

UDK 528.236:528.541:528.381:528.422
Pregledni znanstveni članak

Visinski sustavi u nekim europskim zemljama

**Ilija GRGIĆ – Zagreb¹, Maro LUČIĆ – Dubrovnik²,
Milan TRIFKOVIĆ – Novi Sad³**

SAŽETAK. Obnavljanje visinskog sustava periodičan je proces kojem je svrha da se različitim korisnicima kontinuirano osigura kvalitetan, pouzdan i ažuran visinski podatak. Zbog zastarjelosti visinskih podataka Republici Hrvatskoj predstoji obnova referentnoga visinskog sustava. U radu se istražuje kako su neke europske zemlje pristupile rješavanju tog problema te se na pregledan način prikazuju visinski sustavi u tim zemljama. Prilikom obnove temeljne mreže geometrijskog nivelmana u Republici Hrvatskoj morat će se uzeti u obzir činjenica da su na prostoru bivše zajedničke države nastale nove države, potreba za prihvaćanjem novoga visinskog sustava (normalni ili ortometrijski) te važnost nivelmanskih vlakova u susjednim državama za konfiguraciju nacionalne temeljne nivelmanske mreže.

Ključne riječi: visinski sustavi, geometrijski nivelman, konfiguracija mreže.

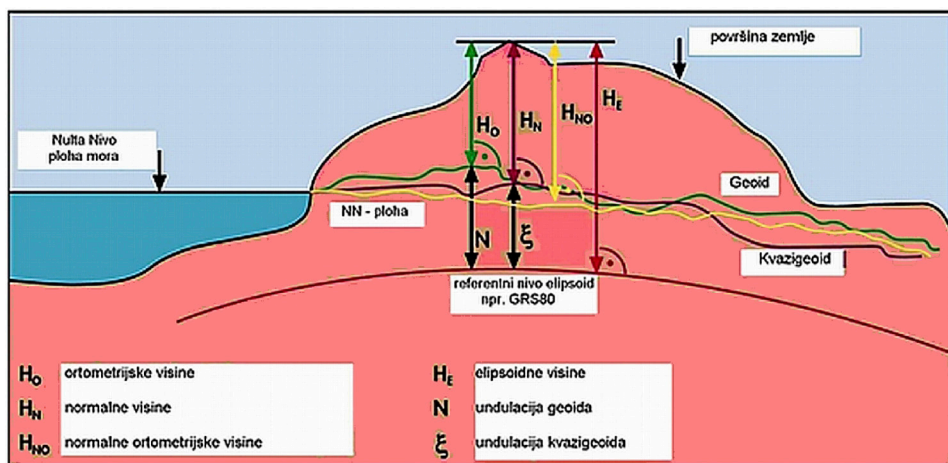
1. Uvod

Pod referentnim sustavom podrazumijeva se teorijska definicija koordinatnog sustava u prostoru i vremenu. Referentni okvir opisuje realizaciju referentnog sustava u obliku prostornih koordinata geodetskih mreža i pripadajućih parametara za njihovu transformaciju u druge okvire (Schlatter 2006). Visinski je sustav jednodimenzionalni koordinatni sustav koji se upotrebljava za određivanje udaljenosti neke točke od referentne plohe duž definiranog puta (ovisan o sustavu visina) u smjeru od referentne plohe prema gore, pri čemu ta udaljenost predstavlja visinu točke. Sukladno određivanju udaljenosti od referentne plohe visina točke može biti određena na više načina, pa je odabir referentnoga visinskog sustava, odnosno referentne plohe iznimno važan. S obzirom na različite metode određivanja ubrzanja sile teže u geodeziji, postoje različiti sustavi visina (slika 1), koji se mogu podijeliti na 3 skupine: u prvu skupinu ulaze geopotencijalne visine i dinamičke visine, u drugu ortometrijske, normalne i normalne ortometrijske visine, a u treću skupinu elipsoidne visine koje su isključivo geometrijskoga karaktera (Schlatter 2006).

¹ doc. dr. sc. Ilija Grgić, Državna geodetska uprava, Gruška 20, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: ilija.grgic@dgu.hr,

² Maro Lučić, dipl. ing. geod., Habitat geo d.o.o., dr. Ante Starčevića 15, HR-20000 Dubrovnik, Croatia, e-mail: maro.lucic@gmail.com,

³ prof. dr. sc. Milan Trifković, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, RS-21000 Novi Sad, Serbia, e-mail: milantri@eunet.rs.



Slika 1. Prikaz različitih sustava visina (Bleech i Krischker 2006).

Geopotencijalne i dinamičke visine teorijski su određive bez hipoteze o rasporedu masa u unutrašnjosti Zemlje, ali ipak nemaju veće značenje u svakodnevnoj geodetskoj praksi. Prvu i drugu skupinu visinskih sustava čine fizikalni visinski sustavi vezani uz ekvipotencijalne plohe i Zemljino polje ubrzanja sile teže, te povezuju nivelmanska i gravimetrijska mjerenja. Druga skupina koju čine fizikalno definirane visine zauzima središnje mjesto u nacionalnim referentnim visinskim sustavima. Elipsoidna visina dobiva sve veće značenje kroz mogućnosti određivanja koordinata različitim satelitskim metodama pozicioniranja. Taj sustav visina zanemaruje Zemljino polje sile teže i upotrebljava najkraću pravocrtnu udaljenost od referentnog elipsoida duž normale na elipsoid do točke na Zemljinoj površini.

2. Visinski sustavi u Republici Hrvatskoj

Prva sustavno izvedena nivelmanska mreža na teritoriju Republike Hrvatske i u državama koje su bile sastavnice Austro-Ugarske Monarhije bila je mreža preciznog nivelmana (Austrijski precizni nivelman – APN). Ta je mreža izvedena u razdoblju od 1875. do 1913. godine. Druga i treća nivelmanska mreža izvedene su za bivše Jugoslavije u razdoblju nakon II. svjetskog rata. To su mreža I. nivelmana visoke točnosti, koja je izvedena u razdoblju od 1946. do 1963. godine, odnosno mreža II. nivelmana visoke točnosti izvedena u razdoblju od 1970. do 1973. godine.

Referentni visinski sustav, koji je sve donedavno bio u službenoj uporabi u Republici Hrvatskoj, određen je srednjom razinom Jadranskog mora na mareografu u Trstu, iz jednogodišnjih mjerenja morskog vodostaja provedenih 1875. godine (Feil i Rožić 2003). U odnosu na srednju razinu određena je apsolutna visina ishodišnog repera visinskog sustava u iznosu 3,3520 m, a visine svih repera definirane su u sustavu normalnih ortometrijskih visina. Krajem 20. stoljeća potvrđeno je da je srednja razina mora na mareografu u Trstu niža za približno 12 cm od pravilno određene srednje razine mora, što je posljedica samo jednogodišnjeg mjerenja

razine mora. Za pravilno određivanje srednje razine mora potrebno je obaviti mjerenja u vremenskom razdoblju od 18,61 godine.

U svrhu pravilnog određivanja srednje razine mora obavljena su, u punom vremenskom intervalu od 18,61 godine, između 1962. i 1981. godine (za vremensku epohu 1971.5 godina), mareografska mjerenja na pet mareografa (Dubrovnik, Split, Bakar, Rovinj i Kopar) duž obale Jadranskog mora (Feil i Rožić 2003).

Službeni je naziv novoga visinskog sustava RH Hrvatski visinski referentni sustav za epohu 1971.5, odnosno skraćeno HVRS71. Okosnicu sustava čini visinska mreža trajno stabiliziranih repera II. NVT-a s visinama određenim u sustavu (normalnog) Zemljina polja sile teže. Zbog nedovoljno dugog intervala mjerenja srednje razine mora sve visine repera u starom visinskom sustavu države inicijalno su veće za navedenu razliku proizašlu iz različite dužine vremenskog intervala mjerenja srednje razine mora, te kumulativno, zbog prirasta pogrešaka u visinskim mrežama, poprimaju iznose do približno 40 cm (Rožić 2004).

HVRS71 – epoha 1971.5 je sustav referiran prema normalnom Zemljinu gravitacijskom polju i može ga se opisati sljedećim konvencijama (Rožić i Bašić 2013):

- visinski datum je ekvipotencijalna ploha Zemljina gravitacijskog polja
- visinske komponente sustava su normalne ortometrijske visine točaka određene u odnosu na visinski datum
- nulta ekvipotencijalna ploha određena je uz eliminiranje direktnih utjecaja Sunca i Mjeseca (indirektni efekti elastičnih deformacija tijela Zemlje nisu eliminirani).

Realizacija HVRS71, epoha 1971.5 nastala je računskim određivanjem vrijednosti normalnih ortometrijskih visina repera iz mreže II. NVT-a na području Hrvatske, Slovenije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Vojvodine (dio Srbije) u odnosu na 5 mareografa. Pritom nivelmanska mreža II. NVT-a kao realizacija sustava HVRS71 definira Hrvatski visinski referentni okvir, epoha 1971.5 HVRO71. Visinski datum HD71 realiziran je srednjom razinom mora u epohi 1971.5 godina, na lokaciji 5 mareografa, koja je prihvaćena kao nivo-ploha nulte visine za određivanje visina, odnosno prihvaćeno je $H_{\text{Kopar}} = H_{\text{Rovinj}} = H_{\text{Bakar}} = H_{\text{Split}} = H_{\text{Dubrovnik}} = 0$ m. Visinski datum sustava HVRS71 fiksiran je normalnim ortometrijskim visinama referentnih repera visinskog sustava na lokacijama 5 mareografa. Za realizaciju visinskog referentnog sustava HVRS71 korišteni su parametri koji definiraju dimenzije Besselova elipsoida i konstante normalnoga gravitacijskog polja koje definira Geodetski referentni sustav 1980 – GRS80 (Rožić i Bašić 2013).

Tijekom 1997. godine započeli su radovi na uključenju visinskog sustava Republike Hrvatske u Ujedinjenu europsku nivelmansku mrežu – UELN (United European Levelling Network). Ta je mreža suvremeni geodetski referentni visinski sustav za Europu na kontinentalnoj razini i ujedinjuje nacionalne nivelmanske mreže geometrijskog nivelmana najvišeg reda točnosti većine europskih država. Ti su radovi na kraju rezultirali znanstveno-stručnim projektom “UELN geopotencijalni i normalni visinski sustav Republike Hrvatske” u okviru kojeg su izračunane geopotencijalne i normalne visine za sve repere temeljne nivelmanske mreže, tj. mreže II. NVT-a (Feil i Rožić 2000).

Nepovoljna je činjenica da je od posljednjih nivelmanskih mjerenja proteklo dulje vremensko razdoblje, preko 40 godina, te da nedostaju mjerenja vrijednosti ubrzanja sile teže. Upravo zbog toga Hrvatski geodetski institut pokrenuo je inicijalne

radove koji su rezultirali izradom projekta nove temeljne nivelmanske mreže Republike Hrvatske uvažavajući nastanak i postojanje samostalne i suverene Republike Hrvatske. Projekt novih nivelmanskih poligona naslonjen je na mrežu nivelmanskih vlakova II. NVT-a i u potpunosti je prilagođen državnom teritoriju. Temeljnu mrežu Republike Hrvatske činilo bi 20 nivelmanskih poligona nastalih podjelom postojećih nivelmanskih poligona novoprojektiranim vlakovima radi poboljšanja i unapređenja visinskog sustava polazeći od postojećeg stanja očuvanosti repera. U sklopu tog projekta izrađena je analiza utjecaja mareografa u Kopru te nivelmanskih vlakova iz susjedne Bosne i Hercegovine i Republike Slovenije na geometrijsku konfiguraciju temeljne nivelmanske mreže Republike Hrvatske (Grgić i dr. 2012).

Budući da Hrvatskoj u bliskoj budućnosti predstoji obnova temeljne nivelmanske mreže, već bi sada u pripremnim aktivnostima bilo važno veliku pozornost posvetiti znanstveno-stručnim standardima koji definiraju ustroj i realizaciju suvremenih visinskih sustava. Postojeći sustav visina proizašao je iz postojećeg stanja, uvjetovan nedostatkom raspoloživih gravimetrijskih podataka, što je bio osnovni razlog uvođenja sustava normalnih ortometrijskih visina kao jedinog mogućeg rješenja. Iz perspektive obnove visinskog sustava HVRS71 ima prijelazni karakter i treba poslužiti za rješavanje svih praktičnih geodetskih zadaća, bez obzira na postojeće nedostatke, sve do trenutka ustroja geopotencijalnog, odnosno ortometrijskog ili normalnog sustava visina.

Dosadašnji normalni ortometrijski sustav visina trebao bi se zamijeniti ortometrijskim ili normalnim sustavom visina kako je to uobičajeno u većini europskih država. Ne upuštajući se u analizu prednosti ili nedostataka jednog ili drugog visinskog sustava potrebno je ustvrditi, slijedeći suvremene međunarodne znanstvene i stručne standarde i preporuke, da je izvjesno uvođenje geopotencijalnog, odnosno za praktične primjene ortometrijskog ili normalnog sustava visina (Rožić 2001). Temeljna pretpostavka njihova uvođenja je gravimetrijska izmjera temeljne nivelmanske mreže.

Komparativna analiza visinskih sustava u nekim europskim zemljama ima cilj pokazati stanje nivelmanskih radova i strateške smjernice obnove visinskih sustava u tim državama te pokazati osnovne značajke koje su bile presudne za uvođenje normalnog ili ortometrijskog sustava visina na primjeru visinskih sustava nekih europskih država, među kojima su i one s kojima Republika Hrvatska ima blisko povijesno naslijeđe.

3. Karakteristike visinskih sustava

Idealan visinski sustav mora zadovoljiti sljedeće kriterije (Bilajbegović i dr. 2008):

- visine točaka moraju biti jednoznačno određene i neovisne o putu niveliranja
- visine se moraju jednoznačno odrediti na osnovi fizikalnih mjerenja na fizičkoj površini bez uvođenja hipoteza o unutrašnjem sastavu Zemlje
- iz visina bi se trebala odrediti geoidna undulacija sa zadovoljavajućom točnošću na najjednostavniji način. Na taj bi način bila moguća jednostavna povezanost visinskog sustava s elipsoidnim visinama, koju zahtijevaju satelitske metode određivanja položaja točke na fizičkoj površini
- visine točaka trebale bi biti izražene u metrima

- točke moraju ležati na istoj nivo-plohi
- popravke mjerenih visinskih razlika trebale bi biti što manje, da ih se pri niveliranju nivelmanskih vlakova nižih redova može zanemariti.

S obzirom na kriterije koji odlikuju idealan visinski sustav u tablici 1 prikazani su skupno visinski sustavi i neke njihove osnovne karakteristike.

Tablica 1. *Karakteristike visinskih sustava (Koler i dr. 2007).*

	Geo-poten. visine	Dina-mičke visine	Ortomet. visine	Nor-malne visine	Nor. ortomet. visine	Elipsoidne visine
Referentna ploha	geoid	geoid	geoid	kvazigeoid	NN ploha (kvazigeoid)	referentni elipsoid
Visine neovisne o putu niveliranja	da	da	da	da	ne	da
Točke leže na istoj nivo-plohi	da	da	ne	ne	ne	ne
Visina točke izražena u metrima	ne	da	da	da	da	da
Geometrijska interpretacija visine	ne	ne	da	da	da	da
Matemat. povezanost s elipsoidnim visinama	ne	da	da	da	da	–
Male korekcije nivel. visinskih razlika	ne	ne	neke	da	da	ne

Određivanje geoida i kvazigeoida ključni je problem pri realizaciji visinskih datuma, odnosno nulte plohe za fizikalne visinske sustave. S obzirom na to da ne postoje instrumenti za direktno mjerenje apsolutnih vrijednosti Zemljina potencijala ubrzanja sile teže, potrebno je napraviti vezu između geoida i srednje morske razine, da bi se odredila vrijednost W_0 za određeni referentni visinski sustav.

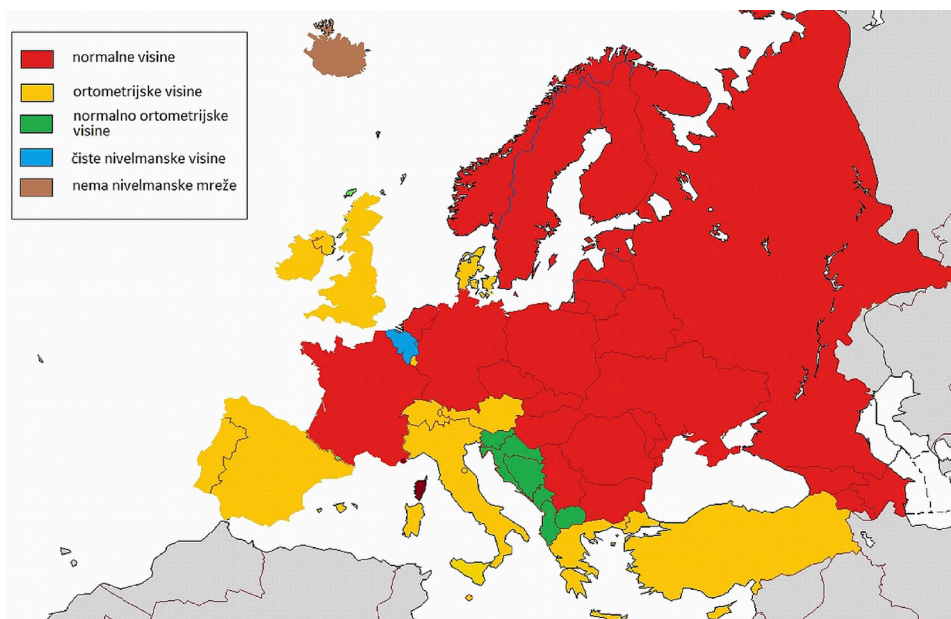
Po široj definiciji geoid je ekvipotencijalna ploha Zemljina polja ubrzanja sile teže koja koincidira sa srednjom morskom razinom na oceanima (na oceanima geoid i kvazigeoid koincidiraju). Zbog toga se srednja morska razina određuje mareografskim mjerenjima pri čemu se uzimaju u obzir plimni valovi i druge vremenske promjene morske razine te efekti topografije morske površine (SSTop – Sea Surface Topography). Relativno gibanje Sunca i Mjeseca u odnosu na Zemlju te efekti precesije i nutacije uzrokuju plimne valove koji imaju ciklus od 18,61 godine, što je razlog zbog čega bi mareografski podaci trebali obuhvaćati period od 18,61 godine. Prosječna razina mora izvedena iz analize varijacija razine mora u dugom periodu koristi se za definiranje visinskih datuma nacionalnih referentnih visinskih sustava.

Europski visinski sustavi definirani su u odnosu na jedan ili više mareografa koji se nalaze na različitim lokacijama na oceanima i morima: Sredozemnome moru, Baltičkome moru, Sjevernome moru, Crnome moru, Atlantskom oceanu (tablica 2). Zbog mnogobrojnih razlika između površine oceana i plohe geoida, razlike srednjih morskih razina između navedenih mora i oceana mogu biti i do nekoliko decimetara.

Tablica 2. *Visinski sustavi u nekim državama Europe i njihove karakteristike (URL 1).*

Država	Visinski datum	Fundamentalni reper	Epoha realizacije visinskog datuma	Veza s EVRS	Vrsta visina	Opaska
Austrija	Trieste	Hutbiegl 57513	1875	da	norm. ortometrijske /ortometrijske	
Belgija	Ostend	GIKMN Uccle (Royal Observatory of Belgium)	1981–2000 (srednja razina mora 1878–1855)	da	čiste nivelman-ske visine	bez gravimetrijskih korekcija
Danska	DVR90	G.M.902 = K-63-9946	1990	da	ortometrijske	u odnosu na 10 mareografa
Fran-cuska	IGN69	Marseille M.ac-O-VIII	1969	da	normalne	
Nje-mačka	Amsterdam (NHN)	Wallenhorst 3614/00005	1992 (sr. razina mora 1684)	da	normalne	
	Amsterdam (NN)	Wallenhorst	1985 (sr. razina mora 1684)	da	normalne ortometrijske	
	Kronstadt (Baltic)	Hoppegarten (NHP 1912)	1976 (sr. razina mora 1912)	da	normalne	
Velika Britanija	Ordnance Datum Newlyn	Newlyn	1915–21	da	ortometrijske	
Mađar-ska	Kronstadt (Baltic)	Nadap	1980 (sr. razina mora 1833)	da	normalne	
Irska	Malin Head	Malin Head fundamental bench mark	1970	da	ortometrijske	
Litva	Kronstadt (Baltic)	–	sr. razina mora 1833	da	normalne	
Nizo-zemska	Normaal Amsterdams Peil (NAP)	000A2350	1965–1978 (sr. razina mora 1684)	da	čiste nivelman-ske visine	bez gravimetrijskih korekcija
Nor-veška	Tregde	D40N0055	1916–1954	da	normalne ortometrijske	
Portugal	Cascais 1938	NP1	1938	da	ortometrijske	
Slovenija	Trieste	Ruse (FR-1049)	sr. razina mora 1875	da	normalne ortometrijske	
Španjol-ska	Alicante	JM-45	1975 (sr. razina mora 1870–1882)	da	ortometrijske	
Švedska	Normaal Amsterdams Peil (NAP)	–	1970 (sr. razina mora 1684)	da	normalne	visine reducirane na epohu 1970.0 na osnovi novih mjerenja
Švicar-ska	LN02	Repere Pierre du Niton (RPN), Geneva	1902	da	čiste nivelman-ske visine	bez gravimetrijskih korekcija
	LHN95	Zimmerwald	1902	ne	ortometrijske	

U Europi se u praksi upotrebljavaju tri različite vrste visina: normalne, ortometrijske i normalne ortometrijske visine (slika 2). Ortometrijske visine upotrebljavaju se u Belgiji, Danskoj, Italiji itd., a normalne u Francuskoj, Njemačkoj, skandinavskim zemljama itd. U državama nastalim raspadom bivše SFRJ: Hrvatskoj, Sloveniji, Bosni i Hercegovini, Crnoj Gori, Makedoniji, kao i u Albaniji, u primjeni su normalne ortometrijske visine, dok su u Srbiji od 2012. godine u primjeni normalne visine (SG RS 2012).



Slika 2. Vrste visina u nacionalnim visinskim sustavima u Europi.

3.1. Visinski sustav u Švicarskoj

U Švicarskoj je dugo vremena bio u upotrebi visinski sustav LN02 temeljen na čistim nivelmanskim visinama, u kojem se nije uzimalo u obzir ubrzanje sile teže ni gravimetrijske korekcije. Naime, prva referentna nivelmanska mreža NdP (Nivellement de Précision) datira od 1860., te je 1902. povezana preko fundamentalnog repera RPN (*Repère Pierre du Niton*) u Ženevi s četiri mareografa u Francuskoj, Njemačkoj, Austriji i Italiji. Budući da je srednja vrijednost ovih veza bila blizu mjerenjima u Francuskoj (Marseilles), odlučeno je da je Švicarska temeljna nivelmanska mreža LN02 definirana preko mareografa u Marseillesu. Razlika između referentnih visinskih sustava iznosila je 3,28 m, te su za taj iznos popravljene stare visine. Također, nisu uzete u obzir sustavne pogreške NdP-a, kao ni recentni pomaci kore na području Alpa. Drugi je problem da su preliminarni podaci, bez uključivanja gravimetrijskih podataka, široko korišteni pri nivelmanskim mjerenjima diljem zemlje. Kada je 1940. godine provedeno konačno izjednačenje mreže, bilo je kasno da stupi u službenu uporabu. Tako je Švicarska bila jedna od rijetkih zemalja koja nije imala visinski sustav temeljen na geopotencijalnim visinama (Schlatter 2006).

Ti su nedostaci posebno došli do izražaja pojavom GPS-a. Usporedbe niveliranih podataka i visina određenih metodom GPS-a (umanjene za vrijednost geoidne undulacije) pokazivale su sustavne razlike te je odlučeno da se uvede novi visinski sustav LHN95 definiran sljedećim karakteristikama (Marti 2003):

- temeljen na geopotencijalnim visinama
- potpuno ispunjava zahtjeve visoke točnosti složenih inženjerskih projekata
- mogućnost određivanja visina metodama GNSS-a
- mogućnost razmjene podataka sa susjednim zemljama
- da je mreža kinematička, s obzirom na vertikalna uzdizanja Alpa
- fundamentalni reper da bude smješten u Zimmerwaldu.

S obzirom na to da se za praktičnu uporabu geopotencijalne visine trebaju transformirati u normalne ili ortometrijske visine, ispitivane su prednosti jedne i druge vrste visina:

- prednost normalnih visina očituje se u tome što se vrlo jednostavno računaju i ne uzimaju u obzir gustoću distribucije masa u unutrašnjosti Zemlje. U Švicarskoj se normalne visine slažu s niveliranim visinama bolje nego ortometrijske,
- prednosti ortometrijskih visina najviše dolaze do izražaja u planinskim regijama kao što su Alpe. Pritom je ploha geoida s manjim zakrivljenostima od plohe kvazigeoida, što daje mogućnost bolje interpolacije geoidnih undulacija, pa je samim time mnogo lakše izračunati ortometrijske iz elipsoidnih visina koje se dobivaju metodama GNSS-a.

S obzirom na navedeno, odlučeno je da ortometrijske visine budu službene za državnu izmjeru, dok se za razmjenu s drugim zemljama upotrebljavaju normalne visine koje se lako izračunaju iz geopotencijalnih visina.

Prvi korak pri ponovnom izjednačenju mreže bilo je prikupljanje i homogeniziranje svih nivelmanskih mjerenja obavljenih prije 1902. godine. Drugi korak bilo je prikupljanje gravimetrijskih mjerenja duž nivelmanskih strana, primjenom računalno podržane softverske interpolacije na reperima koji nisu imali gravimetrijska mjerenja. Točnost interpolacije bila je 1 mGal. Na taj način računale su se razlike potencijala:

$$\Delta C = \Sigma(g\Delta H). \quad (1)$$

Izjednačenje je provedeno na nivelmanskoj mreži sljedećih karakteristika (Marti 2003):

- izmjereno je 8000 km preciznog nivelmana
- oko 3820 mjerenja (razlika potencijala)
- oko 3170 nepoznanica (potencijal i brzina)
- oko 650 prekobrojnih mjerenja (čvorne točke i točke s više od dva mjerenja)
- točnost određivanja visina: 1,00 mm/km (10 mm/100 km)
- točnost brzina: 0,15 mm/god.

Rezultati izjednačenja pokazali su signifikantno vertikalno izdizanje Alpa od 1,5 mm/god. Na ravninskim područjima iznosi su oko nule. Budući da su izračunane dvije vrste visina, mogle su se usporediti dobivene normalne i ortometrijske visine. Razlike iznose od 0 cm – za visine od 200 m (najniža visina repera) do 48 cm – za

visine od preko 2500 m iznad srednje morske razine, a pokazale su i visoku korelaciju s visinom točke.

Usporedba čistih nivelmanskih visina (LN02) i novih ortometrijskih i normalnih visina dala je sljedeće rezultate (Martić 2003):

- razlike između niveliranih visina i normalnih visina nisu korelirane i kreću se u rasponu od -21 do $+12$ cm. Najveći udio imaju distorzije u LN02,
- razlike između čistih niveliranih visina i ortometrijskih visina mnogo su veće i imaju raspon od -20 do $+43$ cm. Osim distorzija u LN02 najveći udio imaju sustavne razlike između normalnih i ortometrijskih visina.

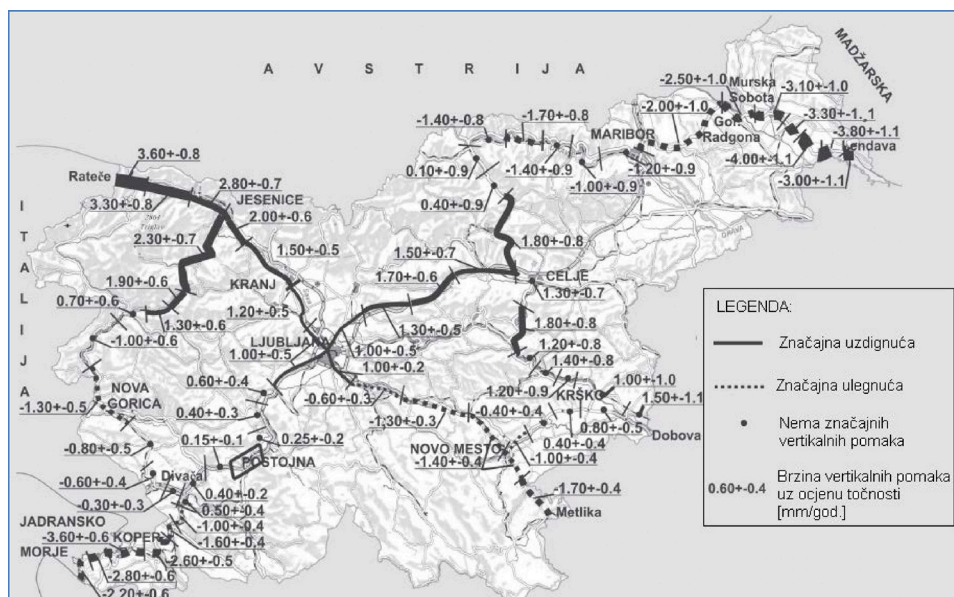
3.2. Visinski sustav u Sloveniji

Osnovna visinska mreža Republike Slovenije realizirana je visinama u normalnom ortometrijskom sustavu, koji datira još od 19. st., kada su se na europskom području obavljale prve opsežne nivelmanske izmjere (austrougarska izmjera). Visine točaka nisu izražene na osnovi nivelmanskih i gravimetrijskih mjerenja, koja su osnova modernih visinskih sustava. Trenutačno se nivelmanska mreža u Sloveniji bazira na osnovi nivelmanskih vlakova iz I. NVT-a (realiziran nakon drugog svjetskog rata) i II. NVT-a iz sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Primjenjuje se normalni ortometrijski sustav visina, u kojem se referentna ploha ne može izračunati jednadžbom već se aproksimira nekom analitičkom plohom na osnovi velikog broja točaka s poznatom elipsoidnom i normalnom ortometrijskom visinom. Razvojem metoda GNSS-a potrebno je dobiti geoidne ili kvazigeoidne visine koje jednostavno omogućuju preračunavanje elipsoidnih visina u različite visinske sustave i obrnuto. Visinski datum definiran je s obzirom na mareografska mjerenja iz 1875. godine na molu Sartorio u Trstu. Nivelmanska mreža vezana je uz austrougarski fundamentalni reper FR 1049 na Pohorju (Koler i dr. 2007).

Uvođenje novoga visinskog sustava na osnovi postojećih podataka veliki je problem zbog raznolikosti podataka te zbog intenzivnih geodinamičkih procesa koji rezultiraju vertikalnim pomacima (od centimetra do nekoliko decimetara) na području Slovenije (slika 3). Problem je, također, gravimetrijska izmjera obavljena u sklopu II. NVT-a, jer se ne zna kako je obavljena, koje su popravke korištene i koja je njezina kvaliteta. Osim toga, nedostaju podaci gravimetrijskih mjerenja uzduž nivelmanskih poligona koji su nivelirani nakon 1980. godine, a uključeni su u nivelmansku mrežu na području Slovenije. S obzirom na sve to odlučeno je da na osnovi postojećih podataka nema smisla uvoditi drugi visinski sustav, već da treba provesti novu nivelmansku i gravimetrijsku izmjeru.

Za prelazak na novi visinski datum, nova nivelmanska mreža projektirana je prema sljedećim kriterijima (Koler i dr. 2007):

- u nivelmansku mrežu uključiti nivelmanske poligone II. NVT-a 1. reda, koji su bili mjereni do 1980. godine
- gdje je moguće, nivelmanske poligone povezati u zatvorene nivelmanske figure
- nove nivelmanske poligone treba stabilizirati u naseljenim područjima
- slijepi nivelmanski poligoni, koji povezuju apsolutne gravimetrijske točke sa slovenskom nivelmanskom mrežom, trebaju biti što kraći



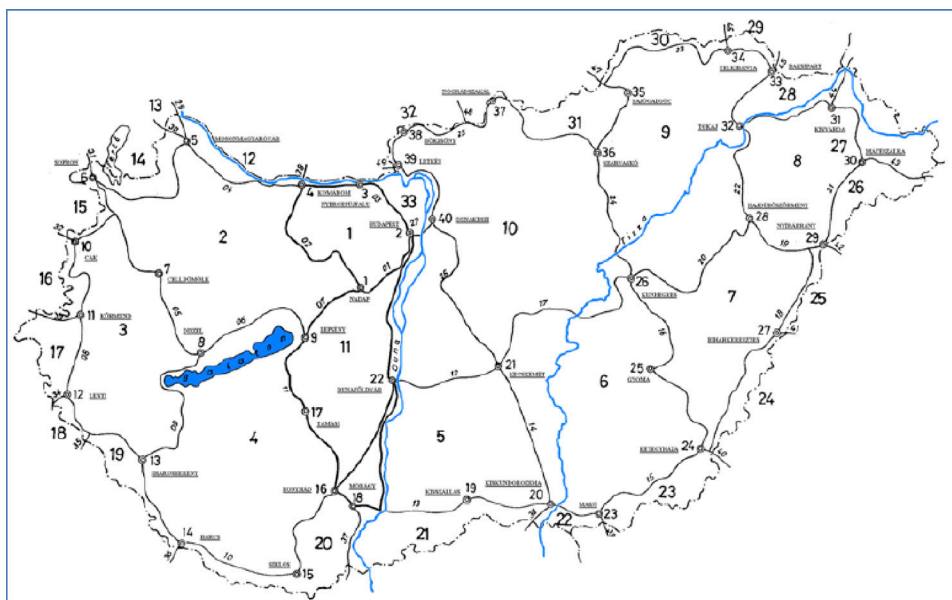
Slika 3. Brzine vertikalnih pomaka (mm/god.) na području Slovenije (Koler i dr. 2007).

- nivelmanski poligoni viših redova pokrivaju područja koja su zanimljiva za interpretaciju geodinamičkih događanja na području Republike Slovenije
- veća gustoća nivelmanske mreže potrebna je radi razvoja nivelmanskih mreža nižih redova.

Nacionalni visinski datum definirat će se na osnovi opažanja srednje morske razine mareografa u Kopru. Osnova je gravimetrijskih mjerenja gravimetrijska mreža I. reda, koju čini 29 točaka (u projektu uspostave mreže sudjelovao je Hrvatski geodetski institut). Osim nivelmanske i gravimetrijske mreže potrebno je izvesti i GNSS mjerenja. Naime, mreža gravimetrijskih točaka I. reda, zajedno s EUVN točkama i ostalim odgovarajućim točkama, koja bi se poslije progustila GNSS/nivelmanskim mjerenjima na reperima, omogućila bi u prvoj fazi kvalitetni uklop geoida (kvazigeoida) u visinsku mrežu. U završnoj fazi uslijedilo bi vezanje visinskog sustava na EVRS.

3.3. Visinski sustav u Mađarskoj

Prva nivelmanska mjerenja koja su prekrivala čitavu Mađarsku započeta su u vrijeme Austro-Ugarske Monarhije (1873–1913). Početni fundamentalni reper u Nadapu, koji je referentna točka za sve visinske sustave u Mađarskoj, datira iz tog doba. S obzirom na burnu prošlost realizirane su dvije dodatne mreže nakon I. i II. svjetskog rata. Prva mreža (1921–1944) bila je definirana u odnosu na Jadransko more, a od 1960. u upotrebi je visinski sustav definiran u odnosu na Baltičko more. S obzirom na to razlika između tih sustava je 0,675 m. Mreža I. reda (slika 4) dovršena je sedamdesetih godina prošlog stoljeća, kada je započeto progušćivanje točkama II. i III. reda. Uspostava cijele mreže trajala je gotovo 40 godina (1968–2006).



Slika 4. Mađarska nivelmanska mreža I. reda (Adam 2007).

Nacionalni visinski sustav u Mađarskoj (EOMA) primjenjuje normalne visine definirane u odnosu na srednju morskou razinu Baltičkog mora mjerenu u Kronstadtu (fundamentalni reper u Nadapu s nadmorskom visinom od $H=173,1638$ m u odnosu na Baltičko more).

EOMA se sastoji (Adam 2007):

- od 41 fundamentalnog repera
- 5981 točke I. reda
- 5096 točaka II. reda
- 13 417 točaka III. reda (određene GNSS/nivelmanom)
- 23 vlaka spojena sa susjednim zemljama.

Od 1998. godine uvedena je GNSS/nivelmanska izmjera koja zamjenjuje klasična nivelmanska mjerenja mreže III. reda. Pritom se nadmorske visine točaka III. reda određuju iz GNSS elipsoidnih visina i geoida definiranog na osnovi GNSS/nivelmanskih točaka II. reda (standardno odstupanje visina od 5 mm), čime se znatno ubrzava i pojeftinjuje određivanje visina repera. Na osnovi prvih dobrih iskustava tehnika se poslije primjenjivala na području cijele države radi integriranja GNSS/nivelmanske mreže s budućim GNSS aplikacijama za određivanje visina (Adam 2007). Od 1994. godine EOMA je spojena s mrežom UELN-a, a 1997. Mađarska je sudjelovala u EUVN kampanji.

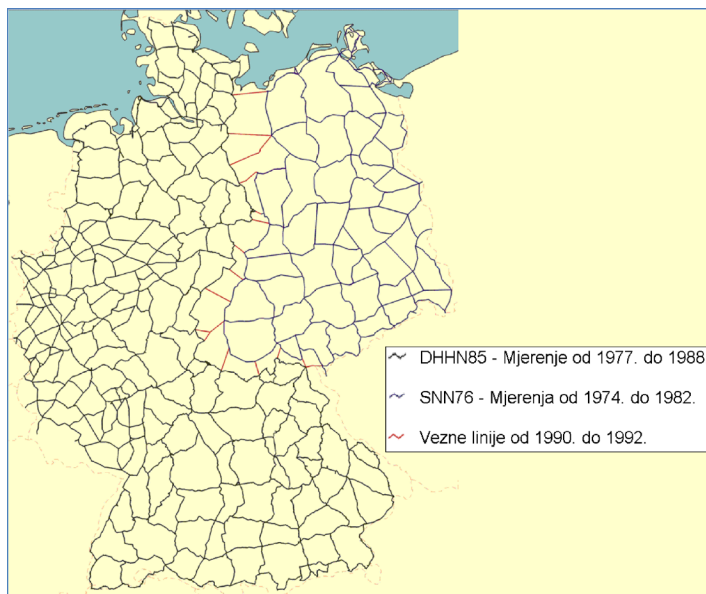
Zbog sve veće upotrebe GNSS mreža, radi definiranja preciznijega geoida, u razdoblju od 2007. do 2012. provest će se ponovna nivelmanska izmjera mreže I. reda pomoću digitalnih nivelira istog tipa, koje treba ispitati prije i nakon mjerenja (Zrinjski i dr. 2010) te simultano obaviti gravimetrijska mjerenja. Na točkama koje su za to pogodne (oko 600 točaka) obaviti će se GNSS mjerenja (12 sati statičkih

opažanja), ako je moguće u približno isto vrijeme kad i nivelmanska mjerenja. Krajnji rezultat (EOMA_3D), osim nove nivelmanske, bit će i prostorna (GNSS) mreža i model geoida pogodan za praktičnu upotrebu. Zbog ekonomske situacije teško je predvidjeti kada će projekt biti završen. EOMA_3D mreža zajedno s mrežom referentnih GNSS stanica (GNSSnet.HU) činit će referentnu osnovu Mađarske (Busics i Agfalvi 2009).

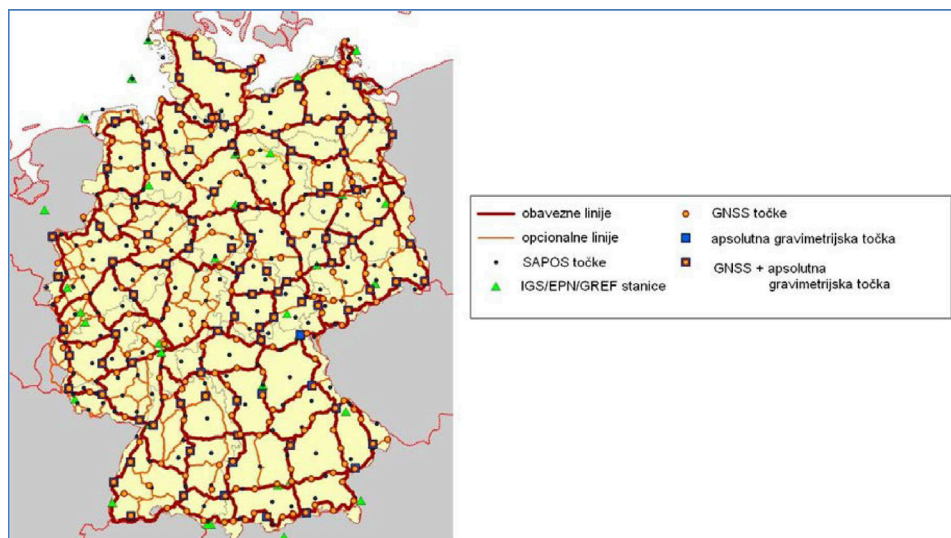
3.4. Visinski sustavi u Njemačkoj

Visinski sustav u Njemačkoj realiziran je preko DHHN92 (German height reference system 1992), uspostavljen nakon ujedinjenja (slika 5). Veza između visinskih sustava Istočne i Zapadne Njemačke uspostavljena je na osnovi 16 nivelmanskih veznih linija u razdoblju od 1990. do 1992. godine. Sastoji se od 757 nivelmanskih poligona, ukupne dužine od 30 908 km, 287 figura i 469 čvornih točaka. Visine su izražene u normalnom sustavu visina u odnosu na NAP datum (Normaal Amsterdams Peil), definiran preko geopotencijalne visine točke 3614/5 (crkva u Wallenhorstu) (URL 2).

Integracija mjerenja iz triju različitih epoha (SNN76 1974–1982, DHHN85 1977–1988, veznih linija 1990–1992) dovela je do distorzija unutar mreže, zbog čega je 2005. godine donesena odluka o obnovi DHHN mreže u razdoblju od 2006. do 2011. godine. Do 2008. izmjereno je 21 000 km linija, što odgovara 80% DHHN92 mreže (slika 6). Simultano su obavljena i GNSS mjerenja (oko 250 točaka; statička mjerenja 2x24 h) i apsolutna gravimetrijska mjerenja (oko 100 točaka). Obrada nivelmanskih mjerenja obaviti će se neovisno u 2 centra (državni geodetski ured Nordrhein-Westfalen i BKG).



Slika 5. Njemačka visinska mreža DHHN92 (URL 2).



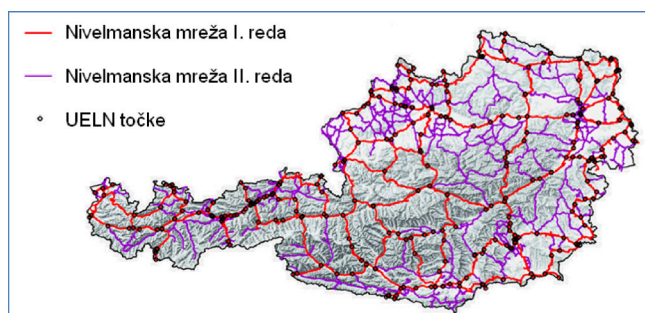
Slika 6. *Obnova njemačkog visinskog sustava (URL 2).*

Ciljevi su modernizacije njemačkog visinskog sustava (URL 2):

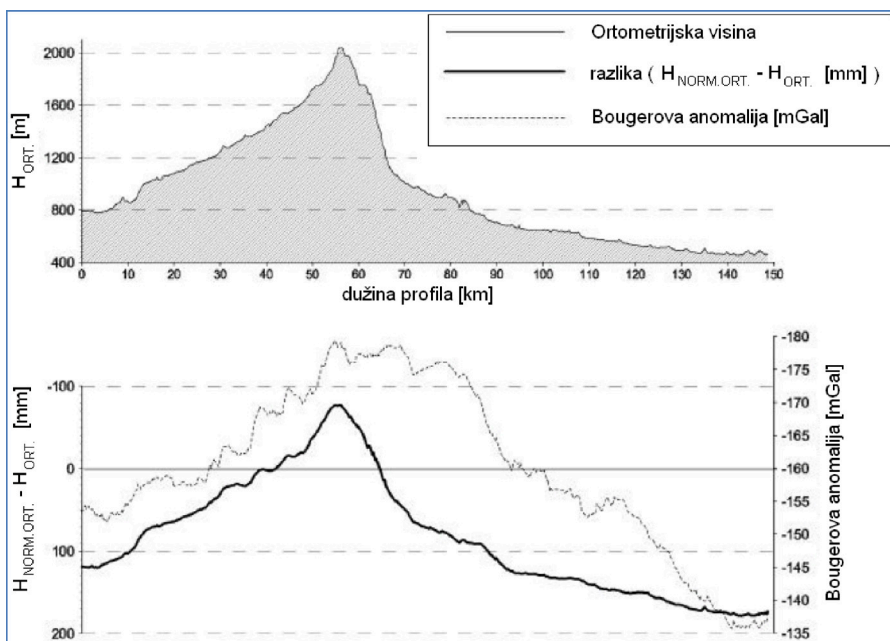
- verifikacija službenog visinskog sustava DHHN92 radi definiranja neotkrivenih pogrešaka visina
- integracija DHHN-a u budući položajni referentni sustav
- kombinacija s GNSS mjerenjima u svrhu modeliranja geoida
- definiranje skupa podataka za različita znanstvena istraživanja (npr. praćenje vertikalnih pomaka Zemljine kore).

3.5. Visinski sustav u Austriji

Krajem 19. st. Vojno-geografski institut u Beču organizirao je prva sustavna nivelmanska mjerenja na području tadašnje Austro-Ugarske Monarhije. Ti su podaci korišteni za definiranje prvoga visinskog sustava, koji su činile normalne



Slika 7. *Visinska mreža u Austriji (Höggerl 2004).*



Slika 8. Razlike između novoga i staroga visinskog sustava u Austriji (Höggerl 2004).

ortometrijske visine. Ishodišni reper definiran je na osnovi jednogodišnjih mareografskih opažanja u Trstu.

U novije vrijeme počeo se uvoditi novi fizikalni sustav visina baziran na ortometrijskim visinama, podijeljen na mrežu I. i II. reda (slika 7). Za otprilike 30 000 repera određenih preciznim nivelmanom izračunane su geopotencijalne kote koje su poslužile za definiranje ortometrijskih visina, ali i normalnih visina ako je potrebno. Osim nivelmanskih izračunane su geopotencijalne kote i za trigonometrijske točke koje zajedno čine referentni ortometrijski sustav visina. Na slici 8 prikazana je razlika između novoga i staroga visinskog sustava na primjeru jednog nivelmanskog poligona u najzapadnijoj austrijskoj provinciji Vorarlberg. Maksimalna topografska visinska razlika iznosi 1589 m, a najveća razlika između staroga i novoga visinskog sustava 255 mm (Höggerl 2004).

4. Europski visinski referentni sustav (EVRS)

Da bi se osigurala homogenost visinskih podataka na području Europe, potrebno je uskladiti nacionalne visinske sustave s europskim visinskim referentnim sustavom EVRS (*European Vertical Reference System*). Na temelju uspješne realizacije paneuropskih visinskih projekata UELN (*United European Levelling Network*) i EUVN (*European Vertical Reference Network*), komisija EUREF-a prihvatila je EVRS kao fizikalni visinski sustav, koji je definiran sukladno sljedećim konvencijama (URL 3):

- vertikalni datum definiran je kao ekvipotencijalna ploha za koju je potencijal ubrzanja sile teže konstantan $W_0 = konst.$ te je vezan uz vertikalni datum Normal Amsterdams Peil (NAP)
- visine točaka izražene su preko razlika potencijala Zemljina polja ubrzanja sile teže ΔW_p u točkama P i potencijala nulte plohe EVRS-a.

Razlika potencijala označava se kao geopotencijalna visina (C_p):

$$-\Delta W_p = W_0 - W_p = C_p. \quad (2)$$

Normalne visine ekvivalentne su geopotencijalnim visinama.

S obzirom na Zemljine plimne valove, uzrokovane gravitacijskim silama Mjeseca i Sunca, a koje izazivaju trajne deformacije Zemljine kore, EVRS je "zero-tidal" sustav. To znači da su iz mjerenja ubrzanja sile teže odstranjeni direktni utjecaji Sunca i Mjeseca, ali su zadržani utjecaji deformacija kao posljedica elastičnosti Zemlje.

Tehnička komisija predložila je 2007. godine novu realizaciju EVRS-a (EVRS2007) kao poboljšanu verziju prethodne EVRS2000. Pritom je tendencija da se ne mijenjaju vrijednosti visina (EVRF2000) ako to nije potrebno, dok se transformacijski parametri između EVRS-a i nacionalnih referentnih visinskih sustava trebaju aktualizirati i specificirati s većom točnošću.

Budući da je EVRS2007 realiziran preko geopotencijalnih visina određenih niveliranjem ili korištenjem geopotencijalnih modela i 3D koordinata, te nema direktnu vezu s referentnim elipsoidom, definiranje referentnog elipsoida nije dio EVRS konvencija. Ipak, za konvertiranje geopotencijalnih visina u normalne visine, potrebno je poznavati normalno polje ubrzanje sile teže i geodetsku širinu.

Normalno polje ubrzanja sile teže na elipsoidu GRS80 računano je korištenjem formule (Moritz 1980):

$$\gamma_0 = 9,783\,267\,715 (1 + 0,005\,279\,0414 \sin^2 \varphi + 0,000\,023\,2718 \sin^4 \varphi + 0,000\,000\,1262 \sin^6 \varphi + 0,000\,000\,0007 \sin^8 \varphi) \text{ ms}^{-2}, \quad (3)$$

gdje je φ u ETRS89.

Normalne visine H_p računaju se po formuli:

$$H_p = \frac{C}{\bar{\gamma}}. \quad (4)$$

Pritom je $\bar{\gamma}$ prosječna vrijednost normalnog ubrzanja sile teže duž normalne težišnice između elipsoida i teluroida računata po formuli (Moritz 1980):

$$\bar{\gamma} \approx \bar{\gamma}_H = \gamma_0 \left[1 - (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{H}{a} + \frac{H^2}{a^2} \right] \quad (5)$$

gdje je H aproksimativna vrijednost za H_p (Ihde i dr. 2008), a je velika poluos elipsoida, f i m su numeričke vrijednosti ostalih konstanti (URL 4).

5. Povezivanje visinskog sustava Republike Hrvatske sa susjednim državama

Obnavljanje visinskog sustava, polja repera normirane gustoće i nivelmanskih mreža geometrijskog nivelmana periodičan je proces sa svrhom da se u svakom trenutku različitim korisnicima osigura kvalitetan, pouzdan i ažuran visinski sustav. Obnova temeljne mreže geometrijskog nivelmana u Republici Hrvatskoj naslanja se na vlakove II. NVT-a uzimajući u obzir nove geopolitičke odnose u regiji zbog čega je nužno projektiranje novih nivelmanskih poligona s obzirom na teritorijalni oblik države. Budući da Hrvatskoj predstoji obnova referentnog visinskog sustava, svrha je ovog rada istražiti apriori utjecaj nivelmanskih vlakova u susjednim državama na kvalitetu temeljne nivelmanske mreže Republike Hrvatske.

Republika Hrvatska ima specifičan oblik pa je ustroj nivelmanske mreže koja se ograničava samo na nivelmanske poligone ili figure definirane na nacionalnom državnom teritoriju teško moguće, tj. nemoguće je primijeniti znanstveno-stručne standarde jer ne postoji nivelmanska mreža u klasičnom smislu. Specifičan oblik države posljedično vodi k razmjeni podataka sa susjednim državama kako bi se osiguralo da temeljna nivelmanska mreža sastavljena od nivelmanskih poligona ima što bolju geometriju. U tu svrhu nužna će biti razmjena podataka ili pokretanje zajedničkih projekata s državama u susjedstvu, a primarno se to odnosi na Bosnu i Hercegovinu (Grgić i dr. 2012), te po potrebi na Crnu Goru i Sloveniju. Osim razmjene podataka nakon provedene nivelmanske izmjere (zajedničkih projekata), nužno će biti dodatno povezati nacionalni visinski sustav s visinskim sustavima ostalih susjednih država.

Države koje su imale sličan problem kao Republika Hrvatska koristile su se u modelu izjednačenja nacionalne nivelmanske mreže svim podacima koje su imale na raspolaganju od susjednih država te su na taj način bitno poboljšale konfiguraciju mreže pa su posljedično imale bitno bolje statističke pokazatelje sadržane u ocjeni točnosti. Republika Austrija je imala gotovo identičan problem u zapadnom dijelu države pa je bila upućena na razmjenu podataka sa Švicarskom i Italijom (Höggerl 1986).

6. Zaključak

Referentni visinski sustavi u europskim državama definirani su u odnosu na jedan ili više mareografa koji se nalaze na različitim lokacijama na oceanima i morima i pritom su u različitim državama uvođene normalne, ortometrijske ili normalne ortometrijske visine u državnu nivelmansku mrežu. U svrhu osiguranja homogenosti visinskih podataka na području Europe većina europskih država uskladila je nacionalne visinske sustave s europskim visinskim referentnim sustavom temeljem uspješne realizacije paneuropskih visinskih projekata UELN i EUVN.

Komparativna analiza visinskih sustava u nekim europskim zemljama pokazuje da je u Europi dominantan sustav normalnih visina. Ortometrijski sustav visina primjenjuje se većinom u državama koje bilježe veće iznose u vertikalnom pomaku Zemljine kore (npr. Austrija, Švicarska, Italija), ali se i one za međunarodnu razmjenu podataka koriste geopotencijalnim i normalnim visinama. Imajući u vidu tu činjenicu, Republika Hrvatska će se u procesu obnove visinskoga referentnog sustava odlučiti najvjerojatnije za jedan od ta dva sustava visina. Birajući ortometrijski sustav visina, izabrat će sustav visina koji je u ovom trenutku komplementaran nekim

susjednim državama, a birajući normalni sustav visina izabrat će sustav visina koji olakšava komunikaciju u cjelokupnom europskom geodetskom prostoru. Osim toga, neke od susjednih država, npr. Srbija, već su prešle na normalni sustav visina.

Republika Hrvatska ima zastarjele visinske podatke te je zbog toga potrebno ažuriranje stanja kako bi se u bliskoj budućnosti zahvaljujući i tim podacima stvorile pretpostavke za kreiranje takvog modela geoida koji bi, kao u nekim europskim državama, bio osnova za zamjenu geometrijskog nivelmana GNSS nivelmanom, čime bi se također stvorile pretpostavke za racionalizaciju održavanja državne nivelmanske mreže nižih redova. Obnovom visinskog referentnog sustava Republike Hrvatske stvorit će se temelji za modernu visinsku osnovu Republike Hrvatske.

Literatura

- Adam, J. (2007): Hungarian National Report on IAG 2003–2006., *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Vol. 42, No. 2, 141–167.
- Bilajbegović, A., Mulić, M., Omićević, Dž., Tuno, N., Vrce, E., Ključanin, S. (2008): Studija o nivelmanu visoke točnosti (NVT) Bosne i Hercegovine – Obnova i djelimično ponavljanje drugog nivelmana visoke točnosti (II NVT iz 1973), Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet, Institut za geodeziju i geoinformatiku, Sarajevo.
- Bleek, A., Krischker, R. (2006): Untersuchungen zur Höhenbestimmung in den amtlichen Nivellementsnetzen Brandenburgs, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin, Berlin.
- Busics, G., Agfalvi, M. (2009): The New Role of Geodetic Networks in Hungary, 7th FIG Regional Conference, Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity, 19–22 October 2009, Hanoi, Vietnam.
- Feil, L., Rožić, N. (2000): UELN geopotencijalni i normalni visinski sustav Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Feil, L., Rožić, N. (2003): Izrada dokumentacije neophodne za usvajanje službenog visinskog datuma Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Grgić, I., Lučić, M., Bašić, T. (2012): Optimisation of the new Croatian fundamental levelling network, *Survey Review*, Vol. 45, No. 330, 166–173.
- Högerl, N. (1986): Die Ausgleichung des österreichischen Präzisionsnivellementnetzes, *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, Heft 4, 216–250.
- Högerl, N. (2004): National Report of Austria, EUREF 2004 Symposium, 2–4 July 2004, Bratislava, Slovakia.
- Inde, J., Mäkinen, J., Sacher, M. (2008): Conventions for the Definition and Realization of a European Vertical Reference System (EVRS), EVRS conventions.
- Koler, B., Medved, K., Kuhar, M. (2007): Towards a new height system in Slovenia, *Geodetski Vestnik*, Vol. 51, No. 4, 777–792.
- Marti, U. (2003): Projekt LHN95: Der Übergang zwischen den Höhenrahmen LN02 und LHN95, Anpassungen und weitere Testberechnungen, *swisstopo Report 03-10 (B)*, Bundesamt für Landestopografie.
- Moritz, H. (1980): Geodetic reference system 1980, *Bulletin géodésique*, Vol. 54, No. 3, 395–405.

- Rožić, N. (2001): Studija o obnovi i održavanju visinskog sustava Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Rožić, N. (2004): Changes of bench mark heights being the consequence of introducing the new Croatian height system, paper presented at the EUREF Symposium in Bratislava, 2–5 June 2004.
- Rožić, N., Bašić, T. (2013): Studija obnove mreže nivelmana visoke točnosti Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Schlatter, A. (2006): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95, Dissertation, Zürich.
- SG RS (2012): Pravilnik za osnovne geodetske radove, Službeni glasnik Republike Srbije, broj 19/12, Beograd.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Razumović, I. (2010): Automatizacija ispitivanja preciznosti nivelira i umjeravanja invarnih nivelmanskih letvi, Geodetski list, 64 (87), 4, 279–296.

Mrežne adrese

URL 1: Coordinate Reference Systems in Europe, <http://www.crs-geo.eu>, (3. 3. 2015.).

URL 2: The German Height Reference System, http://www.bkg.bund.de/nn_167860/EN/FederalOffice/Geodesy/RefSys/NatRefHeight/EN_Height02_node.html_nnn=true, (3. 3. 2015.).

URL 3: EVRS – European Vertical Reference System, <http://www.bkg.bund.de/evrs>, (15. 2. 2015.).

URL 4: Geodetic Reference System 1980, https://www.fc.ul.pt/sites/default/files/fcul/dep/dqb/doc/GRS80_Moritz.pdf, (9. 4. 2015.).

Height Systems in some European Countries

ABSTRACT. Renewal of the system is a recurrent process that is designed to continuously provide consumers with a variety of high quality, reliable and up to date height information. Due to outdated height data the Republic of Croatia imminent renewal of height reference system. The aim of this paper is to investigate how some European countries to address this problem and to present in a clear manner height systems in the wider surroundings. During the renewal of basic geometric levelling network in the Republic of Croatia will have to take into account the fact that on the territory of the former common state were created new states, the need to adopt a new height system (normal or orthometric) and the importance of levelling lines in neighbouring countries for the network configuration.

Keywords: height systems, geometric levelling, network configuration.

Primljeno: 2015-03-05

Prihvaćeno: 2015-04-11