

DOLOČITEV VIŠINSKE TRANSFORMACIJSKE PLOSKVE NA OBMOČJU VZHODNE SLOVENIJE

DETERMINATION OF THE HEIGHT TRANSFORMATION SURFACE IN AN AREA OF EASTERN SLOVENIA

Božo Koler, Tilen Urbančič, Žiga Kobale

UDK: UDK: 528.38(497.4)

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 30.5.2022

Sprejeto: 30.8.2022

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2022.03.351-366

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 30.5.2022

Accepted: 30.8.2022

IZVLEČEK

V prispevku smo analizirali kakovost transformacije višin med starim višinskim sistemom SVS2000 (višinski datum Trst) in novim višinskim sistemom SVS2010 (višinski datum Koper). Na podlagi razlik višin reperjev, ki so stabilizirani na območju vzhodne Slovenije, v starem in novem višinskem sistemu smo določili višinsko transformacijsko ploskev za različno veliki območji. Za obe smo analizirali vpliv različnih interpolacijskih metod in vpliv uporabe razlik višin reperjev različnih redov nivelmanske mreže. Ugotovili smo, da je kakovost transformacije višin zadovoljiva za večino geodetskih storitev. Kakovost transformacije višin na podlagi povprečne razlike višin reperjev smo analizirali tudi s programom SiVis, ki je sicer namenjen transformaciji elipsoidnih višin, pridobljenih z GNSS-višinomerstvom, med starim in novim višinskim sistemom.

ABSTRACT

In this work, we analyzed the quality of height transformation between the old height system SVS2000 (vertical datum Trieste) and the new height system SVS2010 (vertical datum Koper). Based on the height differences of the benchmarks between the old and the new height systems stabilised in the area of eastern Slovenia, we determined the height transformation surface for two areas of different sizes. For both areas we analyzed the influence of different interpolation methods and the influence of using height differences of benchmarks of different orders of the levelling net. We found that the quality of height transformation is satisfactory for most surveying services. We have also analyzed the quality of the height transformation based on the average height difference of the benchmarks by using the SiVis software, which is intended for the transformation of ellipsoidal heights obtained by GNSS measurements, between the old and the new height systems.

KLJUČNE BESEDE

višinska transformacijska ploskev, višinski sistem, višinski datum, interpolacija, povprečna višina, SiVis

KEY WORDS

height transformation surface, height system, vertical datum, interpolation, average height, SiVis software

1 UVOD

V Sloveniji je do konca leta 2018 veljal star višinski sistem z oznako SVS2000, ki je temeljil na višinskem datumu Trst. Na podlagi izmere nove nivelmanske mreže 1. reda Slovenije je bil uveden nov višinski sistem z oznako SVS2010 (Koler et al., 2019; Uredba, 2018), ki temelji na višinskem datumu Koper (Sterle in Koler, 2019). Na območju Slovenije razlika višin med višinskima sistemoma SVS2010 in SVS2000 ni konstantna, ampak so spremembe v razponu od 1,4 do 30,8 centimetra (Medved et al., 2020). To pomeni, da transformacija med višinskima sistemoma ni enostavna. Trenutno nimamo enotnega državnega modela višinske transformacije. Transformacije višin lahko naredimo z upoštevanjem in analizo razlik višin med obema sistemoma na nekem območju. Mogoča je tudi enostavnejša transformacija višin točk, ki temelji na razliki obeh uporabljenih višinskih referenčnih ploskev (modelov geoida oziroma kvazigeoida) pri uporabi tako imenovane metode GNSS-višinomerstva. To transformacijo lahko naredimo s programom SiVis (Medved et al., 2020).

Cilj raziskave je določitev višinske transformacijske ploskve (VTP) na večjem in manjšem območju. Analizirali smo vpliv kakovosti nadmorskih višin reperjev ter vpliv interpolacijskih metod na izdelavo VTP. Uporabili smo podatke višin reperjev v obeh višinskih sistemih, zbrane v bazi geodetskih točk, ki jo vodi Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS). Kakovost VTP smo preverili na večjem testnem območju vzhodne Slovenije in manjšem na območju Ižakovcev (Pomurje) s transformacijo višin reperjev nižjih redov, katerih višine so določene v starem in novem višinskem sistemu. Prav tako smo preverili kakovost transformacije na podlagi povprečne razlike višin reperjev na izbranem območju. Analizirali bomo torej kakovost transformacije višin z različnimi metodami in jih primerjali med seboj. Preverili bomo tudi, kako se te transformacije ujemajo z rezultati, ki jih dobimo s programom SiVis, ob zavedanju, da je ta transformacija namenjena le za višine, določene z GNSS-višinomerstvom (Medved et al., 2020; GURS, 2020).

2 TESTNO OBMOČJE ZA IZDELAVO VIŠINSKE TRANSFORMACIJSKE PLOSKVE

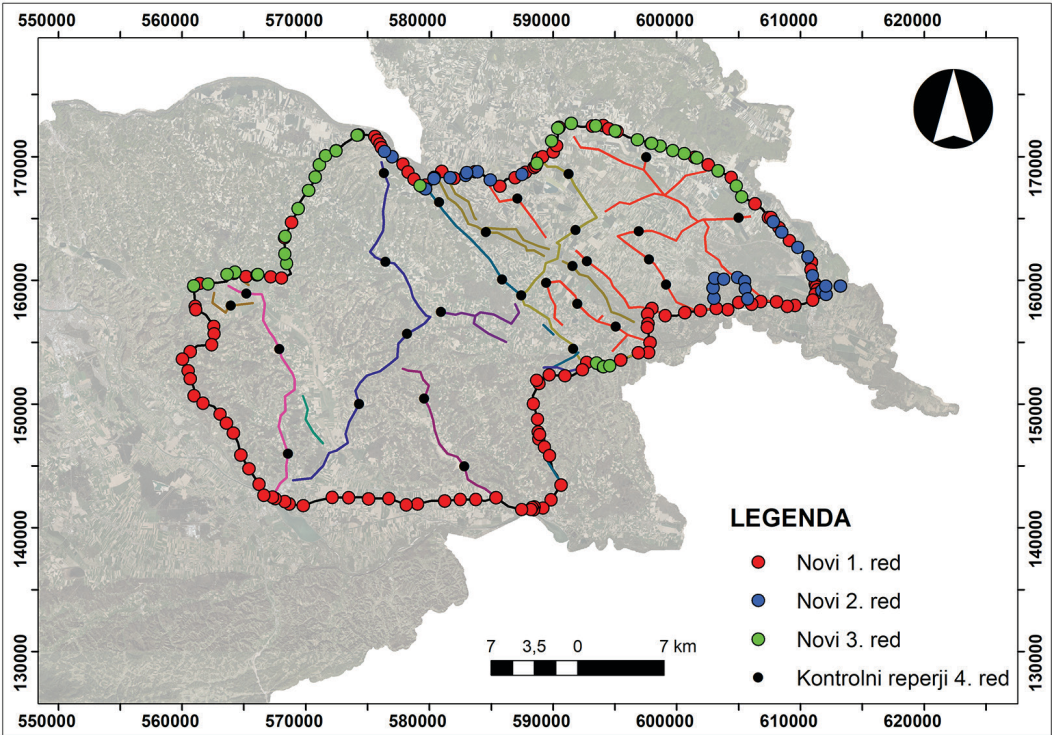
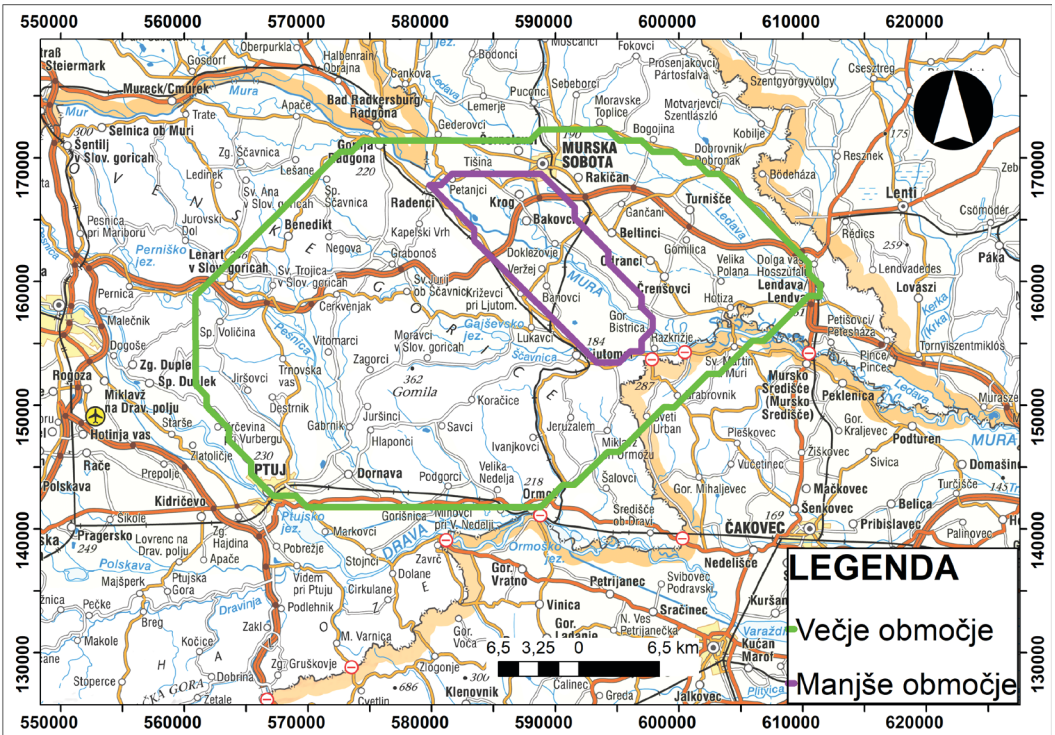
VTP smo izdelali za večje in manjše območje (slika 1), saj nas je zanimalo, kako velikost območja vpliva na kakovost izdelave VTP oziroma transformacijo višin. Na podlagi razlik višin reperjev od 1. do 3. reda lahko izdelamo različne VTP, ki nam omogočajo oceno vpliva vključevanja nivelmanskih reperjev različnih redov in natančnosti na izdelavo VTP in transformacijo višin. Razlike višin reperjev 4. reda, ki predstavljajo referenčno vrednost, smo uporabili za oceno kakovosti transformacije višin na podlagi VTP na navedenih območjih.

2.1 Večje območje v vzhodni Sloveniji

Podatke o nadmorski višini reperjev v SVS2010 in SVS2000 smo dobili iz spletne aplikaciji GURS (PREG, 2019). VTP smo izdelali na območju vzhodne Slovenije, na katerem je stabiliziranih veliko reperjev v različnih redovih nivelmanskih poligonov (slika 2). Iz slike 2 vidimo, da smo uporabili razlike višin reperjev v nivelmanski mreži 1. reda (133), 2. reda (29) in 3. reda (34). Za kontrolne reperje, ki

Slika 1; stran 353 zgoraj: Prikaz večjega in manjšega območja v vzhodni Sloveniji (vir podlage: DPK 500, GURS).

Slika 2; stran 353 spodaj: Prikaz uporabljenih reperjev na večjem območju v vzhodni Sloveniji (vir podlage: DOF050).



ležijo v nivelmanski zanki 1. reda številka 13, smo uporabili 29 reperjev 4. reda. Tako lahko podrobneje analiziramo vpliv kakovosti oziroma natančnosti višin reperjev na modeliranje VTP.

V preglednici 1 prikazujemo podatke o številu nivelmanskih poligonov različnih redov na testnem območju in povprečne vrednosti ocene natančnosti določitve nadmorskih višin reperjev, ki so pridobljene iz izravnave nivelmanske mreže 1. reda Slovenije in preračuna nivelmanskih poligonov nižjih redov (a-posteriori ocena natančnosti). Nivelmanski poligoni, ki so bili vključeni v raziskavo, so dostopni v Kobale (2021).

Preglednica 1: Število nivelmanskih poligonov različnih redov in povprečne vrednosti ocene natančnosti določitve nadmorskih višin reperjev, ki so bili vključeni v izdelavo VTP in analizo kakovosti.

Red nivelmanskega poligona	Število nivelmanskih poligonov	Razpon σ_H [mm]	$\overline{\sigma_H}$ [mm]
1	3	2,96–3,81	3,49
2	5	0,55–2,90	2,05
3	16	0,17–6,31	2,53
4	10	1,30–12,72	6,38

Nivelmanski poligoni 1. reda (N1-13-A, Hrastovec–Murska Sobota–Lendava), N1-13-B (Lendava–Ljutomer–Ormož–Ptuj) in (N1-12/13, Ptuj–Hrastovec) so bili izmerjeni v letih 2013 in 2014. Nivelmanski poligoni 2., 3. in 4. reda so stari nivelmanski poligoni, ki so bili izmerjeni v letih od 1950 do 1971 in so bili preračunani v SVS2010 na podlagi starih izmerjenih višinskih razlik.

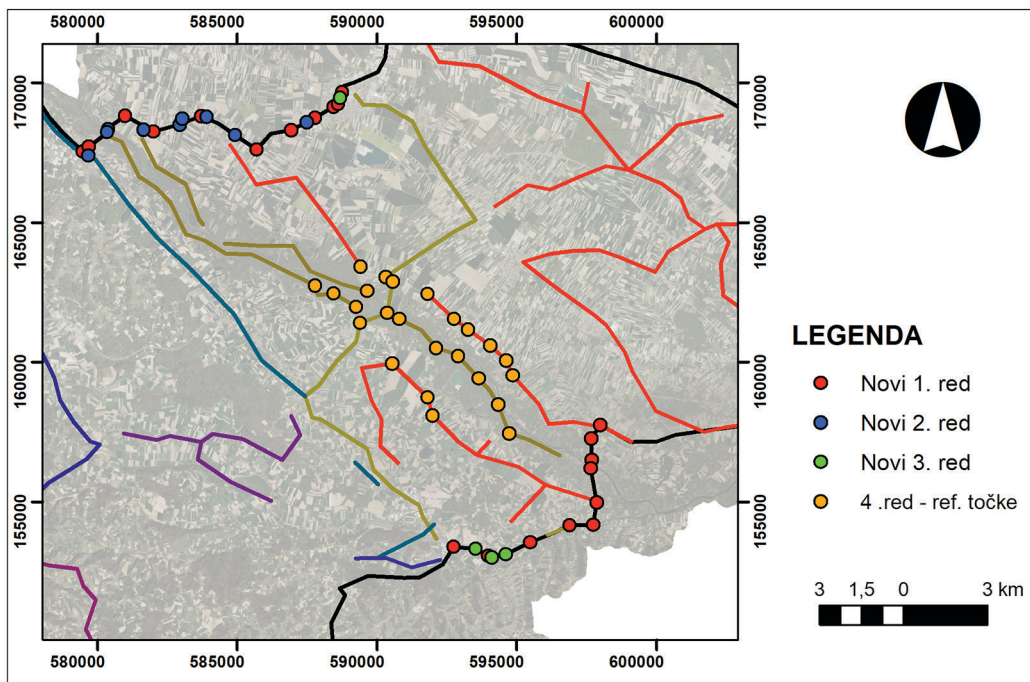
Povprečne vrednosti ocene natančnosti določitve nadmorskih višin za reperje 1. reda znašajo med 2,96 mm (N1-12/13) in 3,81 mm (N1-13-A) oziroma 3,49 mm za vse nivelmanske poligone, vključene v nivelmansko mrežo 1. reda. Natančnost določitve nadmorskih višin reperjev je določena iz izravnave celotne nivelmanske mreže 1. reda Slovenije, z navezavo na fundamentalni reper FR-1049, zato so povprečne vrednosti natančnosti določitve višin pričakovane (Koler et al., 2019).

Ocene natančnosti določitve nadmorskih višin reperjev nivelmanskih poligonov nižjih redov so bile določene z izravnavo nivelmanskega poligona z navezavo na dane reperje, katerih natančnost v oceni natančnosti izravnanih reperjev ni upoštevana. Zato so za posamezne nivelmanske poligone nižjih redov povprečne vrednosti ocene natančnosti nadmorske višine reperja bistveno manjše kot ocene za nivelmanske poligone 1. reda (preglednica 1). Za reperje 2. reda, vključene v to raziskavo, znaša povprečna vrednost ocene natančnosti višin 2,05 mm. Reperji 3. reda imajo povprečno oceno natančnosti višin 2,53 mm. Za reperje 4. reda, ki so stabilizirani znotraj testnega območja in so bili vključeni v analizo kakovosti VTP, pa znaša povprečna vrednost natančnosti višin 6,38 mm. Če primerjamo povprečne ocene natančnosti določitve nadmorskih višin reperjev nižjih redov, lahko ugotovimo, da so rezultati pričakovani, saj ima vsak nižji red slabšo natančnost in večji razpon kot predhodni red nivelmanskih poligonov.

2.2 Manjše območje v Pomurju

Za primerjavo kakovosti VTP smo VTP oblikovali tudi na manjšem območju (slika 3). Zanimalo nas je, kakšna je kakovost transformacije višin z VTP, ki je izdelana na podlagi manjšega števila podatkov, na lokalni ravni. V tem primeru je bilo za izdelavo VTP uporabljenih 36 reperjev oziroma razlik višin reperjev med obema višinskima sistemoma. Od tega je bilo v interpolacijo vključenih 23 reperjev 1. reda,

9 reperjev 2. reda ter 4 reperji 3. reda. V analizo kakovosti izdelave VTP je bilo vključenih 24 reperjev 4. reda, ki ležijo v bližini izbranega območja.



Slika 3: Prikaz uporabljenih reperjev na manjšem območju v Pomurju (vir podlage: DOF050).

2.3 Izdelava višinske transformacijske ploskve (VTP)

Tridimenzionalno ploskev, ki jo dobimo z različnimi interpolacijskimi metodami, sestavlja neprekinjeno polje vrednosti po celotnem območju izdelane ploskve. Na podlagi vhodnih podatkov reperjev (e , n in H) je interpolirana ploskev predstavljena z mrežo celic enakih velikosti. Različne metode interpolacij lahko razvrstimo v dve skupini, in sicer na interpolacije na podlagi determinističnih metod ter na podlagi geostatističnih metod. Deterministične metode določajo vrednosti na podlagi vhodnih podatkov in določenih matematičnih enačb, medtem ko geostatistične metode temeljijo na statističnih modelih, ki vključujejo avtokorelacijo (Ayeni in Samuel, 2014). O posameznih metodah interpolacij in njihovi delitvi lahko več najdemo v številnih virih, na primer v Mitaš in Mitašova (1999), Johnston et al. (2001) in Grahor (2014).

Urbančič et al. (2015) so analizirali različne interpolacijske metode za modeliranje površja. Na podlagi njihove analize smo za izdelavo VTP uporabili metodo kriging (Pilz in Spöck, 2007; Arun, 2016), metodo inverzne razdalje (angl. *inverse distance*) (Hessl et al., 2007; Ayeni in Samuel, 2014) in metodo nepravilnih trikotnikov (angl. *triangulation*) (Ayeni in Samuel, 2014). VTP je bila izdelana za velikosti celične mreže 900 metrov, 2500 metrov in 5000 metrov. Pri izdelavi VTP smo kot vhodne podatke uporabili razlike nadmorskih višin reperjev med starim (SVS2000) in novim (SVS2010) višinskim sistemom 1., 2. in 3. reda nivelmanskih poligonov (preglednica 1). Interpolacijo višinskih ploskev smo izvedli v programu Surfer 12 (Golden Software, LLC).

3 REZULTATI IN ANALIZA KAKOVOSTI TRANSFORMACIJ KONTROLNIH REPERJEV NA VEČJEM OBMOČJU

Višine 29 reperjev 4. reda, ki ležijo znotraj testnega območja (slika 2), smo uporabili kot kontrolne reperje za analizo kakovosti transformacije višin iz starega v novi višinski sistem. Transformacijo višin kontrolnih reperjev smo izvedli z uporabo različnih VTP. Izdelane VTP so prikazane z barvno lestvico in izolinijami v državnem koordinatnem sistemu D96/TM na slikah od 4 do 7. Prikaz z izolinijami nam omogoča, da lahko vidimo, kako se spreminja VTP glede na uporabljene različne interpolacijske metode in uporabljene podatke razlik višin reperjev različnih redov nivelmanskih poligonov. Na vseh slikah VTP so izrisani tudi kontrolni reperji, na podlagi katerih smo ocenjevali kakovost transformacije višin z VTP.

Rezultati interpolacije višin z uporabo VTP in statistične mere so prikazani za različne uporabljene redove nivelmanskih poligonov. Analiza kakovosti VTP je bila narejena tako, da smo nadmorske višine kontrolnih reperjev 4. reda v SVS2000, ki stojijo znotraj testnega polja (slika 2), transformirali v SVS2010. Nato smo analizirali razlike med transformiranimi in preračunanymi višinami reperjev 4. reda v novem višinskem sistemu.

Kot je bilo navedeno zgoraj, smo VTP izdelali v treh različnih velikostih celice mreže (900 m, 2500 m, 5000 m). Analiza vpliva velikosti celične mreže na kakovost določitve VTP je pokazala, da velikost celične mreže ne vpliva bistveno na kakovost VTP oziroma transformacijo višin iz SVS2000 v SVS2010 (Kobale, 2021). V prispevku so prikazani le rezultati in analiza VTP za velikost celične mreže 900 m. Vsi ostali rezultati in analize so dostopni v Kobale (2021).

3.1 Grafična predstavitev rezultatov VTP, določene na podlagi razlik višin reperjev različnih redov na večjem območju

a) Grafična predstavitev VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. reda

Za posamezno uporabljeno interpolacijsko metodo so rezultati izdelave VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. reda prikazani na sliki 4.

S slike 4 vidimo, da so VTP, določene z različnimi metodami interpolacije, različne. VTP, interpolirana z metodo nepravilnih trikotnikov, je po podrobnosti poteka izolinij podobna metodi kriging, odstopa pa glede na obliko izolinij.

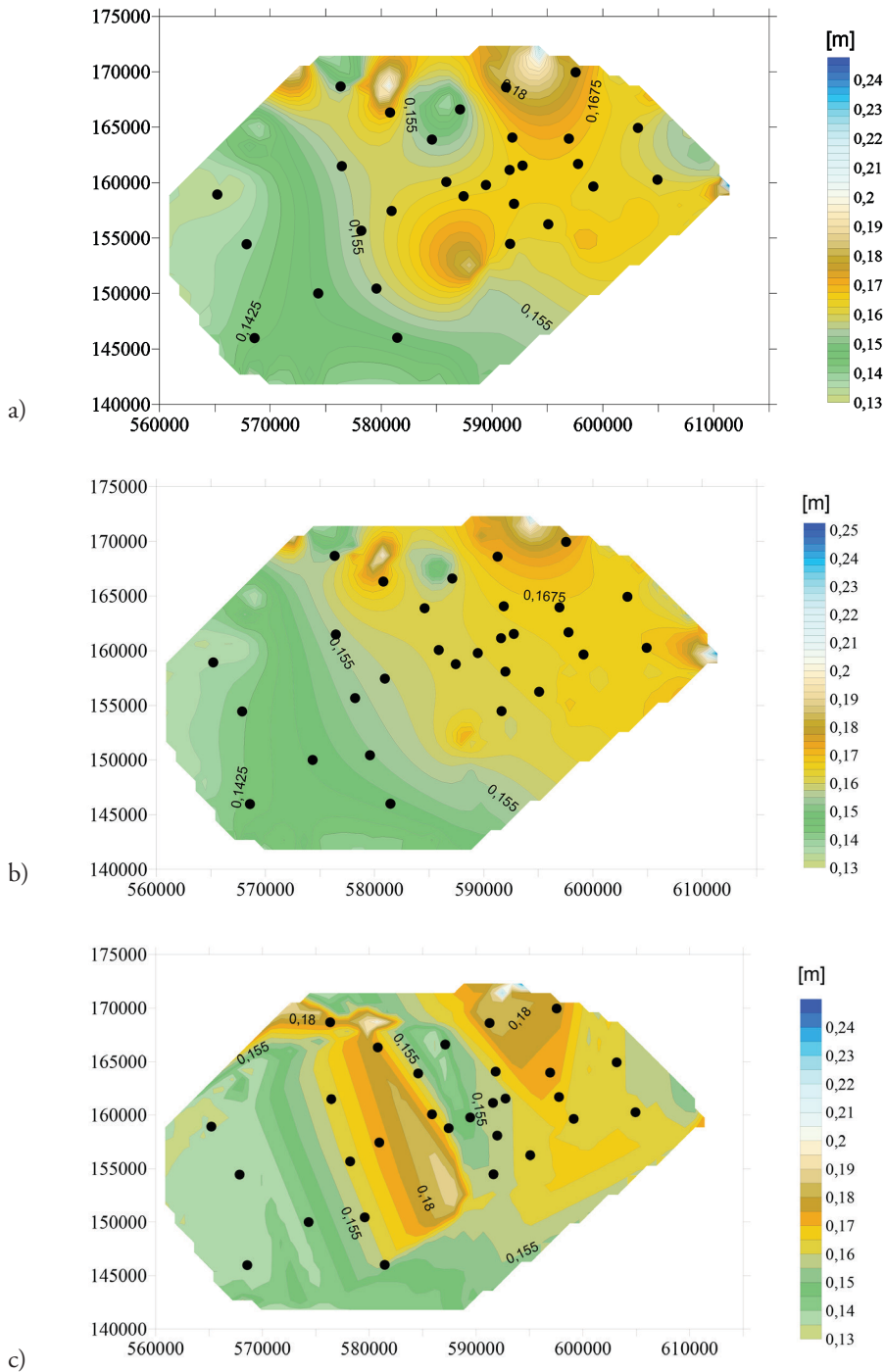
b) Grafična predstavitev VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. in 2. reda

V postopek izdelave VTP, poleg reperjev 1. reda, vključimo še razpoložljive podatke reperjev 2. reda. Izdelane VTP so prikazane na sliki 5.

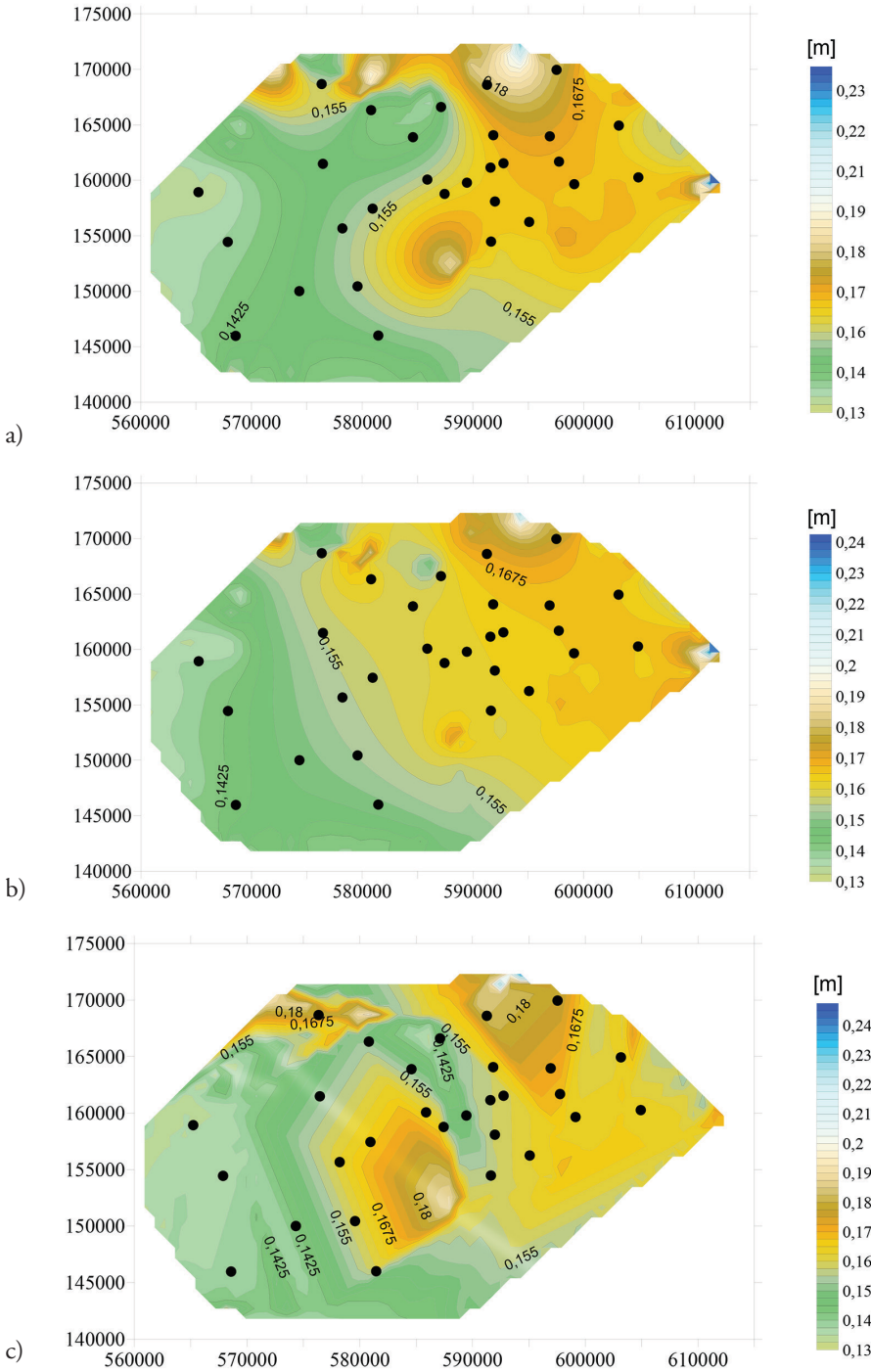
S slike 5 vidimo, da so tudi v tem primeru VTP, določene z različnimi metodami interpolacije, različne. Vse VTP so podobne ploskvam, ki so določene na podlagi odstopanj reperjev 1. reda (slika 4).

c) Grafična predstavitev VTP na podlagi razlik višin reperjev 1., 2. in 3. reda

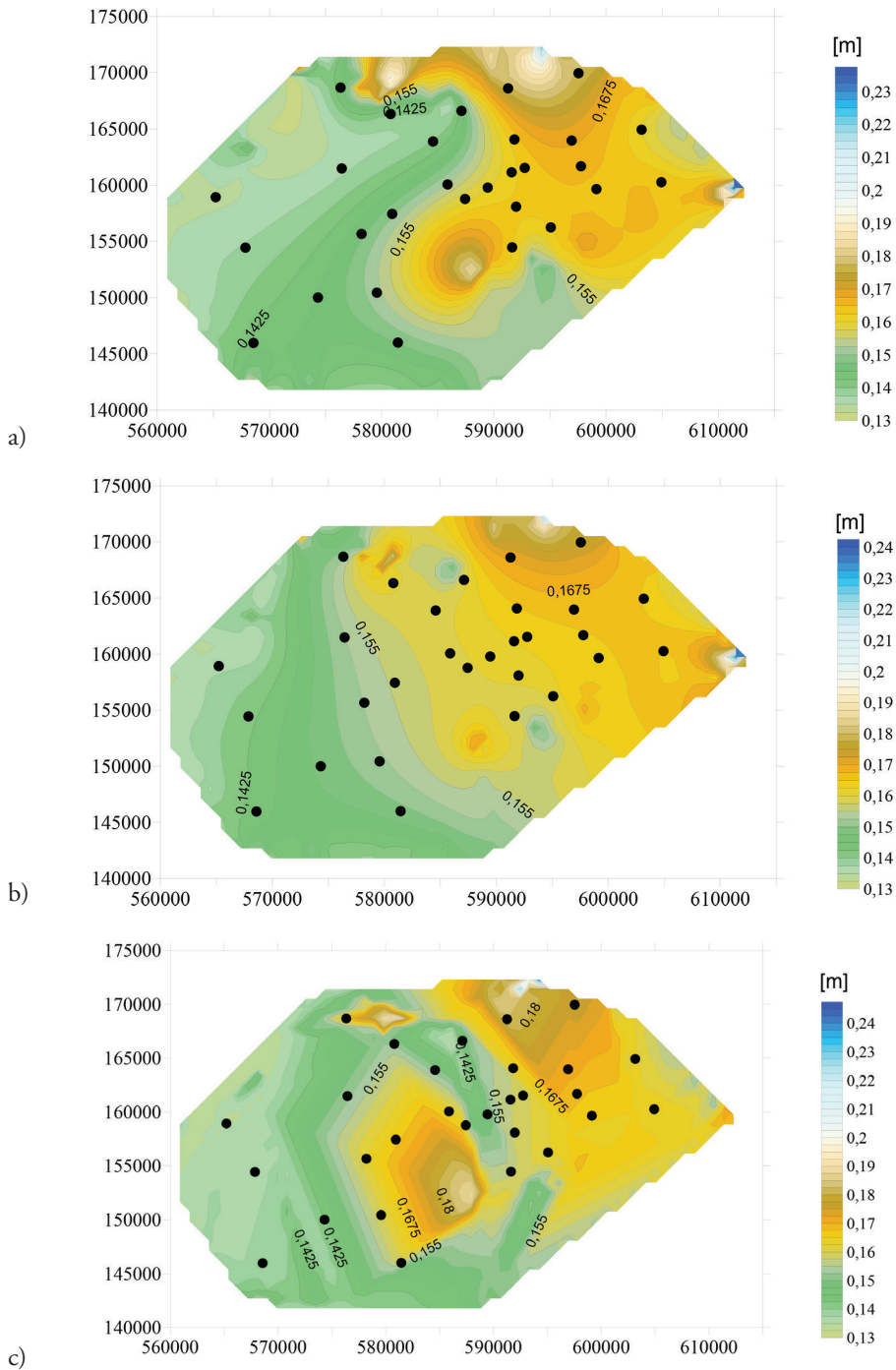
Za posamezno interpolacijsko metodo so rezultati izdelave VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. in 2. in 3. reda prikazani na sliki 6.



Slika 4: VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. reda: a) metoda kriging, b) metoda inverzne razdalje in c) metoda nepravilnih trikotnikov.



Slika 5: VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. in 2. reda: a) metoda kriging, b) metoda inverzne razdalje in c) metoda nepravilnih trikotnikov.



Slika 6: VTP na podlagi razlik višin reperjev 1., 2. in 3. reda: a) metoda kriging, b) metoda inverzne razdalje in c) metoda nepravilnih trikotnikov.

S slike 6 vidimo, da so razlike med VTP, glede na VTP, ki so prikazana na sliki 5, zanemarljive oziroma jih praktično ni mogoče zaznati, kar je tudi pričakovano, saj so bile v tem primeru kot dodatni vhodni podatki za izdelavo VTP uporabljene razlike višin na samo dodatnih štirih reperjih 3. reda.

3.2 ANALIZA KAKOVOSTI VTP NA VEČJEM OBMOČJU

V preglednici 2 so zbrane statistične mere, na podlagi katerih lahko analiziramo kakovost VTP glede na uporabljeno interpolacijsko metodo in različne vhodne podatke za izdelavo VTP. Tako so prikazani minimalna in maksimalna vrednost odstopanj višin na kontrolnih reperjih, povprečna vrednost odstopanj, povprečje absolutnih vrednosti odstopanj, standardni odklon odstopanj višin in korenska srednja kvadratna napaka (angl. *root-mean-square error*, *RMSE*).

Preglednica 2: Statistične mere razlik transformiranih višin iz VTP na večjem območju na podlagi razlik višin reperjev različnih redov

Statistična mera [mm]	Kriging			Inverzna razdalja			Nepravilni trikotniki		
	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red
Min.	-21,5	-17,5	-17,4	-18,1	-17,9	-18,6	-39,4	-39,4	-27,9
Maks.	2,9	12,0	14,0	2,1	3,3	2,9	6,0	6,0	6,0
Razpon	24,4	29,5	31,4	20,2	21,2	21,5	45,4	45,4	33,9
Povprečje	-9,2	-6,5	-4,7	-9,5	-8,7	-8,0	-10,0	-8,3	-7,9
Abs. pov.	9,5	8,2	6,7	9,6	9,0	8,2	10,8	9,5	9,1
$\sigma_{Htran.}$	6,6	7,0	6,8	5,5	5,8	5,4	11,3	10,6	9,6
RMSE	11,3	9,5	8,2	11,0	10,4	9,6	14,9	13,3	12,3

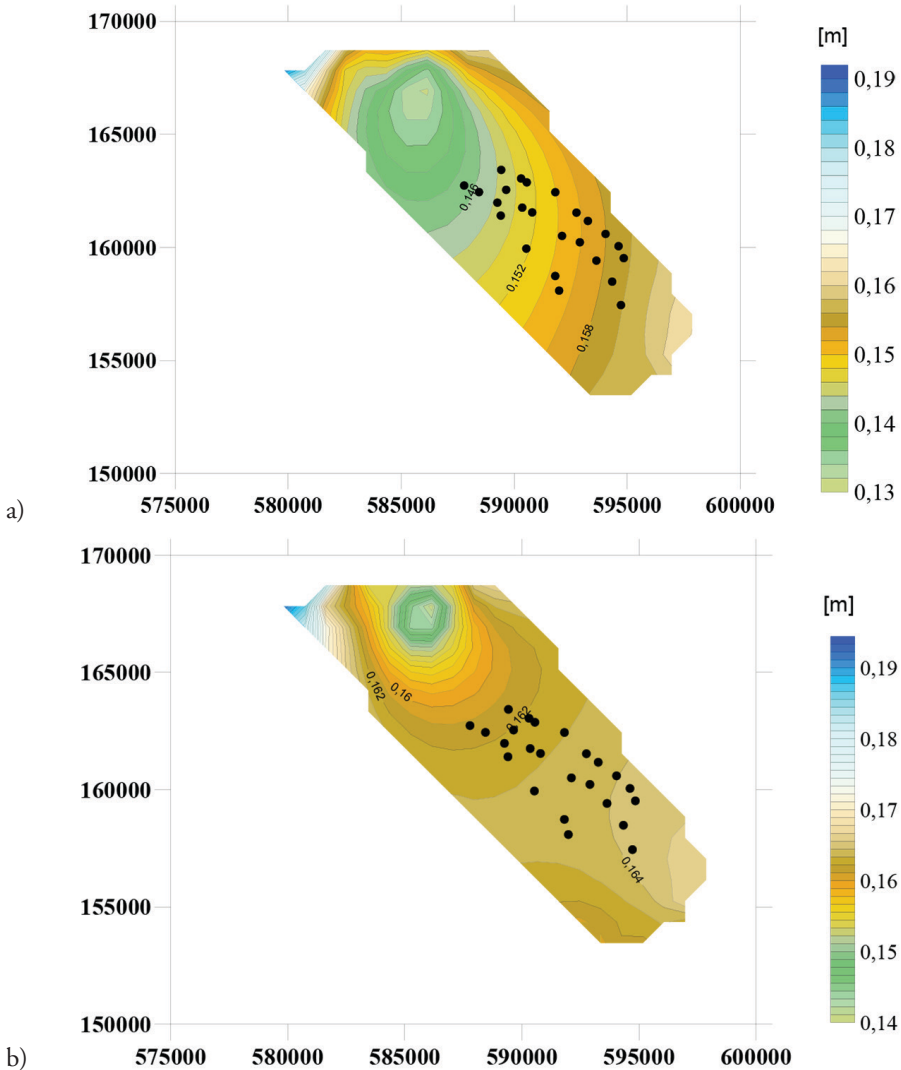
Iz preglednice 2 vidimo, da se pri izdelavi VTP na podlagi več vhodnih podatkov (razlik višin reperjev) povprečno in absolutno povprečno odstopanje med transformirano višino in preračunano višino iz SVS2000 v SVS2010 zmanjša. Pri povprečni razliki je največja razlika pri metodi kriging, saj znaša od -9,2 mm (1. red) do -4,7 mm (1., 2. in 3. red). Pri VTP, izdelani z inverzno razdaljo, so razlike manjše in znašajo od -9,5 mm (1. red) do -8,0 mm (1., 2. in 3. red) in od -10,0 mm (1. red) do -7,9 mm (1., 2. in 3. red) za metodo nepravilnih trikotnikov. Glede na natančnost transformiranih višin kontrolnih reperjev () razlike niso statistično značilne.

Iz preglednice 2 tudi vidimo, da na kakovost transformiranja višin kontrolnih reperjev ne vpliva število vhodnih podatkov, ki smo jih uporabili za izdelavo VTP z metodo kriging in inverzna razdalja, saj so razlike v minimalne. Za metodo kriging je natančnost pri uporabi več vhodnih podatkov celo slabša, če uporabimo tudi reperje 2. in 3. reda, vendar razlika ni statistično značilna. Pri uporabi metode inverzne razdalje je natančnost slabša, če kot vhodne podatke uporabimo tudi razlike višin reperjev 2. reda. Nekoliko večja je razlika v pri interpolaciji iz VTP, ki je izdelana z metodo nepravilnih trikotnikov. Te razlike znašajo od 11,3 mm (1. red) do 9,6 mm (1., 2. in 3. red). Za vse interpolacijske metode se s povečevanjem vhodnih podatkov RMSE zmanjša.

4 REZULTATI IN ANALIZA KAKOVOSTI TRANSFORMACIJ KONTROLNIH REPERJEV NA MANJŠEM OBMOČJU

4.1 Predstavitev rezultatov VTP, določene na podlagi razlik višin reperjev različnih redov na manjšem območju

Zaradi prostorske omejitve in ker so ugotovitve zelo podobne tistim, do katerih smo prišli pri večjem območju, grafično prikazujemo le rezultate VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. reda. Ostale grafične predstavitve so dostopne v diplomski nalogi (Kobale, 2021).



Slika 7: VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. reda na manjšem območju: a) metoda kriging, b) metoda inverzne razdalje in c) metoda nepravilnih trikotnikov.

a) VTP na manjšem območju na podlagi razlik višin reperjev 1. reda

Za posamezno interpolacijsko metodo smo najprej izdelali VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. reda (slika 7). Po primerjavi z rezultati za veliko območje lahko ugotovimo, da je vpliv različnih interpolacijskih metod na rezultate podoben.

b) VTP na manjšem območju višin reperjev 1. in 2. reda

Za posamezno interpolacijsko metodo se rezultati izdelave VTP na podlagi razlik višin reperjev 1. in 2. reda zelo malo razlikujejo od rezultatov, pri katerih smo uporabili le višine reperjev 1. reda. Ploskve kot celota imajo podobno geometrijo in obliko, razlike so le v detajlih in podrobnosti izrisanih izolinij.

c) VTP na manjšem območju višin reperjev 1., 2. in 3. reda

Z vključitvijo dodatnih štirih reperjev 3. reda glede na rezultate, ki so bili pridobljeni le z višino reperjev 1. reda ali kombinacijo z višinami reperjev 2. reda, nismo dobili značilnih razlik, saj je reperjev 3. reda na testnem območju premalo.

4.2 Analiza kakovosti VTP na manjšem območju

V preglednici 3 so zbrane enake statistične mere kot v preglednici 2 za večje območje, na podlagi katerih lahko analiziramo kakovost VTP glede na uporabljeno interpolacijsko metodo in različne vhodne podatke za izdelavo VTP.

Preglednica 3: Statistične mere razlik transformiranih višin iz VTP na manjšem območju na podlagi razlik višin reperjev različnih redov

Statistična mera [mm]	Kriging			Inverzna razdalja			Nepravilni trikotniki		
	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red
Min.	0,4	1,3	0,8	-8,0	-7,1	-3,6	-2,3	-2,3	-2,3
Maks.	18,6	19,3	19,3	11,1	11,6	18,1	14,0	16,6	16,6
Razpon	18,3	18,1	18,5	22,2	21,7	21,7	19,0	19,0	19,0
Povprečje	7,4	9,9	9,4	-2,3	-1,1	0,9	4,2	4,3	4,3
Abs. pov.	7,4	9,9	9,4	5,5	4,7	3,9	5,1	5,2	5,2
$\sigma_{H_{\text{man}}}$	5,0	5,3	5,3	5,9	5,6	6,1	5,4	5,6	5,6
RMSE	8,8	11,2	10,7	6,2	5,6	6,0	6,8	6,9	6,9

Iz preglednice 3 vidimo, da so razponi pri vseh metodah interpolacije podobni, ne glede na število vhodnih podatkov. Pri metodi kriging in nepravilni trikotniki sta razpona manjša kot na večjem območju. Pri inverzni razdalji pa sta razpona pri večjem in manjšem območju primerljiva.

Iz preglednice 3 tudi vidimo, da so pri metodi kriging vse razlike transformiranih višin na kontrolnih reperjih pozitivne, zato so tudi povprečne razlike večje kot na večjem območju, kar ne velja za metodo inverzne razdalje in nepravilnih trikotnikov. Pri inverzni razdalji in nepravilnih trikotnikih so absolutne povprečne razlike bistveno manjše kot na večjem območju (preglednica 2). Pri metodi kriging to velja le za VTP, izdelano na podlagi razlik višin reperjev 1. reda.

Vrednosti so za vse interpolacijske metode primerljive, pri čemer je na manjšem območju iz VTP, ki je izdelana z metodo nepravilnih trikotnikov, za približno dvakrat manjši. Pri metodi kriging in inverzna razdalja ocenjujemo, da velikost območja ne vpliva bistveno na kakovost transformacije višin. RMSE za metodo kriging nekoliko bolj odstopa od RMSE za metodo inverzne razdalje in nepravilnih trikotnikov, ki sta podobni. Na podlagi statističnih mer v preglednici 3 ocenjujemo, da z uporabo VTP, ki je izdelana z metodo inverzne razdalje in nepravilnih trikotnikov, na manjšem območju dosežemo boljše rezultate pri transformaciji višin iz SVS2000 v SVS2010.

5 TRANSFORMACIJA NA PODLAGI POVPREČNE RAZLIKE VIŠIN REPERJEV

Oceno kakovosti transformacije višin smo izvedli tudi na podlagi povprečne razlike višin reperjev 1. reda, 1. in 2. reda ter 1., 2. in 3. reda med SVS2010 in SVS2000 na obeh testnih območjih () (preglednica 4). Kakovost transformacije višin smo tudi tu ocenjevali na podlagi transformacije višine 29 kontrolnih reperjev na večjem območju, ki ležijo znotraj testnega območja (slika 3), in 24 kontrolnih reperjev 4. reda, ki ležijo v manjšem območju (slika 4).

Preglednica 4: Povprečna vrednost razlik višin med novim in starim višinskim sistemom na večjem in manjšem testnem območju

Red reperja	$\overline{\Delta H}_{vec.obm}$ [mm]	$\overline{\Delta H}_{manj.obm}$ [mm]	Razlika [mm]
1.	-157,6	-165,0	-7,4
1. in 2.	-158,1	-162,1	-4,0
1., 2. in 3.	-157,2	-160,5	-3,3

Iz preglednice 4 vidimo, da se povprečne vrednosti razlik višin reperjev med SVS2010 in SVS2000 malo razlikujejo, saj so višine reperjev nivelmanskih poligonov 2. in 3. reda preračunane z navezavo na nivelmanske poligone višjega ali enakega reda. Iz preglednice 4 vidimo, da se povprečne vrednosti razlik višin reperjev med SVS2010 in SVS2000 na manjšem testnem območju razlikujejo nekoliko več (4,5 mm) kot na večjem testnem območju (0,9 mm).

Preglednica 5: Statistične mere razlik transformiranih višin na podlagi povprečne vrednosti razlik višin reperjev različnih redov

Statistična mera [mm]	Transformacija na podlagi ($\overline{\Delta H}$)					
	večje območje			manjše območje		
	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red	1. red	1., 2. red	1., 2., 3. red
Min.	-24,2	-24,7	-21,3	-10,3	-13,2	-14,8
Maks.	20,6	20,1	23,8	31,6	28,7	27,1
Razpon	44,8	44,8	45,1	41,9	41,9	41,9
Povprečje	7,0	7,5	6,6	9,4	6,5	4,9
Abs. pov.	10,7	10,8	10,5	10,5	8,3	7,1
$\sigma_{Htran.}$	11,9	11,9	11,9	10,1	10,1	10,1
RMSE	13,6	13,9	13,4	13,6	11,8	11,0

Pri transformaciji višin kontrolnih reperjev na podlagi so spremembe vseh statističnih mer, glede na uporabljene vhodne podatke, minimalne. V splošnem lahko trdimo, da so rezultati transformacije

višin na podlagi povprečne vrednosti odstopanj višin reperjev 1., 2. in 3. reda dobri. Rezultati so v mejah pričakovanj in razumljivi, saj so tudi razlike $\overline{\Delta H}$ višin reperjev 1., 2. in 3. reda, izračunane iz različnih vhodnih podatkov, minimalne (preglednica 4). Kakovost transformacije višin je nekoliko slabša kot pri uporabi VTP za večje ali manjše območje.

6 TRANSFORMACIJA VIŠIN S PROGRAMOM SiVis

Program SiVis je namenjen transformaciji višin, ki jih dobimo z GNSS-višinomerstvom, iz starega v novi višinski sistem na podlagi razlik geoidnih višin med starim geoidom SLO_AGM2000/Trst in novo višinsko referenčno ploskvijo SLO_VRP2016_Koper (Medved et al., 2020; GURS, 2020). Kakovost transformacije višin smo enako kot zgoraj ocenjevali na podlagi transformacije višin kontrolnih reperjev 4. reda.

Preglednica 6: Statistične mere razlik transformiranih višin s programom SiVis

Statistična mera	SiVis [mm]	Statistična mera	SiVis [mm]
Min.	-30,8	povprečje	25,2
Maks.	68,1	abs. pov.	29,3
Razpon	98,9	$\sigma_{Htran.}$	22,5
		RMSE	32,7

Iz preglednice 6 vidimo, da je transformacija višin s programom SiVis najslabša, saj so vse statistične mere večje kot pri kateri koli drugi metodi transformacije višin. Rezultat ni presenetljiv, saj, kot je bilo že navedeno, je program SiVis namenjen transformaciji višin, pridobljenih z GNSS-višinomerstvom (Medved et al., 2020; GURS, 2020). S tem potrjujemo, da – glede na druge možnosti, ki jih imamo – uporaba SiVis za namen transformacije višin na lokacijskih prikazih ni ustrezna, saj so razlike v transformiranih višinah lahko prevelike in natančnost transformacije slaba.

7 SKLEP

V članku smo obravnavali problem transformacije višin iz starega višinskega sistema SVS2000 (datum Trst) v novi višinski sistem SVS2010 (datum Koper) ali nasprotno. Analizirali smo kakovost transformacije višin na podlagi različnih VTP, ki smo jih modelirali z različnimi interpolacijskimi metodami (kriging, inverzna razdalja, nepravilni trikotniki). Pri kreiranju VTP smo uporabili tudi različne vhodne podatke. Tako smo izdelali VTP le na podlagi razlik višin reperjev med SVS2000 in SVS2010 1. reda, nato 1. in 2. reda ter na koncu še 1., 2. in 3. reda. Izhajali smo iz višin reperjev dveh različno velikih območij v vzhodni Sloveniji. Na podlagi analize kakovosti transformacije višin smo ugotovili, da je transformacija višin na podlagi VTP, ki so kreirane na podlagi več vhodnih podatkov, kakovostnejša, čeprav je kakovost določitve višin reperjev 2. in 3. reda običajno slabša, saj smo višine v SVS2010 dobili s ponovno izravnavo starih merjenih višinskih razlik nivelmanskih poligonov nižjih redov v višinskem datumu Koper oziroma SVS2010.

Analiza kakovosti transformacije višin z različnimi VTP je bila narejena na podlagi odstopanj višin med starim in novim višinskim sistemom na reperjih in transformiranih višin z različnimi VTP. Za kontrolne

reperje smo uporabili reperje 4. reda, ki so stabilizirani znotraj testnega območja. Rezultati so pokazali, da so vse interpolacijske metode primerne za kreiranje VTP. Pri VTP, ki je bila kreirana za večje območje, so σ_{Htran} za metodi kriging in inverzne razdalje primerljivi. Pri VTP, kreirani z metodo inverznih trikotnikov, pa je σ_{Htran} za približno dvakrat slabši. Kljub temu smo dosegli centimetersko natančnost transformacije višin, kar je kljub vsemu dobro za transformacijo podatkovnih nizov in lokacijskih prikazov. Na manjšem območju so rezultati transformacije višin na podlagi VTP za vse interpolacijske metode podobne kakovosti, saj so razlike med statističnimi merami in σ_{Htran} minimalne (od 5,0 mm za metodo kriging (VTP, izdelana na podlagi razlike višin reperjev 1. reda) do 6,1 mm z metodo inverzne razdalje (VTP, izdelana na podlagi razlike višin reperjev 1., 2. in 3. reda)).

Transformacijo višin lahko naredimo tudi na podlagi povprečne razlike višin reperjev v SVS2000 in SVS2010 na večjem in manjšem testnem območju. Pričakovano so povprečne vrednosti razlik višin med reperji 1. reda, 1. in 2. reda ter 1., 2. in 3. reda minimalne, saj so preračunane višine izravnane z navezavo na reperje višjih ali enakih redov v SVS2010 na testnem območju. Zaradi izračunanih malih razlik v povprečni vrednosti razlik višin so tudi razlike v vseh testnih statistikah minimalne. Kakovost transformacije višin σ_{Htran} je velikostnega reda en centimeter, kar je zelo dober rezultat.

S transformacijo višin s programom SiVis dobimo najslabše rezultate, kar je tudi razumljivo. Program SiVis je bil namreč razvit za potrebe transformacije višin, pridobljenih z GNSS-višinomerstvom, na podlagi geoidnih razlik med SLO_AGM2000/Trst in SLO_VRP2016_Koper, kar je jasno navedeno tudi v navodilih za uporabo programa.

Na podlagi analize zato za kakovostno transformacijo višin med višinskima sistemoma predlagamo transformacijo z VTP, ki jo kreiramo za posamezno območje ali na podlagi povprečne razlike višin reperjev v okolici. Vsekakor pa moramo po transformaciji višin kakovost in zanesljivost transformacije preveriti na terenu. Pri starem ali obstoječem lokacijskem prikazu to na primer pomeni ponovno izmero višin identičnim točkam v SVS2010 in primerjavo s transformiranimi višinami.

Literatura in viri:

- Arun, P.V. (2013). A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 16, 133–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.09.001>
- Ayeni, B., Samuel, K. J. (2014). An evaluation of digital elevation modeling in GIS and Cartography. *Geo-spatial Information Science*, 17 (2), 139–144. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.772808>
- Grahor, V. (2014). Primerjava prostornin na osnovi podatkov zajema z letalniki. Diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 64 str. <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=32290>, pridobljeno 10. 1. 2022.
- Geodetska uprava Republike Slovenije (2020). Tehnično navodilo za uporabo novega državnega višinskega sistema (Različica 1.0, datum 20. 2. 2020), https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/Navodila/Tehnicno_navodilo_za_uporabo_novega_drzavnega_visinskega_sistema.pdf, pridobljeno 11. 2. 2022.
- Golden Software, LLC., PO Box 281, Golden, CO 80402-0281 USA, <https://www.goldensoftware.com/>, pridobljeno 10. 2. 2021.
- Hessl, A., Miller, J., Kernan, J., Keenum, D., McKenzie, D. (2007). Mapping Paleo-Fire Boundaries from Binary Point Data: Comparing Interpolation Methods. *The professional Geographer*, 59 (1), 87–104. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9272.2007.00593.x>
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., Lucas, N. (2001). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands, California: ESRI Press. https://www.researchgate.net/publication/200043204_Using_ArcGIS_geostatistical_analyst, pridobljeno: 9. 2. 2022.
- Kobale, Ž. (2021). Določitev višinske transformacijske ploskve na izbranih območjih Slovenije. [Determination of the height transformation surface in selected areas of Slovenia]. Diplomsko naloga. Ljubljana: Univerza v Ljubljani. <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=131513&lang=slv>, pridobljeno 14. 2. 2022.
- Koler B., Stopar B., Sterle O., Urbančič T., Medved K. (2019). Nov slovenski višinski sistem SVS2010, *Geodetski vestnik*, 63 (1), 27–40. DOI: <https://doi.org/10.15292/>

geodetski-vestnik.2019.01.27-40

Medved, K., Kozmus Trajkovski, K., Berk, S., Stopar, B., Koler, B. (2020). Uvedba novega slovenskega višinskega sistema (SVS2010). *Geodetski vestnik*, 64 (1), 33–42. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.33-42>

Mitaš, L., Mitašova, H. (1999). Spatial Interpolation. V P. Longley, M. F. Goodchild, D. Maguire in D. Rhin (ur.), *Geographical Information Systems. 2nd Edition. Vol. 1. Principles and Technical Issues*, 8, 481–492. http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/papers/mitas_mitasova_1999_2005.pdf, pridobljeno 10. 2. 2022.

Pilz, J., Spöck, G. (2007). Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*,

22 (5), 621–632. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-007-0165-7>

PREG (2018). <http://prostor3.gov.si/preg/>, pridobljeno 10. 7. 2019.

QGIS (2021). QGIS – A Free and Open Source Geographic Information System. <https://www.qgis.org/en/site/>, pridobljeno 15. 3. 2021.

Sterle, O., Koler, B. (2019). Določitev novega višinskega datuma Slovenije. *Geodetski vestnik*, 63 (1), 13–26. DOI: <http://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.01.13-26>

Uredba (2018). Uredba o določitvi parametrov višinskega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema. Uradni list Republike Slovenije, št. 80/2018. <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2018-01-3854?sop=2018-01-3854>, pridobljeno: 11. 2. 2022.



Koler B., Urbančič T., Kobale Ž. (2022). Določitev višinske transformacijske ploskve na območju vzhodne Slovenije. *Geodetski vestnik*, 66 (3), 351–366.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2022.03.351-366>

doc. dr. Božo Koler

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
bozo.koler@fgg.uni-lj.si*

doc. dr. Tilen Urbančič

*Geotočka
Tehnološki park 24, SI-1000 Ljubljana
in
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
tilen.urbančič@fgg.uni-lj.si*

Žiga Kobale

*študent MA Geodezija in geoinformatika
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
zigakobale@hotmail.com*