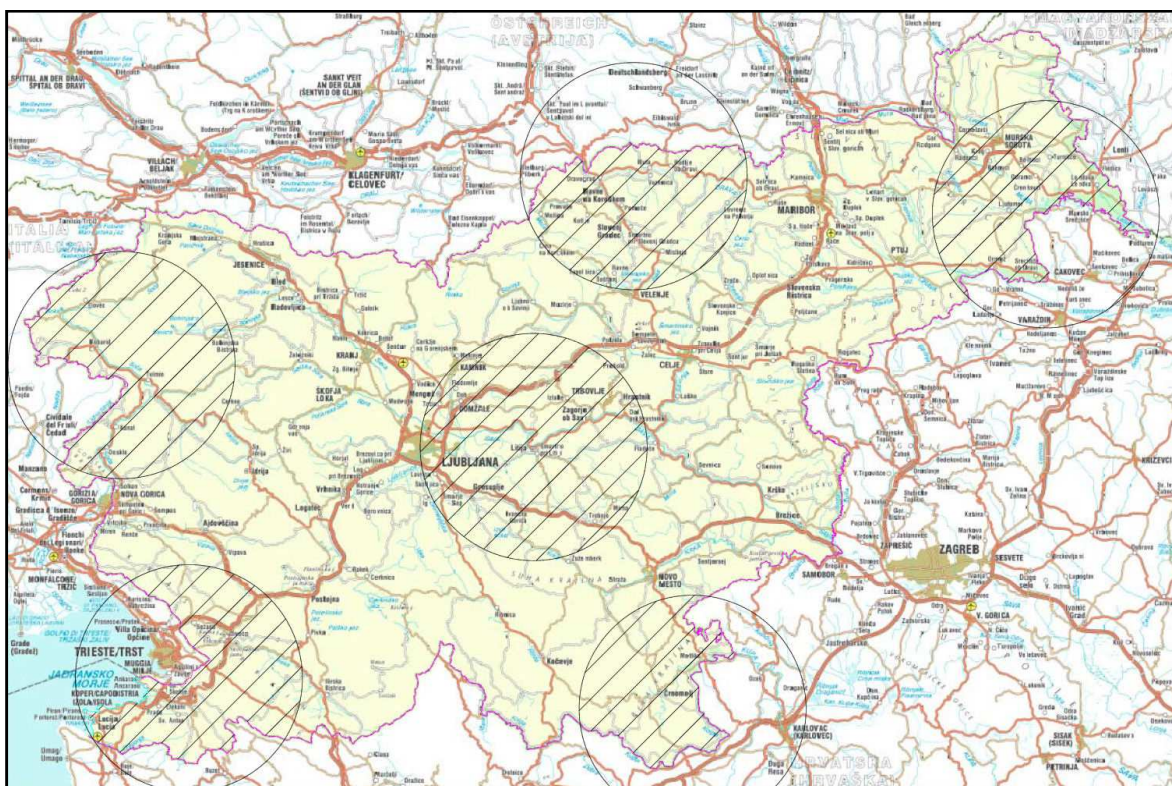
Idejni projekt kombinirane geodetske mreže 0. reda obsega:

- analizo potreb za njeno vzpostavitev, in sicer za državno omrežje stalnih GNSS-postaj, za državni terestrični referenčni sistem, za državni višinski referenčni sistem, za državni gravimetrični sistem in za ostale predvidene funkcije mreže, ter
- analizo možnosti za njeno vzpostavitev, ki se nanaša na možnost umestitve mreže, in sicer glede na obliko in velikost države, glede na reliefne danosti, glede na klimatske danosti in vegetacijo, glede na geološke, hidrološke in tektonske danosti ter glede na druge vplivne dejavnike.

Na podlagi pripravljenih izhodišč in analiz sta bila izdelana:

- predlog optimalnega števila točk mreže in
- predlog optimalne razporeditve točk mreže.

Predlaganih je 6 točk kombinirane geodetske mreže 0. reda, njihove makrolokacije pa so določene s središči krogov polmera 25 km (Slika 1).



Slika 1: Makrolokacije šestih točk kombinirane geodetske mreže 0. reda

Število točk je bilo izbrano tako, da:

- dobimo mrežo petih (Delaunayjevih) trikotnikov, ki vsebuje eno centralno in pet obodnih točk, in
- je povprečna dolžina stranic teh trikotnikov okoli 100 km.

Makrolokacije so bile določene na podlagi kombiniranega predloga razporeditve šestih točk mreže, ki je kompromis med dvema uporabljenima in delno nasprotujočima si geometrijskima kriterijema, in sicer:

- da naj si bodo točke mreže čim bolj vsaksebi (tj. na kar največjih medsebojnih oddaljenostih) in
- da naj točke mreže čim bolj enakomerno pokrivajo celotno državno ozemlje, torej da naj bo poljubna točka državnega ozemlja čim manj oddaljena od najbližje točke mreže.

Prvi kriterij izhaja iz vloge mreže kot referenčnega ogrodja (za realizacijo državnega geodetskega datuma), drugi kriterij pa je pomemben s stališča zagotavljanja lokacijskih storitev za celotno državno ozemlje, kar nekoliko ublaži težnjo po postavitvi točk na sami državni meji.

Točka mreže	Naselje v središču 25 km kroga	Mesta znotraj 25 km kroga
severozahodna	<i>Kamno, Občina Tolmin</i>	<i>Bovec, Tolmin</i>
jugozahodna	<i>Socerb, Občina Koper</i>	<i>Izola, Koper, Piran, Sežana</i>
osrednja	<i>Litija, Občina Litija</i>	<i>Domžale, Grosuplje, Hrastnik, Kamnik, Litija, Ljubljana (vzhodni del), Mengeš, Trbovlje, Trebnje, Višnja Gora, Zagorje ob Savi</i>
jugovzhodna	<i>Bedenj, Občina Črnomelj</i>	<i>Črnomelj, Metlika</i>
osrednja severna	<i>Trbonje, Občina Dravograd</i>	<i>Dravograd, Mežica, Prevalje, Ravne na Koroškem, Slovenj Gradec, Šoštanj</i>
severovzhodna	<i>Gibina, Občina Razkrižje</i>	<i>Lendava, Ljutomer, Murska Sobota, Ormož</i>

Preglednica 1: Naselja znotraj krogov, ki opredeljujejo makrolokacije točk mreže; krepko so označena mesta, ki so najbližje središču kroga predvidene makrolokacije.

Izvedena je bila analiza primernosti lokacij obstoječih geodetskih točk znotraj krogov, ki opredeljujejo makrolokacije točk kombinirane geodetske mreže 0. reda, in sicer:

- trigonometričnih točk (astrogeodetske) mreže 1. reda,
- stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL,
- reperjev nivelmanskih mrež visoke natančnosti in 1. reda ter
- točk absolutne gravimetrične mreže.

Poleg geodetskih pa so vsekakor zanimiva tudi nekatera sorodna omrežja, povezana z opazovanji dogajanj in pojavov na Zemlji kot planetu, njenem površju, notranjosti in atmosferi. Tako so bile v analizo vključene tudi:

- točke mreže potresnih opazovalnic ARSO,
- točke mreže vremenskih opazovalnic ARSO,
- astronomske opazovalnice in observatoriji ter
- nekatere druge točke (npr. GEOSS – geometrično središče Slovenije).

Morebitna delitev oz. združitve lokacij s točkami teh omrežij bi lahko prinesla dodatne obojestranske koristi in možnosti interdisciplinarnega povezovanja.

Primernost predlaganih obstoječih lokacij je bila ovrednotena po najbolj osnovnih kriterijih, ki so:

- **lastništvo:** v primeru odkupljenih parcel v lasti države, ministrstev, javnih agencij ipd.;
- **dostopnost:** v primeru neproblematičnega dostopa do točke z osebnim vozilom in relativno majhne oddaljenosti od večjega naselja/mesta, zahtevana je možnost niveliranja – tj. priključitve na nivelmansko mrežo;
- **infrastruktura:** v primeru razpoložljivosti priključitve na električno in telefonsko omrežje oz. internetne povezave (pomembno za prenos podatkov);
- **geološka primernost:** v primeru lokalne geološke stabilnosti, torej da ni posedan, ni na plazovitem območju, ni na območju z večjimi nihanji podtalnice, ni v bližini večjih prometnic (tresljaji), ni na strehi stavbe ipd.;
- **možnost izvajanja meritev:** v primeru lokacije z odprtim obzorjem (predvsem proti jugu), npr. na vrhu vzpetine ali prostrane ravnine, planote (brez visoke vegetacije), da v bližini ni ovir in virov elektromagnetnega sevanja ipd.

Vse ocene so preliminarne, pridobljene brez terenskih ogledov in podrobnejših preverjanj. Dokončni izbor mikrolokacij bo odvisen od kriterijev idejnega projekta, hkrati pa bo zahteval podrobno preučitev primernosti lokacij s terenskimi ogledi, testnimi meritvami (npr. kakovosti sprejema GNSS-signalov), geološkimi mnenji ipd.

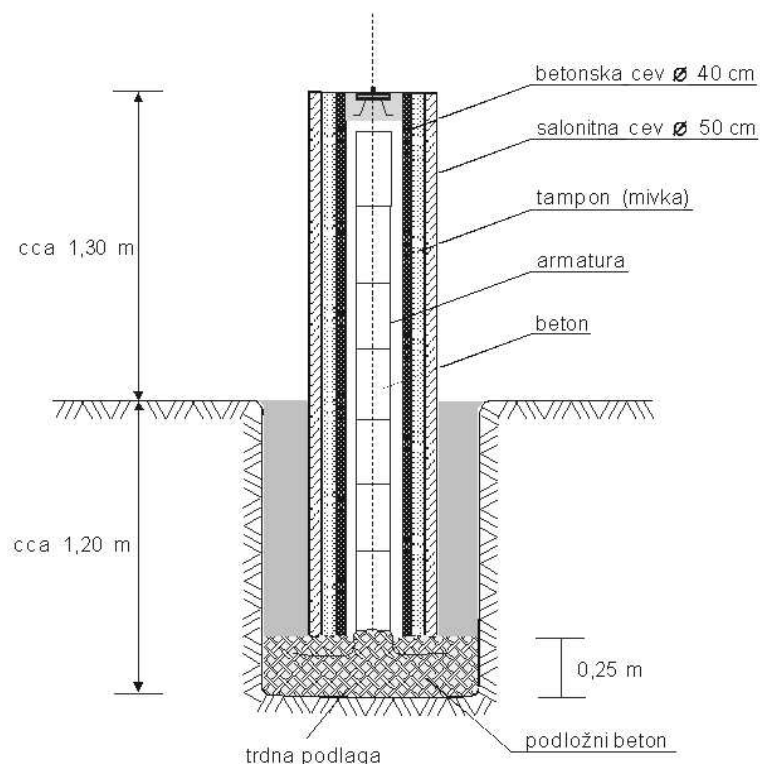
Stabilizacija točk kombinirane geodetske mreže 0. reda

Kombinirana geodetska mreža 0. reda mora izpolnjevati ustrezne mednarodne standarde, če se bomo želeli vključiti v mrežo ECGN in sodelovati v projektih za globalno spremljanje težnostnega polja Zemlje in modeliranje časovno odvisnih sprememb v Zemljini skorji. Vsaka točka kombinirane mreže 0. reda je tako sestavljena iz naslednjih točk (vsaka od teh točk je namenjena različnim geodetskim opazovanjem):

- primarne točke,
- referenčne GNSS-točke,
- referenčnega reperja za niveliranje,
- referenčne gravimetrične točke,
- po možnosti referenčne točke za mareografska opazovanja ter
- točk zavarovalne terestrične in nivelmanske mreže.

Način stabilizacije mora omogočati tudi izvedbo astronomskih in geomagnetnih opazovanj. Različne referenčne točke se lahko tudi združijo v eni sami točki (fizično), izjema pa so seveda točke zavarovalne mreže. Primer enega izmed predlogov za stabilizacijo primarne točke je na Sliki 2. Možne so tudi drugačne izvedbe, ki so pogojene predvsem z naravnimi danostmi (zaželeno je stabilizacija na živi skali) pa tudi dodatnimi zahtevami na morebitni obstoječi opazovalnici.

Točke zavarovalne mikromreže so razporejene v neposredni okolici primarne točke in so namenjene zavarovanju primarne in drugih referenčnih točk (primer poškodbe, uničenja) ter spremljanju/ugotavljanju horizontalne in višinske stabilnosti primarne in referenčnih točk na območju zavarovalne mreže. Zavarovalno mrežo naj bi sestavljale štiri točke, stabilizirane s talno stabilizacijo in ležeče na oddaljenosti do 100 m od primarne točke. Točke zavarovalne mreže bodo stabilizirane z ustrezno temeljenim betonskim kvadrom velikosti vsaj 50 cm × 50 cm × 50 cm in z možnostjo prisilnega centriranja merilnih instrumentov. Poleg opisane zavarovalne mreže za spremljanje stabilnosti v horizontalnem smislu mora biti vzpostavljena tudi zavarovalna nivelmanska mikromreža. Sestavljajo jo štirje zavarovalni reperji, ki so lahko vgrajeni v istem betonskem temelju kot zavarovalne točke horizontalne mikromreže.



Slika 2: Stabilizacija referenčne točke z masivnim betonskim stebrom (Kogoj et al., 2009)

Osnovne zahteve pri postavitvi točke kombinirane geodetske mreže 0. reda so: pridobitev lastninske pravice na območju stabiliziranih referenčnih točk (vsaj okoli 5 m × 5 m) in služnosti za točke zavarovalnih mrež v neposredni okolici, saj gre za trajne objekte državnega pomena. Točka mora biti dostopna z osebnim vozilom, zagotovljena mora biti možnost niveliranja. Na voljo mora biti ustrezna infrastruktura, kot je priklop na električno omrežje in ustrezna telekomunikacijska povezava (za prenos podatkov). Lokacija mora biti geološko primerna. Pogoj pa je seveda tudi nemoteno izvajanje vseh predvidenih meritev, kar je povezano z ustrezno odprtim obzorjem brez motečih ovir, odsotnostjo motečih izvorov elektromagnetnega valovanja, motečih vibracij terena ipd. Poleg stebrov z referenčnimi točkami je na lokaciji vsake točke predvidena tudi manjša uta z merilnim instrumentarijem in komunikacijsko opremo.

Zaključek

Idejni projekt kombinirane geodetske mreže 0. reda podaja izhodišča ter na podlagi izvedenih analiz potreb in možnosti za izvedbo projekta podaja tudi predlog optimalnega števila in razporeditve točk kombinirane geodetske mreže 0. reda. Predlaganih je šest točk, njihove makrolokacije pa so določene z območji znotraj krogov polmera 25 km.

Kombinirana geodetska mreža 0. reda bo eden izmed temeljev sodobne državne geoinformacijske infrastrukture. Povezala in zavarovala bo referenčna ogrodja državnega omrežja stalnih GNSS-postaj, horizontalnega/terestričnega referenčnega sistema, višinskega referenčnega sistema ter gravimetričnega referenčnega sistema. Zaradi specifičnih zahtev posameznih omrežij bo iskanje ustreznih mikrolokacij zahtevno delo, ki bo vključevalo podrobno analizo s terenskimi ogledi, testnimi meritvami, geološkimi mnenji in podobnim.

Vsekakor bodo pri iskanju ustreznih mikrolokacij najprej preverjene točke obstoječih geodetskih mrež. Možna in s strani geodezije zaželena bi bila tudi delitev oz. združitve lokacij s točkami sorodnih omrežij (npr. mrež potresnih ali vremenskih opazovalnic). Slednje bi lahko prineslo dodatne obojestranske koristi in možnosti združevanja različnih prostorskih in okoljskih podatkov.

Zahvala

Naročnik predstavljenega CRP-projekta (V2-1096) je Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS, sofinancer pa Geodetska uprava Republike Slovenije – GURS.

Literatura in viri

- Berk, S., Bajec, K., Fajdiga, D., Bitenc, M., Radovan, D., Ambrožič, T., Koler, B., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Savšek, S., Sterle, O., in Stopar, B. (2012). Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture. Končno poročilo. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana (v pripravi).
- Brockmann, E., Becker, M., Bürki, B., Gurtner, W., Haefele, P., Hirt, C., Marti, U., Müller, A., Richard, P., Schlatter, A., Schneider, D., in Wiget, A. (2006). Realization of a Swiss Combined Geodetic Network (CH-CGN). Report on the Symposium of the IAG Subcommission 1.3a Europe (EUREF). Bratislava, Slovaška, 2.–5. junij 2004. *Reports of the EUREF Technical Working Group (TWG) – EUREF publication*, št. 14. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt na Majni, 2006, 8 str.
- Ihde, J., Baker, T., Bruyninx, C., Francis, O., Amalvict, M., Kenyeres, A., Mäkinen, J., Shipman, S., Šimek, J., in Wilmes, H. (2005). Development of a European Combined Geodetic Network (ECGN). *Journal of Geodynamics*, letn. 40, št. 4–5, 2005, str. 450–460.
- Ihde, J., Baker, T., Bruyninx, C., Francis, O., Amalvict, M., Luthardt, J., Liebsch, G., Kenyeres, A., Mäkinen, J., Shipman, S., Šimek, J., in Wilmes, H. (2006). The implementation of the ECGN Stations – Status of the 1st Call for Participation. Report on the Symposium of the IAG Subcommission 1.3a Europe (EUREF). Bratislava, Slovaška, 2.–5. junij 2004. *Reports of the EUREF Technical Working Group (TWG) – EUREF publication*, št. 14. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt na Majni, 2006, str. 49–58.
- Kogoj D., Marjetič A., Ambrožič T., Stegenšek B., Trlep D. (2009). Geodetske meritve stabilnosti odlagališča rudniške jalovine Jazbec, ničelna meritve. UL FGG, Katedra za geodezijo, Ljubljana.

- Plag, H.-P., Rothacher, M., Pearlman, M., Neilan, R., in Ma, C. (2009). The Global Geodetic Observing System. Solid Earth. *Advances in Geosciences*, letn. 13, 2009, str. 105–127.
- Poutanen, M., Knudsen, P., Lilje, M., Nørbech, T., Plag, H.-P., in Scherneck, H.-G. (2007). The Nordic Geodetic Observing System (NGOS). Dynamic Planet. Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools. IAG Symposium, Cairns, Avstralija, 22.–26. avgust 2005. *International Association of Geodesy Symposia*, letn. 130, zv. VI, 2007, str. 749–756.
- Rummel, R. (2011). Preface (GOCE – The Gravity and Steady-State Ocean Circulation Explorer). *Journal of Geodesy*, letn. 85, št. 11, 2011, str. 747.