

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



## **DIPLOMSKA NALOGA**

### **VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE TEHNIČNO UPRAVLJANJE NEPREMIČNIN**

Ljubljana, 2020

Univerza  
v Ljubljani

*Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

**Mentor/-ica:**

**Predsednik komisije:**

**Somentor/-ica:**

**Član komisije:**

Ljubljana, \_\_\_\_\_

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |                                                                                  |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDK:</b>             | 528.38(043.2)                                                                    |
| <b>Avtor:</b>           | Robi Dolenc                                                                      |
| <b>Mentor:</b>          | izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič                                                    |
| <b>Somentor:</b>        | asist. Gašper Štebe, univ. dipl. inž. geod.                                      |
| <b>Naslov:</b>          | Vzpostavitev nivelmanske mreže za spremljanje pomikov pri izgradnji objekta Šumi |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | Diplomska naloga – visokošolski študij                                           |
| <b>Obseg in oprema:</b> | 30 str., 9 pregl., 9 sl., 19 en., 2 pril.                                        |
| <b>Ključne besede:</b>  | Šumi, geometrični nivelman, lokalna nivelmanska mreža, izravnava                 |

### **Izvleček**

Zaradi zahtevnosti gradnje poslovno stanovanjskega objekta Šumi je bilo potrebno v okolici gradbene jame razviti lokalno nivelmansko mrežo, ki predstavlja osnovo za vse nadaljnje meritve in analize morebitnega posedanja sosednjih objektov med gradnjo. V sklopu diplomske naloge smo nivelmansko mrežo izmerili po metodi geometričnega nivelmana. Upoštevali smo popravke temperature, metra para nivelmanskih lat in razlike pete lat. Med izmero je bilo potrebno poskrbeti za nadštevilne meritve in jih nato izravnati. Nadštevilne meritve smo izravnali na različne načine, rezultate primerjali med seboj in tako določiti optimalno geometrijo nivelmanske mreže.

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

|                       |                                                                                                      |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDC:</b>           | 528.38(043.2)                                                                                        |
| <b>Author:</b>        | Robi Dolenc                                                                                          |
| <b>Supervisor:</b>    | Assoc. Prof. dr. Tomaž Ambrožič, Ph.D.                                                               |
| <b>Co-advisor:</b>    | Assist. Gašper Štebe, B.Sc.                                                                          |
| <b>Title:</b>         | The establishment of level network for monitoring displacements in construction of the Šumi building |
| <b>Document type:</b> | Graduation Thesis – Higher professional studies                                                      |
| <b>Notes:</b>         | 30 p., 9 tab., 9 fig., 19 eq., 2 ann.                                                                |
| <b>Key words:</b>     | Šumi, geometric levelling, local leveling network, adjustment                                        |

### **Abstract**

Due to the complexity of the construction of commercial residential building Šumi, it was necessary to develop a local levelling network in the vicinity of the construction pit, which will be the basis for all further measurements and analyzes of possible subsidence of adjacent structures during construction. As part of the diploma thesis, the levelling network was measured by the geometric leveling method and the necessary reductions were made. We took into account temperature corrections, meters of a pair of levelling staffs and differences in the basis of staffs. During the field measurement, we had to make numerous measurements, which were later adjusted by the least squares adjustment method. Numerous measurements were levelled in different ways, the results were compared with one another to determine the optimal geometry of the levelling grid.

*»Ta stran je namenoma prazna.«*



## **ZAHVALE**

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Tomažu Ambrožiču ter somentorju asist. Gašperju Štebetu za vse nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvalil bi se družini in prijateljem za vzpodbudo in potrpljenje tekom celotnega študija.

Posebna zahvala gre tudi sodelavcem pri podjetju Geotočka, še posebej Janezu Burji in Tilnu Čuku, za vso podporo pri pisanju diplomske naloge.

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## KAZALO VSEBINE

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA .....                                   | I    |
| BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....            | III  |
| BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....     | V    |
| ZAHVALE .....                                                     | VII  |
| KAZALO VSEBINE .....                                              | IX   |
| KAZALO SLIK .....                                                 | XI   |
| KAZALO PREGLEDNIC.....                                            | XIII |
| KAZALO GRAFIKONOV .....                                           | XV   |
| <br>                                                              |      |
| 1 UVOD .....                                                      | 1    |
| 2 METODA IZMERE .....                                             | 2    |
| 2.1 Geometrični nivelman .....                                    | 2    |
| 3 UPORABLJEN MERSKI INSTRUMENTARIJ .....                          | 5    |
| 3.1 Nivelir .....                                                 | 5    |
| 3.2 Nivelmanski lati ter dodaten merski pribor .....              | 5    |
| 4 OBLIKA VIŠINSKE MREŽE IN STABILIZACIJA REPERJEV .....           | 6    |
| 4.1 Oblika višinske mreže .....                                   | 6    |
| 4.2 Stabilizacija reperjev .....                                  | 8    |
| 5 TERENSKA IZMERA .....                                           | 9    |
| 6 OBDELAVA MERITEV .....                                          | 11   |
| 6.1 Priprava podatkov za obdelavo .....                           | 11   |
| 6.2 Obdelava podatkov meritev .....                               | 12   |
| 6.3 Ocena natančnosti meritev .....                               | 16   |
| 7 IZRAVNAVA VIŠINSKIH RAZLIK PO METODI NAJMANJŠIH KVADRATOV ..... | 17   |
| 7.1 Posredna izravnava po MNK .....                               | 17   |
| 7.2 Izravnava s programom VimWin .....                            | 19   |
| 8 REZULTATI IZRAVNAVE .....                                       | 20   |
| 9 PRIMERJAVA REZULTATOV IZRAVNAV .....                            | 24   |
| 10 ZAKLJUČEK .....                                                | 26   |
| VIRI.....                                                         | 27   |

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## KAZALO SLIK

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Čitanje razdelbe na lati za določitev višinske razlike s pomočjo nivelirja z niveliranjem iz sredine (Sluga, 1991, str. 41).....               | 2  |
| Slika 2: Potek izmere višine med reperjema A in B z uporabo izmenišč (Sluga, 1991, str. 54).....                                                        | 3  |
| Slika 3: Referenčni reper A1 oziroma reper št. 5766.....                                                                                                | 6  |
| Slika 4: Lokacije reperjev v nivelmanski mreži Šumi (vir ortofota: <a href="http://gis.arso.gov.si/atlasokolja">gis.arso.gov.si/atlasokolja</a> ) ..... | 7  |
| Slika 5: Referenčni reper A4 – kovinski čep (levo) in stabilizacija reperja (desno).....                                                                | 8  |
| Slika 6: Kontrolni reper R11 – talni kovinski čep (levo) in stabilizacija reperja (desno).....                                                          | 8  |
| Slika 7: izmera nivelmanskih vlakov (vir ortofota: <a href="http://gis.arso.gov.si/atlasokolja">gis.arso.gov.si/atlasokolja</a> ) .....                 | 10 |
| Slika 8: Primer zapisa meritev pridobljenih iz nivelirja DNA03 .....                                                                                    | 11 |
| Slika 9: Primer urejanja podatkov v Microsoft Excelu .....                                                                                              | 11 |

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## KAZALO PREGLEDNIC

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Tehnični podatki nivelirja Leica Geosystems DNA03 (Vir: Leica Geosystems, 2006) ..    | 5  |
| Preglednica 2: Osnovni tehnični podatki invar nivelmanskih lat (Vir: Leica Geosystems, 2006) .....   | 5  |
| Preglednica 3: Nivelmanski vlaki v mreži Šumi .....                                                  | 9  |
| Preglednica 4: Podatki iz poročil o kalibraciji .....                                                | 12 |
| Preglednica 5: Podatki srednjih vrednosti popravka para nivelmanskih lat in razlika njunih pet ..... | 12 |
| Preglednica 6: Izračun merjenih in reduciranih višinskih razlik med reperji .....                    | 13 |
| Preglednica 7: A priori ocena natančnosti meritev .....                                              | 16 |
| Preglednica 8: Nivelmanski vlaki in merjene višinske razlike vključene v posamezno izravnavo .....   | 17 |
| Preglednica 9: vhodna datoteka za izravnavo s programom VimWin .....                                 | 19 |
| Preglednica 10: rezultati izravnave .....                                                            | 20 |

*»Ta stran je namenoma prazna.«*



## KAZALO GRAFIKONOV

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Grafikon 1: Predstavitev višin reperja A2 po izravninah ..... | 24 |
| Grafikon 2: Predstavitev višin reperja A3 po izravninah ..... | 24 |
| Grafikon 3: Predstavitev višin reperja A4 po izravninah ..... | 25 |

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## 1 UVOD

Izgradnja centra Šumi zaradi svoje lege in zahtevnosti gradnje zahteva spremljanje stanja okoliških objektov na vplivnem območju gradnje. V bližnji okolici gradnje se nahajajo stanovanjske in poslovne stavbe, med drugimi tudi Slovensko narodno gledališče Drama, Uršulinska cerkev Ljubljana – Sv. Trojica, Elektrotehniško-računalniška strokovna šola in gimnazija Ljubljana in hotel Cubo.

Pri gradnji večjih objektov v središčih mest je potrebno med samo gradnjo spremljati morebitne pomike objektov v bližnji okolici. Obstaja več metod spremljanja višinskih pomikov, katerih skupen namen je spremljanje pomikov kontrolnih točk objekta v odvisnosti od časa. Na podlagi izračunanih pomikov pa je mogoče pravočasno predvidevati obnašanje objektov in sprejeti potrebne preventivne ukrepe.

Namen naloge je vzpostavitev geodetske višinske mreže referenčnih in kontrolnih reperjev na vplivnem območju gradnje po metodi geometričnega nivelmana. Mreža bo omogočala geodetsko spremljavo stabilnosti okoliških objektov v času gradnje objekta Šumi.

Cilj diplomske naloge je izravnava meritev po metodi najmanjših kvadratov in določitev optimalne geometrije nivelmanske mreže. Na začetku je predstavljena metoda izmere, lokacija in način stabilizacije reperjev ter potek terenske izmere. Za izmero je bil uporabljen precizni digitalni nivelir Leica DNA 03 in kodirani invar nivelmanski lati. Pridobljene merske podatke je potrebno predhodno obdelati. Upoštevana so bila pravila za precizno niveliranje, popravki temperature, metra para nivelmanskih lat in razlike pete lat. Popravljenе višinske razlike med posameznimi izmenišči skupaj z dolžinami predstavljajo vhodni podatek za izravnavo s programom VimWin. Izravnavo smo izvedli na več različnih načinov, na koncu rezultate primerjali med seboj in tako določili optimalno geometrijo nivelmanske mreže.

## 2 METODA IZMERE

### 2.1 Geometrični nivelman

Geometrični nivelman je najpogostejše uporabljena metoda izmere nivelmanske mreže visoke natančnosti, saj je najnatančnejša geodetska metoda v višinomerstvu. Poleg geometričnega nivelmana (I. in II. stopnja natančnosti) sicer poznamo še trigonometrično višinomerstvo, vendar je natančnost meritev te metode občutno slabša (I. stopnja natančnosti). Obe metodi uporabljamo za merjenje višinskih razlik med reperji, ki jih kasneje uporabimo pri določitvi višin v mreži. Za II. stopnjo natančnosti potrebujemo nivelir, ki zagotavlja natančnost niveliranja vsaj 0,5 mm/km dvojnega nivelmana, za I. stopnjo natančnosti pa nivelir, z natančnostjo vsaj 1-2 mm/km dvojnega nivelmana (Vodopivec in Kogoj, 2001).

S pomočjo nivelirja določamo višinske razlike med točkami. Nivelir zagotavlja horizontalno vizuro odčitavanja razdelbe z dveh nivelmanskih lat, ki sta postavljeni vertikalno na dveh točkah. Digitalni nivelir samodejno prebere razdelbo nanoseno na lati, pri tem pa zaradi zagotovitve visoke natančnosti, razdalja med nivelirjem in lato ne sme presegati 30 m. Meritve potekajo tako, da se najprej odčita razdelba na lati zadaj in nato razdelba na lati spredaj. Razlika med odčitkoma predstavlja višinsko razliko med točkama (reperjema ali izmeniščema). Iz slike 1 je razvidno, da je višinska razlika:

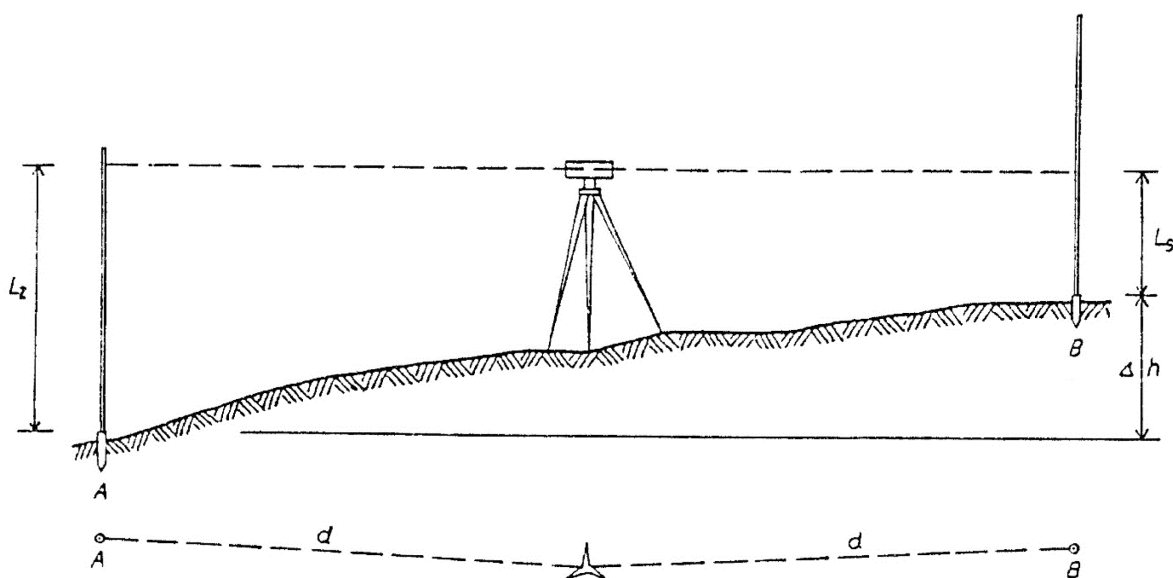
$$\Delta h = L_Z - L_S \quad (1)$$

kjer je:

$\Delta h$ ...višinska razlika [m],

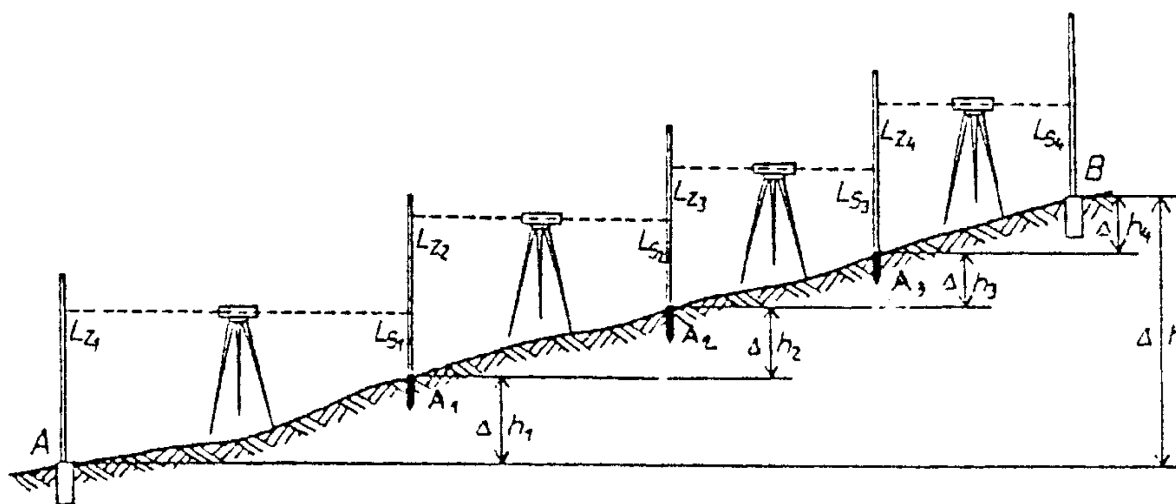
$L_Z$ ...odčitek na lati zadaj [m],

$L_S$ ...odčitek na lati spredaj [m].



Slika 1: Čitanje razdelbe na lati za določitev višinske razlike s pomočjo nivelirja z niveliranjem iz sredine (Sluga, 1991, str. 41)

Pri izmeri višinske mreže po metodi geometričnega nivelmana z niveliranjem iz sredine, merimo višinske razlike med reperji ter izmenišči. Izmenišča predstavljajo začasne višinske točke, ki jih stabiliziramo z žabo. Uporabljajo se pri daljših oddaljenostih med reperji in večjih višinskih razlikah med reperji. Meritve potekajo tako, da najprej odčitamo lato zadaj, ki stoji na reperju A ter nato lato spredaj na žabi, ki stoji na izmenišču  $A_1$ . Nadaljujemo s prestavitvijo nivelirja, lato spredaj na izmenišču  $A_1$  pa zasukamo proti novemu stojišču. Pri tem moramo biti pazljivi, da ne premaknemo žabe. Iz novega stojišča čitamo lato zadaj na izmenišču  $A_1$ . Nato premaknemo lato na novo izmenišče  $A_2$  in obrnemo nivelir proti temu izmenišču. Na tem izmenišču čitamo lato spredaj. Tako nadaljujemo izmenično, dokler ne zaključimo z odčitkom late spredaj na reperju B (slika 2). Višinsko razliko med reperjema A in B izračunamo z vsoto delnih višinskih razlik, kot je razvidno iz enačbe 2.



Slika 2: Potek izmere višine med reperjema A in B z uporabo izmenišč (Sluga, 1991, str. 54)

$$\Delta h_A^B = (L_{Z1} - L_{S1}) + (L_{Z2} - L_{S2}) + \dots + (L_{Zn} - L_{Sn})$$

$$\Delta h_A^B = \sum L_Z - \sum L_S \quad (2)$$

Z merjenjem višinskih razlik določamo višine reperjev, ki jih povezujemo v nivelmanske vlake/poligone ali zanke. Več nivelmanskih vlakov skupaj, ki se združijo v višinskih vozliščih, tvori višinsko oz. nivelmansko mrežo. Metoda je nenadomestljiva pri natančnih meritvah višinskih premikov objektov v lokalnih inženirskih mrežah (Kogoj in Stopar, 2009).

Med izvajanjem preciznih meritev moramo biti pozorni tudi na pogoške, ki vplivajo na natančnost določitve višin in se pojavijo zaradi uporabe:

- nivelirja,
- nivelmanske late,
- merskega postopka.

Na meritve pa poleg tega vplivajo tudi zunanji vplivi (meteorološki, promet, mehanizacija na gradbišču ipd. ), ki ob določenih pogojih lahko vplivajo na rezultate izmere (GURS, 2015). Najbolj občutljivi so precizni digitalni nivelirji, na katere vplivata predvsem neidealna osvetljenost late in tresenje tal. Zmanjšamo jih lahko s krajšimi oddaljenostmi med nivelirjem in lato ali z rahlim zasukom late (do  $45^\circ$ , da ne vpliva na natančnost), tako da se izognemo direktni osvetlitvi late (sonce, senca).

Z uporabo digitalnega nivelirja se je nemogoče izogniti tudi sistematičnim pogreškom, ki vplivajo na natančnost meritev. Vpliv ukrivljenosti Zemlje ter nehorizontalnosti vizurne osi nivelirja eliminiramo z metodo niveliranja iz sredine ter s sodim številom stojšč (vedno ista leta na danem reperju). Prav tako ob pravilni izbiri poti in časa niveliranja odpravimo večji del vpliva refrakcije. Izogibamo se ekstremnim vremenskim razmeram, večje višinske razlike pa niveliramo zjutraj ali zvečer (GURS, 2015). Da zmanjšamo vpliv posedanja lat in stativa uporabimo metodo zaporednega odčitavanja razdelbe na letah ter niveliramo v obeh smereh (Kogoj in Stopar, 2009).

Pri izvajanju preciznih meritev, kjer uporabljamo invar nivelmanske late, poznamo popravke metra para nivelmanskih lat in razlike pete lat, ki jih dobimo s komparacijo lat. Ti popravki so navedeni v poročilu o kalibraciji late in jih moramo upoštevati pri določitvi višinskih razlik med reperji. Nevertikalnosti postavitve late se v večji meri izognemo z uporabo rektificirane dozne libele, pritrjene na lato (Kogoj in Stopar, 2009). Vpliv refrakcije zmanjšamo tudi s čitanjem razdelbe 0,6 m nad tlemi in ne višje od 2,8 m (GURS, 2015).

Tako poznamo pravila za izmero nivelmanskih mrež visoke natančnosti (NVN):

- višina vizure med 0,6 m in 2,8 m nad tlemi,
- dolžina vizure največ 30 m,
- razlika dolžin med lato zadaj in lato spredaj manjša od 0,5 m,
- razlika vsot dolžin v nivelmanski liniji do 1 m,
- linije nivelirane obojestransko.

### 3 UPORABLJEN MERSKI INSTRUMENTARIJ

#### 3.1 Nivelir

Za izmero smo uporabili digitalni nivelir *Leica Geosystems DNA03* (ser. št. 344293). Nivelir zagotavlja visoko natančnost meritev in spada med najpreciznejše digitalne nivelirje. Namenjen je izmeri nivelmanskih mrež višjih redov in precizni izmeri inženirskih višinskih mrež za ugotavljanje vertikalne stabilnosti objektov. Tehnični podatki so zbrani v preglednici 1.

Preglednica 1: Tehnični podatki nivelirja *Leica Geosystems DNA03* (Vir: *Leica Geosystems*, 2006)

| <b><i>Nivelir Leica Geosystems DNA03</i></b>  |                   |
|-----------------------------------------------|-------------------|
| Območje delovanja                             | −20°C do +50°C    |
| Dozna libela                                  | 8' / 2 mm         |
| Natančnost kompenzatorja                      | 0,3"              |
| Delovno območje kompenzatorja                 | ± 10'             |
| Povečava daljnogleda                          | 24x               |
| Premjer objektiva                             | 36 mm             |
| Doseg                                         | 1,8 m do 110 m    |
| Način čitanja na kodni nivelmanski lati       | avtomatsko        |
| Čas merjenja                                  | 3s (za 1 odčitek) |
| Natančnost čitanja                            | 0,01 mm           |
| Natančnost meritev ( $\sigma_{ISO 17123-2}$ ) | 0,3 ppm           |

#### 3.2 Nivelmanski lati ter dodaten merski pribor

Glede na zahtevano visoko natančnost določitve višin reperjev smo uporabili dve komparirani invar nivelmanski lati s kodno razdelbo *Leica Geosystems GPCL3* (ser. št. 22633 in 22635). Osnovne tehnične podatke prikazujemo v preglednici 2.

Preglednica 2: Osnovni tehnični podatki invar nivelmanskih lat (Vir: *Leica Geosystems*, 2006)

| <b><i>Nivelmanska lata Leica Geosystems GPCL3</i></b> |                        |
|-------------------------------------------------------|------------------------|
| Območje delovanja                                     | −20°C do +50°C         |
| Dolžina                                               | 3,05 m                 |
| Razpon čitanja                                        | 0,35 m do 2,98 m       |
| Razdelba                                              | nanešena na invar trak |
| Ohišje                                                | aloksiran aluminij     |
| Peta                                                  | jeklo                  |
| Razteznostni koeficient                               | < 1 ppm / °C           |
| Dozna libela                                          | 30' / 2 mm             |

Pri izmeri smo uporabili še dve stojali/držali za stabilizacijo nivelmanskih lat, dve žabi, stativ nivelirja in termometer.

## 4 OBLIKA VIŠINSKE MREŽE IN STABILIZACIJA REPERJEV

### 4.1 Oblika višinske mreže

Prva faza pri oblikovanju geodetskih mrež je projektiranje/načrtovanje. Upoštevati je potrebno določene pogoje s strani investitorja glede kakovosti in natančnosti končnih rezultatov ter izvedbe del z optimalnimi stroški. Način izvedbe projekta oblikovanja geodetske mreže ni formalno predpisan z zakonskimi akti zato se posamezne faze projektiranja razlikujejo glede na vrsto mreže ter metodo izmere. Pri projektiranju višinskih nivelmanskih mrež moramo biti pozorni na način stabilizacije reperjev, izhodišče mreže, dolžino vlakov in zank, oddaljenost med reperji in morebitno niveliranje v ekstremnih pogojih (strmi vzponi in spusti, nestabilen teren ipd.). Za zagotovitev realizacije projekta je potreben predhodni ogled terena ali t.i. rekognosciranje terena. Z ogledom terena odkrivamo obstoječe reperje, ki jih lahko uporabimo v mreži in določamo mikro lokacije novih reperjev. Pri izbiri lokacij novih reperjev smo pozorni na varnost le teh pred uničenjem, lokalno stabilnost in realizacijo povezav med njimi. Na ogledu določimo tudi način stabilizacije reperjev (Kogoj in Stopar, 2009).

Obravnavano območje je predstavljeno z nizom reperjev, ki jih z nivelmanskimi vlaki in zankami povezujemo v nivelmansko mrežo. Datum mreže določajo referenčni reperji, ki jih izberemo ali stabiliziramo zunaj vplivnega območja predvidenih deformacij. Ostale točke v mreži so kontrolni reperji, ki nam z merjenjem v več terminskih izmerah omogočajo spremljanje vertikalnih pomikov na obravnavanem območju (Savšek, 2010).

Kontrolni reperji znotraj vplivnega območja gradnje objekta Šumi so bili določeni v sodelovanju s projektantom gradnje in investitorjem izmere. Za referenčne reperje smo izbrali 3 obstoječe reperje, imenovali smo jih A1 – A3, referenčni reper A4 pa je bil stabiliziran na novo. Reperji so locirani izven vplivnega območja gradnje. Mrežo smo izmerili kot precizno lokalno nivelmansko mrežo, z izhodiščem na reperju A1 (reper mestne nivelmanske mreže št. 5766) z višino 298,4022 m (GURS)(slika 3).



Slika 3: Referenčni reper A1 oziroma reper št. 5766

Slika 4 prikazuje lokacije referenčnih in kontrolnih reperjev v nivelmanski mreži Šumi, ter predvideno območje gradnje.





Slika 4: Lokacije reperjev v nivelmanski mreži Šumi (vir ortofota: [gis.arso.gov.si/atlasokolja](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja))

## 4.2 Stabilizacija reperjev

Izbor položaja referenčnih reperjev je ključnega pomena, saj le ti določajo datum nivelmanske mreže, ki mora biti stabilen v času od začetka do konca spremljanja pomikanja reperjev. Na novo stabiliziran reper A4 je lociran približno 80 m zahodno od območja gradnje objekta Šumi. Vgrajen je bil v betonsko steno ob vhodu v garažo pod Novo Ljubljansko banko, kot klasičen reper sodčkaste oblike iz nerjavečega jekla (slika 5).



Slika 5: Referenčni reper A4 – kovinski čep (levo) in stabilizacija reperja (desno)

Novi kontrolni reperji so vgrajeni v objekte, ki se nahajajo v bližnji okolici vplivnega območja gradbišča, kot klasični nizki reperji. Na mestih kjer ni objektov, vendar je potrebno spremljati deformacije tal, so bili vgrajeni talni reperji (slika 6).



Slika 6: Kontrolni reper R11 – talni kovinski čep (levo) in stabilizacija reperja (desno)

V mrežo so kot kontrolni reperji vključeni tudi nekateri obstoječi reperji, ki so bili stabilizirani med gradnjo garaže pod Kongresnim trgom (Ambrožič, 2018).



## 5 TERENSKA IZMERA

V okviru terenske izmere nivelmanske mreže Šumi smo 8. in 9. novembra 2018 opravili meritve 12 nivelmanskih vlakov ter 1 nivelmanske zanke (slika 7). Merili smo v obe smeri in upoštevali pravila za precizno niveliranje. V obeh dneh so bili vremenski pogoji podobni. Bilo je oblačno s konstantno temperaturo okoli 14 °C. Takšni pogoji so primerni za merjenje, saj ni vpliva premočnega sonca, ki bi vplival na merjenje z digitalnim nivelirjem.

Prvi dan smo z merjenjem pričeli na izhodiščnem reperju A1, ki je stabiliziran na objektu Kazina, Kongresni trg 1 in nadaljevali preko 6 kontrolnih reperjev nivelmanskega vlaka 1 do referenčnega reperja A2 vgrajenega v objekt Univerze v Ljubljani, Kongresni trg 12 in se nato po isti poti vrnili na reper A1. Nadaljevali smo z merjenjem nivelmanskega vlaka 2 mimo Elektrotehniško-računalniške strokovne šole in gimnazije kjer se nahaja 15 kontrolnih reperjev in se prav tako vrnili na reper A2 po isti poti. Na identičen način smo izmerili še nivelmanske vlake od 3 do 11.

Drugi dan smo pričeli na reperju A2, nivelirali preko kontrolnega reperja R33 do reperja A3, ki je stabiliziran na objektu Umetniške akademije, društva za glasbeno in likovno umetnost, Gregorčičeva 7 ter nazaj. Na koncu smo izmerili še nivelmansko zanko 13, ki povezuje reperje A1 – A4.

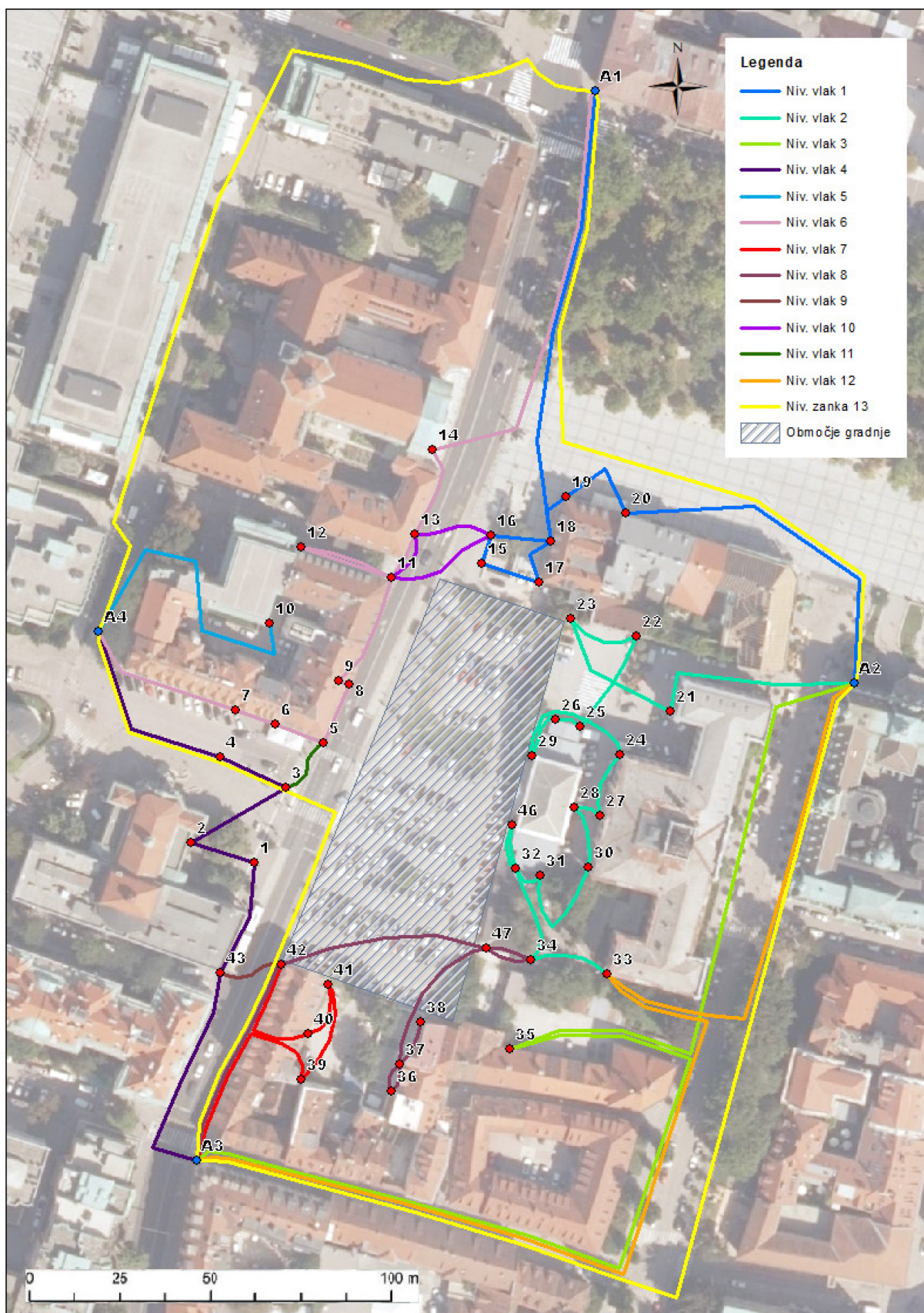
V preglednici 3 so prikazani vsi izmerjeni vlaki in reperji, ki jih ti vlaki povezujejo, ter skupne dolžine nivelmanskih vlakov.

Preglednica 3: Nivelmanski vlaki v mreži Šumi

| <i>Št. niv. vlaka</i>                             | <i>Reperji vključeni v niv. vlak</i> | <i>Dolžina tja [m]</i> | <i>Dolžina nazaj [m]</i> | <i>Skupaj [m]</i> |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1                                                 | A1, R15 – R20, A2                    | 370,8                  | 407,0                    | 777,8             |
| 2                                                 | A2, R21 – R34, R46                   | 512,0                  | 527,3                    | 1.039,3           |
| 3                                                 | A2, R35, A3                          | 438,1                  | 438,0                    | 876,1             |
| 4                                                 | A3, R1 – R4, R43, A4                 | 284,1                  | 284,1                    | 568,2             |
| 5                                                 | A4, R10                              | 101,2                  | 101,4                    | 202,6             |
| 6                                                 | A4, R5 – R9, R11 – R14, A1           | 446,4                  | 447,9                    | 897,3             |
| 7                                                 | A3, R39 – R42                        | 242,6                  | 242,6                    | 485,2             |
| 8                                                 | A3, R34, R36 – R38, R42, R47         | 373,0                  | 262,7                    | 635,7             |
| 9                                                 | R42, R43                             | 46,6                   | 46,6                     | 93,2              |
| 10                                                | R11, R13, R16                        | 106,0                  |                          | 106,0             |
| 11                                                | R3, R5                               | 26,2                   | 26,3                     | 52,5              |
| 12                                                | A2, R33, A3                          | 424,7                  | 416,4                    | 841,1             |
| 13                                                | A1 – A4                              | 1.039,2                | 1.026,3                  | 2.065,5           |
| Skupna dolžina vseh merjenih vlakov tja in nazaj: |                                      |                        |                          | <b>8.637,5</b>    |

Ob upoštevanju pravil za izmero nivelmanskih mrež visoke natančnosti (NVN) smo bili pozorni tudi na nastavitve nivelirja. Pred začetkom izmere smo počakali, da se inštrument aklimatizira na delovno temperaturo. Potem smo inštrument testirali po Förstnerjevi metodi, s katero določamo pogrešek horizontalnosti vizurne osi, ki ga inštrument nato upošteva med samo izmero. V nastavitvah nivelirja smo nastavili način čitanja razdelbe late tako, da je inštrument vsako lato odčital štirikrat in v izhodno datoteko zapisal aritmetično sredino odčitkov. Nivelir med izmero prikazuje odstopanje odčitka od aritmetične sredine zato se lahko izognemo pogrešku, ki bi nastal zaradi posedanja late ali inštrumenta ter vplivov prometa, hkrati pa nam zagotavlja višjo natančnost meritev.

Pazljivi smo bili tudi pri postavljanju in obračanju lat na izmeniščih. Žabe smo postavljali na stabilna tla, da se med obračanjem late proti novemu stojišču niso premaknile.



Slika 7: izmera nivelmanskih vlakov (vir ortofota: [gis.arso.gov.si/atlasokolja](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja))



Slika 9: Primer urejanja podatkov v Microsoft Excelu

## 6.2 Obdelava podatkov meritev

Podatke, ki jih dobimo na osnovi meritev, je potrebno obdelati. Pridobljeni podatki so odčitki nivelmanskih lat ter oddaljenost od instrumenta do posamezne late. Razlika odčitkov late zadaj in late spredaj predstavlja višinsko razliko med izmeniščema. Zaradi načina merjenja so izmerjene višinske razlike obremenjene s sistematičnimi pogreški. Merjene vrednosti zato reduciramo za popravke metra para nivelmanskih lat, razlike pet nivelmanskih lat in raztezka invar traku zaradi temperature. Podatki potrebni za izračun reduciranih višinskih razlik so zapisani v kalibracijskem poročilu posamezne late (priloga B), temperature pa smo beležili v terenski zapisnik.

Podatki in izračun srednje vrednosti popravka razdelbe uporabljenih nivelmanskih lat ter razlika njunih pet so prikazani v preglednicah 4 in 5.

Preglednica 4: Podatki iz poročil o kalibraciji

| <i>Številka late</i> | <i>Datum kalibracije</i> | <i>Popravek razdelbe <math>m_0</math> [ppm]</i> | <i>Popravek pete <math>l_0</math> [mm]</i> | <i><math>\alpha_T</math> [ppm/°C]</i> | <i><math>T_0</math> [°C]</i> |
|----------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 22633                | 12. 11. 2018             | 5,18                                            | −0,029                                     | 0,6                                   | 20                           |
| 22635                | 12. 11. 2018             | 4,86                                            | −0,028                                     | 0,6                                   | 20                           |

Preglednica 5: Podatki srednjih vrednosti popravka para nivelmanskih lat in razlika njunih pet

| <i>Parameter</i>                | <i>Vrednost</i> |
|---------------------------------|-----------------|
| $m_0^{par}$ [ppm]               | 5,02            |
| $\Delta l_0$ [mm] 22633 – 22635 | −0,001          |
| $\Delta l_0$ [mm] 22635 – 22633 | 0,001           |

Iz preglednic je razvidno, da so popravki zanemarljivo majhni sej se lati skoraj ne razlikujeta. Višinska razlika z upoštevanjem popravkov se izračuna po enačbi 3 (Marjetič, 2015):

$$\Delta h = \Delta l_0 + \Delta h_0 \cdot \{1 + (m_0^{par} + \alpha_T \cdot (T - T_0) \cdot 10^{-6})\} \quad (3)$$

kjer so:

$\Delta h$  ... popravljena višinska razlika [m],

$\Delta l_0$  ... razlika pet nivelmanskih lat [mm],

$\Delta h_0$  ... merjena višinska razlika [m],

$m_0^{par}$  ... srednja vrednost popravka razdelb nivelmanskih lat [ppm],

$\alpha_T$  ... linearni razteznostni koeficient razdelbe/invarja [ppm/°C],

$T$  ... merjena temperatura [°C],

$T_0$  ... temperatura med kalibracijo [°C].

Meritve smo obdelali v programu Microsoft Excel. Izračunali smo merjene in popravljene višinske razlike med reperji ter jih primerjali med seboj (preglednica 6). Dopustno odstopanje nivelmanskih vlakov »naprej« in »nazaj« smo izračunali po enačbi za dopustna odstopanja pri niveliranju nivelmanskih vlakov v mrežah visoke natančnosti (NVN)(enačba 4)(RGU, 1981):

$$\Delta_{dop} = \pm 2 \cdot \sqrt{d + 0,04 \cdot d^2} \quad (4)$$

kjer je  $d$  dolžina nivelmanskega vlaka izražena v kilometrih, dopustno odstopanje  $\Delta_{dop}$  pa je rezultat izražen v milimetrih.

Preglednica 6: Izračun merjenih in reduciranih višinskih razlik med reperji

| Nivelmanski vlak 1 »naprej« |     |                  |                |          | Nivelmanski vlak 1 »nazaj« |     |                  |                |          |
|-----------------------------|-----|------------------|----------------|----------|----------------------------|-----|------------------|----------------|----------|
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A1                          | R16 | 0,16913          | 0,16913        | 0,13     | A2                         | R20 | 2,32042          | 2,32041        | 0,16     |
| R16                         | R15 | 0,10242          | 0,10242        | 0,01     | R20                        | R19 | 0,84509          | 0,84509        | 0,03     |
| R15                         | R17 | 0,03650          | 0,03650        | 0,02     | R19                        | R18 | 0,07634          | 0,07634        | 0,04     |
| R17                         | R18 | -0,29740         | -0,29740       | 0,02     | R18                        | R17 | 0,29737          | 0,29737        | 0,02     |
| R18                         | R19 | -0,07619         | -0,07619       | 0,04     | R17                        | R15 | -0,03653         | -0,03653       | 0,02     |
| R19                         | R20 | -0,84496         | -0,84496       | 0,03     | R15                        | R16 | -0,10242         | -0,10242       | 0,01     |
| R20                         | A2  | -2,32045         | -2,32044       | 0,13     | R16                        | A1  | -0,16919         | -0,16919       | 0,13     |
| $\Sigma$                    |     | -3,23095         | -3,23093       | 0,37     | $\Sigma$                   |     | 3,23108          | 3,23106        | 0,41     |
|                             |     |                  |                |          | Odstopanje [mm]            |     | 0,13             | 0,13           |          |
|                             |     |                  |                |          | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 1,26             |                |          |
| Nivelmanski vlak 2 »naprej« |     |                  |                |          | Nivelmanski vlak 2 »nazaj« |     |                  |                |          |
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A2                          | R21 | 3,03615          | 3,03613        | 0,07     | R34                        | R33 | 0,12721          | 0,12721        | 0,03     |
| R21                         | R23 | 0,09980          | 0,09980        | 0,06     | R33                        | R34 | -0,12725         | -0,12725       | 0,03     |
| R23                         | R22 | -0,10377         | -0,10377       | 0,04     | R34                        | R32 | 0,10169          | 0,10169        | 0,06     |
| R22                         | R25 | -0,21735         | -0,21735       | 0,03     | R32                        | R31 | -0,14236         | -0,14236       | 0,01     |
| R25                         | R26 | 0,08068          | 0,08068        | 0,03     | R31                        | R30 | 0,16757          | 0,16757        | 0,03     |
| R26                         | R29 | 0,49273          | 0,49273        | 0,03     | R30                        | R27 | 0,00832          | 0,00832        | 0,02     |
| R29                         | R24 | -0,37550         | -0,37550       | 0,04     | R27                        | R28 | -0,11223         | -0,11223       | 0,03     |
| R24                         | R27 | 0,02307          | 0,02307        | 0,02     | R28                        | R24 | 0,08916          | 0,08916        | 0,03     |
| R27                         | R28 | -0,11224         | -0,11224       | 0,02     | R24                        | R29 | 0,37563          | 0,37563        | 0,04     |
| R28                         | R30 | 0,10403          | 0,10403        | 0,03     | R29                        | R25 | -0,57339         | -0,57339       | 0,02     |
| R30                         | R31 | -0,16748         | -0,16748       | 0,03     | R25                        | R26 | 0,08058          | 0,08058        | 0,03     |
| R31                         | R32 | 0,14237          | 0,14237        | 0,01     | R26                        | R23 | 0,24058          | 0,24058        | 0,03     |
| R32                         | R46 | 0,45005          | 0,45005        | 0,03     | R23                        | R22 | -0,10406         | -0,10406       | 0,04     |
| R46                         | R32 | -0,45006         | -0,45006       | 0,03     | R22                        | R21 | 0,00412          | 0,00412        | 0,06     |
| R32                         | R34 | -0,10160         | -0,10160       | 0,06     | R21                        | A2  | -3,03609         | -3,03607       | 0,07     |
| $\Sigma$                    |     | 2,90088          | 2,90086        | 0,51     | $\Sigma$                   |     | -2,90052         | -2,90050       | 0,53     |
|                             |     |                  |                |          | Odstopanje [mm]            |     | 0,36             | 0,36           |          |
|                             |     |                  |                |          | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 1,46             |                |          |
| Nivelmanski vlak 3 »naprej« |     |                  |                |          | Nivelmanski vlak 3 »nazaj« |     |                  |                |          |
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A2                          | R35 | 3,57602          | 3,57600        | 0,20     | A3                         | R35 | -0,18353         | -0,18353       | 0,24     |
| R35                         | A3  | 0,18348          | 0,18348        | 0,24     | R35                        | A2  | -3,57591         | -3,57589       | 0,19     |
| $\Sigma$                    |     | 3,75950          | 3,75948        | 0,44     | $\Sigma$                   |     | -3,75944         | -3,75942       | 0,44     |
|                             |     |                  |                |          | Odstopanje [mm]            |     | 0,06             | 0,06           |          |
|                             |     |                  |                |          | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 1,34             |                |          |
| Nivelmanski vlak 4 »naprej« |     |                  |                |          | Nivelmanski vlak 4 »nazaj« |     |                  |                |          |
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A3                          | R43 | 0,10457          | 0,10457        | 0,07     | A4                         | R4  | 0,34531          | 0,34531        | 0,16     |
| R43                         | R1  | -0,19446         | -0,19446       | 0,04     | R4                         | R3  | -0,00917         | -0,00917       | 0,03     |
| R1                          | R2  | 0,27281          | 0,27281        | 0,03     | R3                         | R2  | 0,26728          | 0,26728        | 0,04     |
| R2                          | R3  | -0,26724         | -0,26724       | 0,03     | R2                         | R1  | -0,27289         | -0,27289       | 0,02     |
| R3                          | R4  | 0,00918          | 0,00918        | 0,03     | R1                         | R43 | 0,19447          | 0,19447        | 0,02     |
| R4                          | A4  | -0,34532         | -0,34532       | 0,08     | R43                        | A3  | -0,10430         | -0,10430       | 0,01     |
| $\Sigma$                    |     | -0,42046         | -0,42046       | 0,28     | $\Sigma$                   |     | 0,42070          | 0,42070        | 0,28     |
|                             |     |                  |                |          | Odstopanje [mm]            |     | 0,24             | 0,24           |          |
|                             |     |                  |                |          | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 1,07             |                |          |

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 6

| Nivelmanski vlak 5 »naprej« |     |                  |                |        | Nivelmanski vlak 5 »nazaj« |     |                  |                |        |
|-----------------------------|-----|------------------|----------------|--------|----------------------------|-----|------------------|----------------|--------|
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] |
| A4                          | R10 | -0,12820         | -0,12820       | 0,10   | R10                        | A4  | 0,12819          | 0,12819        | 0,10   |
| $\Sigma$                    |     | -0,12820         | -0,12820       | 0,10   | $\Sigma$                   |     | 0,12819          | 0,12819        | 0,10   |
|                             |     |                  |                |        | Odstopanje [mm]            |     | -0,01            | -0,01          |        |
|                             |     |                  |                |        | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 0,64             |                |        |
| Nivelmanski vlak 6 »naprej« |     |                  |                |        | Nivelmanski vlak 6 »nazaj« |     |                  |                |        |
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] |
| A4                          | R7  | 0,58489          | 0,58489        | 0,05   | A1                         | R14 | 1,10823          | 1,10822        | 0,15   |
| R7                          | R6  | -0,00209         | -0,00209       | 0,02   | R14                        | R13 | -0,59501         | -0,59501       | 0,03   |
| R6                          | R5  | 0,00997          | 0,00997        | 0,02   | R13                        | R11 | -0,04392         | -0,04392       | 0,02   |
| R5                          | R8  | -0,03331         | -0,03331       | 0,06   | R11                        | R12 | 1,03075          | 1,03074        | 0,03   |
| R8                          | R9  | -0,11332         | -0,11332       | 0,01   | R12                        | R11 | -1,03073         | -1,03072       | 0,03   |
| R9                          | R11 | -0,08465         | -0,08465       | 0,04   | R11                        | R8  | 0,19797          | 0,19797        | 0,04   |
| R11                         | R12 | 1,03056          | 1,03055        | 0,03   | R8                         | R9  | -0,11327         | -0,11327       | 0,01   |
| R12                         | R11 | -1,03059         | -1,03058       | 0,03   | R9                         | R5  | 0,14681          | 0,14681        | 0,06   |
| R11                         | R14 | 0,63891          | 0,63891        | 0,05   | R5                         | R6  | -0,00996         | -0,00996       | 0,02   |
| R14                         | A1  | -1,10819         | -1,10818       | 0,15   | R6                         | R7  | 0,00197          | 0,00197        | 0,02   |
| $\Sigma$                    |     | -0,10782         | -0,10782       | 0,45   | R7                         | A4  | -0,58493         | -0,58493       | 0,05   |
|                             |     |                  |                |        | $\Sigma$                   |     | 0,10791          | 0,10791        | 0,45   |
|                             |     |                  |                |        | Odstopanje [mm]            |     | 0,09             | 0,09           |        |
|                             |     |                  |                |        | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 1,35             |                |        |
| Nivelmanski vlak 7 »naprej« |     |                  |                |        | Nivelmanski vlak 7 »nazaj« |     |                  |                |        |
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] |
| A3                          | R40 | -0,15558         | -0,15558       | 0,10   | R42                        | R40 | -0,29182         | -0,29182       | 0,07   |
| R40                         | R41 | 0,06599          | 0,06599        | 0,03   | R40                        | R41 | 0,06597          | 0,06597        | 0,03   |
| R41                         | R39 | -0,08508         | -0,08508       | 0,06   | R41                        | R39 | -0,08509         | -0,08509       | 0,06   |
| R39                         | R42 | 0,31090          | 0,31090        | 0,06   | R39                        | A3  | 0,17477          | 0,17477        | 0,09   |
| $\Sigma$                    |     | 0,13623          | 0,13623        | 0,24   | $\Sigma$                   |     | -0,13617         | -0,13617       | 0,24   |
|                             |     |                  |                |        | Odstopanje [mm]            |     | 0,06             | 0,06           |        |
|                             |     |                  |                |        | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 0,99             |                |        |
| Nivelmanski vlak 8 »naprej« |     |                  |                |        | Nivelmanski vlak 8 »nazaj« |     |                  |                |        |
| OD                          | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] | OD                         | DO  | $\Delta h_0$ [m] | $\Delta h$ [m] | D [km] |
| A3                          | R42 | 0,13613          | 0,13613        | 0,07   | R34                        | R47 | 0,64225          | 0,64225        | 0,01   |
| R42                         | R47 | -0,35300         | -0,35300       | 0,07   | R47                        | R34 | -0,64228         | -0,64228       | 0,01   |
| R47                         | R37 | 0,60062          | 0,60062        | 0,04   | R34                        | R47 | 0,64225          | 0,64225        | 0,01   |
| R37                         | R36 | -0,25988         | -0,25988       | 0,01   | R47                        | R42 | 0,35310          | 0,35310        | 0,07   |
| R36                         | R37 | 0,25990          | 0,25990        | 0,01   | R42                        | A3  | -0,13605         | -0,13605       | 0,06   |
| R37                         | R36 | -0,25994         | -0,25994       | 0,01   | $\Sigma$                   |     | 0,85927          | 0,85927        | 0,17   |
| R36                         | R37 | 0,25994          | 0,25994        | 0,01   |                            |     |                  |                |        |
| R37                         | R38 | -0,13635         | -0,13635       | 0,02   |                            |     |                  |                |        |
| R38                         | R37 | 0,13639          | 0,13639        | 0,02   |                            |     |                  |                |        |
| R37                         | R38 | -0,13639         | -0,13639       | 0,02   |                            |     |                  |                |        |
| R38                         | R37 | 0,13639          | 0,13639        | 0,02   |                            |     |                  |                |        |
| R37                         | R47 | -0,60064         | -0,60064       | 0,04   |                            |     |                  |                |        |
| R47                         | R37 | 0,60057          | 0,60057        | 0,04   |                            |     |                  |                |        |
| R37                         | R47 | -0,60072         | -0,60072       | 0,04   |                            |     |                  |                |        |
| R47                         | R34 | -0,64223         | -0,64223       | 0,01   |                            |     |                  |                |        |
| $\Sigma$                    |     | -0,85921         | -0,85921       | 0,46   |                            |     |                  |                |        |
|                             |     |                  |                |        | Odstopanje [mm]            |     | 0,06             | 0,06           |        |
|                             |     |                  |                |        | $\Delta_{dop}$ [mm]        |     | 1,13             |                |        |

Se nadaljuje ...



... nadaljevanje preglednice 6

| Nivelmanski vlak 9 »naprej«   |     |                  |                |          |
|-------------------------------|-----|------------------|----------------|----------|
| OD                            | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| R43                           | R42 | 0,03175          | 0,03175        | 0,05     |
| $\Sigma$                      |     | 0,03175          | 0,03175        | 0,05     |
|                               |     |                  |                |          |
| Nivelmanski vlak 10 »naprej«  |     |                  |                |          |
| OD                            | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| R11                           | R16 | -0,30015         | -0,30015       | 0,04     |
| R16                           | R13 | 0,34406          | 0,34406        | 0,03     |
| R13                           | R11 | -0,04391         | -0,04391       | 0,04     |
| $\Sigma$                      |     | 0,00000          | 0,00000        | 0,11     |
| Odstopanje [mm]               |     | 0,00             | 0,00           |          |
| $\Delta_{dop}$ [mm]           |     | 0,65             |                |          |
| Nivelmanski vlak 11 »naprej«  |     |                  |                |          |
| OD                            | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| R5                            | R3  | -0,25661         | -0,25661       | 0,03     |
| $\Sigma$                      |     | -0,25661         | -0,25661       | 0,03     |
|                               |     |                  |                |          |
| Nivelmanski vlak 12 »naprej«  |     |                  |                |          |
| OD                            | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A2                            | R33 | 3,02770          | 3,02766        | 0,18     |
| R33                           | A3  | 0,73223          | 0,732221       | 0,24     |
| $\Sigma$                      |     | 3,75993          | 3,75988        | 0,42     |
|                               |     |                  |                |          |
| Nivelmanska zanka 13 »naprej« |     |                  |                |          |
| OD                            | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A2                            | A1  | 3,23112          | 3,23110        | 0,23     |
| A1                            | A4  | 0,10812          | 0,10812        | 0,27     |
| A4                            | A3  | 0,42086          | 0,42086        | 0,20     |
| A3                            | A2  | -3,75955         | -3,75953       | 0,34     |
| $\Sigma$                      |     | 0,00055          | 0,00055        | 1,04     |
|                               |     |                  |                |          |

| Nivelmanski vlak 9 »nazaj«   |     |                  |                |          |
|------------------------------|-----|------------------|----------------|----------|
| OD                           | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| R42                          | R43 | -0,03173         | -0,03173       | 0,05     |
| $\Sigma$                     |     | -0,03173         | -0,03173       | 0,05     |
| Odstopanje [mm]              |     | 0,02             | 0,02           |          |
| $\Delta_{dop}$ [mm]          |     | 0,43             |                |          |
|                              |     |                  |                |          |
| Nivelmanski vlak 11 »nazaj«  |     |                  |                |          |
| OD                           | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| R3                           | R5  | 0,25665          | 0,25665        | 0,03     |
| $\Sigma$                     |     | 0,25665          | 0,25665        | 0,03     |
| Odstopanje [mm]              |     | 0,04             | 0,04           |          |
| $\Delta_{dop}$ [mm]          |     | 0,32             |                |          |
| Nivelmanski vlak 12 »nazaj«  |     |                  |                |          |
| OD                           | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A3                           | R33 | -0,73198         | -0,73197       | 0,27     |
| R33                          | A2  | -3,02777         | -3,02773       | 0,15     |
| $\Sigma$                     |     | -3,75975         | -3,75970       | 0,42     |
| Odstopanje [mm]              |     | 0,18             | 0,18           |          |
| $\Delta_{dop}$ [mm]          |     | 1,31             |                |          |
| Nivelmanska zanka 13 »nazaj« |     |                  |                |          |
| OD                           | DO  | $\Delta h_o$ [m] | $\Delta h$ [m] | $D$ [km] |
| A2                           | A3  | 3,75993          | 3,75991        | 0,33     |
| A3                           | A4  | -0,42089         | -0,42089       | 0,19     |
| A4                           | A1  | -0,10766         | -0,10766       | 0,27     |
| A1                           | A2  | -3,23082         | -3,23080       | 0,24     |
| $\Sigma$                     |     | 0,00056          | 0,00056        | 1,03     |
| Odstopanje [mm]              |     | 1,11             | 1,11           |          |
| $\Delta_{dop}$ [mm]          |     | 2,07             |                |          |

Iz preglednice 6 je razvidno, da so razlike med merjenimi  $\Delta h_0$  in popravljenimi  $\Delta h$  višinskimi razlikami zelo majhne ali pa jih sploh ni. Velikost popravkov, ki jih dobi določena višinska razlika, se spreminja z večanjem višinske razlike (seveda ob konstantni temperaturi). Večja kot je višinska razlika, večji je njen popravek. Ker so višinske razlike v nivelmanski mreži Šumi majhne, so posledično majhni tudi popravki. Največji izračunan popravek znaša štiri stotine milimetra, drugi pa so večinoma velikosti nekaj tisočink milimetra in v zgornji preglednici niso vidni.

Odstopanja pri zapiranju nivelmanskih linij in zank so v našem primeru pred in po upoštevanju popravkov enaka. Najmanjše odstopanje znaša 0,00 mm največje pa 1,11 mm. Vsa odstopanja so tako pred kot tudi po upoštevanju popravkov znotraj dopustnih vrednosti. Največje odstopanje je v nivelmanskem vlak 13 in dosega 74% dopustnega odstopanja. Razlog za tako odstopanje je v veliki dolžini zanke z veliko izmenišči.

### 6.3 Ocena natančnosti meritev

Oceno natančnosti meritev izvedemo pred izravnavo (a priori) in po izravnavi (a posteriori). A priori ocena natančnosti poda oceno kakovosti izvedenih meritev preden jih izravnamo. Določimo jo s pomočjo odstopanj obojestransko merjenih nivelmanskih linij oz. vlakov ali zank. Oceno natančnosti naših meritev prikazujemo v spodnji preglednici 7. Natančnosti meritev so podane na kilometer dvojnega nivelmana.

Preglednica 7: A priori ocena natančnosti meritev

| <i>Parameter</i> | <i>Vrednost</i> |
|------------------|-----------------|
| $\sigma_V$       | 0,38 mm/km      |
| $\sigma_Z$       | 0,40 mm/km      |

Enačbe za izračun ocene natančnosti (Ambrožič, 2015):

- ocena natančnosti na osnovi razlik dvojnih merjenj nivelmanskega vlaka:

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{4 \cdot n_V} \left[ \frac{\rho^2}{d_V} \right] \quad (5)$$

kjer je:

$n_V$  ... število nivelmanskih vlakov,

$\rho$  ... odstopanje posameznega vlaka v mm,

$d_V$  ... dolžina posameznega nivelmanskega vlaka v km.

- ocena natančnosti na osnovi odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank:

$$\sigma_Z^2 = \frac{1}{2 \cdot n_Z} \left[ \frac{f^2}{d_Z} \right] \quad (6)$$

$$f = 0 - \sum \Delta h \quad (7)$$

kjer je:

$n_Z$  ... število nivelmanskih zank,

$f$  ... odstopanje pri zapiranju nivelmanske zanke v mm,

$d_Z$  ... dolžina nivelmanske zanke v km.

- ocena iz rezultatov izravnave (a posteriori):

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{[pvv]}{r}} \quad (8)$$

kjer je:

$p$  ... utež nivelmanskega vlaka,

$v$  ... popravki merjenih višinskih razlik po izravnavi,

$r$  ... število nadštevilnih meritev.

## 7 IZRAVNAVA VIŠINSKIH RAZLIK PO METODI NAJMANJŠIH KVADRATOV

Popravljenе višinske razlike med reperji je potrebno izravnati. Rezultat izravnave so definitivne višine reperjev in njihove natančnosti. Za izračun enolične določitve višin reperjev potrebujemo minimalno število meritev  $n_0$ , vendar v tem primeru nimamo nadzora nad grobo pogrešenimi meritvami. Zato vedno opravimo nadštevilne meritve in si tako zagotovimo več količin kot jih je nujno potrebno za določitev enolične rešitve. Z nadštevilnostjo pa se pojavi več možnih rešitev iskanih količin, kar rešimo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov (MNK) s katero dobimo optimalno rešitev problema. Metoda deluje v skladu s pogojem, da je vsota kvadratov popravkov meritev minimalna, ter da je hkrati izpolnjen matematični model. Poznamo dva načina izravnave po MNK, to sta pogojni in posredni. Oba nam zagotavljata enake rezultate, vendar se v današnjem času večinoma uporablja posredni način (Kogoj in Stopar, 2009).

Za zagotovitev kakovostnih rezultatov izravnave moramo merjene podatke predhodno obdelati. Predhodna obdelava merjenih količin je ključna za ugotavljanje grobih in sistematičnih pogreškov, saj izravnavo po metodi najmanjših kvadratov zmanjša možnost odkritja grobih pogreškov (Kogoj in Stopar, 2009). Vhodni podatki za izravnavo nivelmanske mreže so torej popravljene višinske razlike med reperji, ter oddaljenosti med njimi.

Reperji v nivelmanski mreži Šumi so povezani z nivelmanskimi vlaki, ki tvorijo nekaj nivelmanskih zank. Izravnavo smo izvedli po metodi najmanjših kvadratov s programom VimWin. Mrežo smo izravnavali večkrat na različne načine, da bi ugotovili optimalno določitev končnih višin reperjev. Najprej smo izravnavali celotno mrežo tako, da smo uporabili vse merjene višinske razlike med vsemi reperji v mreži. Za izhodiščno višino smo kot dani reper uporabili referenčni reper A1. Nadaljevali smo z ločenimi izravnavami posameznih nivelmanskih zank, ki smo jih tvorili iz merjenih nivelmanskih vlakov. Nivelmanske vlake, ki smo jih vključili v posamezno izravnavo smo zapisali v preglednico 8. Lokacije reperjev in potek nivelmanskih vlakov je prikazan na sliki 7, v poglavju 5 Terenska izmera.

Preglednica 8: Nivelmanski vlaki in merjene višinske razlike vključene v posamezno izravnavo

| <i>Izravnavava</i> | <i>Nivelmanski vlaki oz. višinske razlike vključene v izravnavo</i> |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------|
| I                  | Vse merjene višinske razlike                                        |
| II                 | Zanka 13                                                            |
| III                | Niv. vlak 1 in zanka 13                                             |
| IV                 | Niv. vlak 2 in 12                                                   |
| V                  | Niv. vlak 2, 8 in 12                                                |
| VI                 | Niv. vlak 4 in zanka 13                                             |
| VII                | Niv. vlak 6 in zanka 13                                             |
| VIII               | Niv. vlak 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 in 12                              |
| IX                 | Niv. vlak 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12 in 13                          |
| X                  | Niv. vlak 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 in 12                   |

### 7.1 Posredna izravnavo po MNK

V nadaljevanju opisujemo postopek posredne izravnave po metodi najmanjših kvadratov (MNK). Postopek je povzet po zapiskih pri predmetu Geodetski inštrumenti in metode (Ambrožič, 2015). Začnemo z definicijo merjenih in iskanih količin ter določimo funkcijsko povezavo med njimi. Tvorimo enačbe popravkov in upoštevamo sledeče:

- število enačb je enako številu meritev,
- enačbe vsebujejo meritve, njihove popravke, neznanke in konstante,
- v enačbah je  $u$  oziroma  $n_0$  neznank:

$$F_1 = l_1 + v_1 - x_1 = 0$$

$$F_2 = l_2 + v_2 - x_2 = 0$$

$$\vdots$$

$$F_n = l_n + v_n - x_n = 0$$

(9)

kjer so:

$l_i$  ... vrednost merjene količine,

$v_i$  ... popravljene merjene količine,

$x_j$  ... neznanke.

Enačbo 9 zapišemo v matrični obliki. Pri čemer matriko  $\mathbf{A}$  sestavljajo odvodi enačb popravkov po vseh neznankah, za izračun koeficientov pa uporabimo približne vrednosti neznank

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_n}{\partial x_u} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \\ \delta x_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (10)$$

kjer so:

$\mathbf{v}$  ... vektor popravkov merjenih količin dimenzije  $[n \times 1]$ ,

$\mathbf{A}$  ... matrika koeficientov enačb popravkov dimenzije  $[n \times u]$ ,

$\mathbf{x}$  ... vektor neznank dimenzije  $[u \times 1]$ ,

$\mathbf{f}$  ... vektor odstopanj dimenzije  $[n \times 1]$ .

Uteži pri izravnavi nivelmanske mreže določimo na osnovi oddaljenosti (km) med merjenimi reperji in sicer za enostransko merjene višinske razlike,

$$p_{\Delta h} = \frac{1}{2d} \quad (11)$$

ter za dvostransko merjene višinske razlike

$$p_{\Delta h} = \frac{1}{d} \quad (12)$$

Matrika uteži je za nekorelirana opazovanja diagonalna matrika

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sledi sestava normalnih enačb, kjer popravke merjenih količin določamo na osnovi kriterija, da bo vsota kvadratov meritev minimalna ( $[pvv] = \min$ ).

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{n} \quad (14)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} \quad (15)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{f} \quad (16)$$

kjer je:

$\mathbf{N}$ ... matrika koeficientov normalnih enačb,

$\mathbf{n}$ ... vektor prostih členov.

Rešitev sistema normalnih enačb je izračun vrednosti  $\mathbf{x}$

$$\mathbf{x} = -\mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{n} = -(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{f}) \quad (17)$$

Na koncu izračunamo popravke meritev:

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ax} + \mathbf{f} \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (19)$$

kjer je:

$\hat{\mathbf{l}}$ ... najverjetnejša izravnana vrednost merjene količine,

$\mathbf{l}$ ... merjena vrednost,

$\mathbf{v}$ ... popravek merjenih vrednosti.

## 7.2 Izravnava s programom VimWin

Izravnave smo izvedli s pomočjo programa za izravnavo višinskih geodetskih mrež VimWin. Postopek izravnave poteka s posredno izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Program sta izdelala izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič in prof. dr. Goran Turk. Uporabili smo različico programa 5.1 iz leta 2016, prva različica pa je bila izdelana leta 1990. Pri izravnavi so nam bila v pomoč navodila za uporabo programa (Ambrožič, Turk, 2004).

Program deluje tako, da prebere vhodno datoteko, ki jo pripravimo pred izravnavo. Datoteka se pripravi z urejevalnikom besedil (WordPad, NotePad++ ipd.) in ima končnico \*.pod. Pozorni moramo biti predvsem na uporabo decimalnih pik in ne vejic. Rezultate izravnave zapiše v izhodno datoteko \*.rez.

Preglednica 9: vhodna datoteka za izravnavo s programom VimWin

| Vhodna datoteka          | Opis                                                                                                                                                          |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| *5                       | Število decimalnih mest za izpis višinskih razlik in višin                                                                                                    |
| *D                       | D kot dani reperji                                                                                                                                            |
| 'A1' 298.40220           | Ime reperja in njegova višina                                                                                                                                 |
| *N                       | N kot novi reperji                                                                                                                                            |
| 'A2' 295.00000           | Ime reperja in njegova višina                                                                                                                                 |
| *E                       | E kot enota merjenih dolžin med reperji                                                                                                                       |
| 'm'                      | Enota m ali km                                                                                                                                                |
| *O                       | O kot opazovanja                                                                                                                                              |
| 'A1' 'A2' -3.23080 237.1 | Reper zadaj nato reper spredaj, višinska razlika v metrih in razdalja med reperjema v metrih ali kilometrih, odvisno kaj smo podali za enoto merjenih dolžin. |
| 'A2' 'A1' 3.23110 231.2  |                                                                                                                                                               |
| ...                      |                                                                                                                                                               |
| *K                       | K za konec vhodnih podatkov                                                                                                                                   |

## 8 REZULTATI IZRAVNAVE

Rezultati izravnave so izravnane višine reperjev v nivelmanski mreži Šumi s pripadajočo oceno natančnosti (priloga A). Višinsko mrežo smo izravnali na več načinov zato v preglednici 10 prikazujemo izravnane višine in njihove standardne odklone za vsako izravnavo posebej. Vsaka izravnava ima tudi svojo a posteriori oceno natančnosti meritev po izravnavi (referenčna standardna deviacija  $\hat{\sigma}_0$ ).

Preglednica 10: rezultati izravnave

| <i>Izravnava I</i>                                                          |              |                 | <i>Izravnava I</i>   |              |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------|--------------|-----------------|
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A1                                                                          | 298,40220    | 0,00            | R22                  | 298,20320    | 0,09            |
| A2                                                                          | 295,17121    | 0,07            | R23                  | 298,30710    | 0,09            |
| A3                                                                          | 298,93084    | 0,07            | R24                  | 298,18367    | 0,09            |
| A4                                                                          | 298,51007    | 0,07            | R25                  | 297,98586    | 0,09            |
| R1                                                                          | 298,84073    | 0,08            | R26                  | 298,06651    | 0,09            |
| R2                                                                          | 299,11356    | 0,07            | R27                  | 298,20675    | 0,09            |
| R3                                                                          | 298,84628    | 0,07            | R28                  | 298,09450    | 0,10            |
| R4                                                                          | 298,85544    | 0,07            | R29                  | 298,55924    | 0,09            |
| R5                                                                          | 299,10291    | 0,07            | R30                  | 298,19846    | 0,09            |
| R6                                                                          | 299,09294    | 0,07            | R31                  | 298,03093    | 0,09            |
| R7                                                                          | 299,09498    | 0,07            | R32                  | 298,17330    | 0,09            |
| R8                                                                          | 299,06949    | 0,06            | R33                  | 298,19887    | 0,08            |
| R9                                                                          | 298,95618    | 0,06            | R34                  | 298,07165    | 0,08            |
| R10                                                                         | 298,38188    | 0,10            | R35                  | 298,74724    | 0,10            |
| R11                                                                         | 298,87152    | 0,06            | R36                  | 299,05462    | 0,09            |
| R12                                                                         | 299,90217    | 0,06            | R37                  | 299,31453    | 0,09            |
| R13                                                                         | 298,91543    | 0,06            | R38                  | 299,17816    | 0,09            |
| R14                                                                         | 299,51043    | 0,06            | R39                  | 298,75607    | 0,09            |
| R15                                                                         | 298,67379    | 0,06            | R40                  | 298,77518    | 0,09            |
| R16                                                                         | 298,57137    | 0,05            | R41                  | 298,84116    | 0,09            |
| R17                                                                         | 298,71030    | 0,06            | R42                  | 299,06696    | 0,08            |
| R18                                                                         | 298,41292    | 0,07            | R43                  | 299,03522    | 0,08            |
| R19                                                                         | 298,33665    | 0,07            | R46                  | 298,62335    | 0,10            |
| R20                                                                         | 297,49163    | 0,08            | R47                  | 298,71390    | 0,08            |
| R21                                                                         | 298,20732    | 0,08            |                      |              |                 |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,31 |              |                 |                      |              |                 |
| <i>Izravnava II</i>                                                         |              |                 | <i>Izravnava II</i>  |              |                 |
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A1                                                                          | 298,40220    | 0,00            | A3                   | 298,93097    | 0,14            |
| A2                                                                          | 295,17124    | 0,12            | A4                   | 298,51009    | 0,13            |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,40 |              |                 |                      |              |                 |
| <i>Izravnava III</i>                                                        |              |                 | <i>Izravnava III</i> |              |                 |
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A1                                                                          | 298,40220    | 0,00            | R17                  | 298,71030    | 0,07            |
| A2                                                                          | 295,17123    | 0,08            | R18                  | 298,41292    | 0,08            |
| R15                                                                         | 298,67379    | 0,07            | R19                  | 298,33666    | 0,08            |
| R16                                                                         | 298,57137    | 0,07            | R20                  | 297,49164    | 0,08            |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,31 |              |                 |                      |              |                 |

se nadaljuje...

...nadaljevanje preglednice 10

| <i>Izravnava IV</i>                                                         |              |                 | <i>Izravnava IV</i>   |              |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                 | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A2                                                                          | 295,17121    | 0,00            | R28                   | 298,09452    | 0,10            |
| R21                                                                         | 298,20732    | 0,06            | R29                   | 298,55925    | 0,09            |
| R22                                                                         | 298,20320    | 0,08            | R30                   | 298,19848    | 0,09            |
| R23                                                                         | 298,30711    | 0,08            | R31                   | 298,03096    | 0,09            |
| R24                                                                         | 298,18369    | 0,09            | R32                   | 298,17332    | 0,09            |
| R25                                                                         | 297,98587    | 0,09            | R33                   | 298,19891    | 0,09            |
| R26                                                                         | 298,06651    | 0,09            | R34                   | 298,07168    | 0,09            |
| R27                                                                         | 298,20677    | 0,09            | R46                   | 298,62337    | 0,10            |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,35 |              |                 |                       |              |                 |
| <i>Izravnava V</i>                                                          |              |                 | <i>Izravnava V</i>    |              |                 |
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                 | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A2                                                                          | 295,17121    | 0,00            | R30                   | 298,19849    | 0,08            |
| A3                                                                          | 298,93093    | 0,10            | R31                   | 298,03096    | 0,08            |
| R21                                                                         | 298,20732    | 0,05            | R32                   | 298,17333    | 0,08            |
| R22                                                                         | 298,20320    | 0,07            | R33                   | 298,19891    | 0,07            |
| R23                                                                         | 298,30711    | 0,07            | R34                   | 298,07168    | 0,08            |
| R24                                                                         | 298,18369    | 0,08            | R36                   | 299,05466    | 0,09            |
| R25                                                                         | 297,98587    | 0,08            | R37                   | 299,31457    | 0,08            |
| R26                                                                         | 298,06652    | 0,08            | R38                   | 299,17819    | 0,09            |
| R27                                                                         | 298,20677    | 0,08            | R42                   | 299,06700    | 0,09            |
| R28                                                                         | 298,09452    | 0,08            | R46                   | 298,62338    | 0,09            |
| R29                                                                         | 298,55925    | 0,08            | R47                   | 298,71394    | 0,08            |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,31 |              |                 |                       |              |                 |
| <i>Izravnava VI</i>                                                         |              |                 | <i>Izravnava VI</i>   |              |                 |
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                 | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A3                                                                          | 298,93084    | 0,00            | R3                    | 298,84630    | 0,08            |
| A4                                                                          | 298,51009    | 0,09            | R4                    | 298,85545    | 0,09            |
| R1                                                                          | 298,84074    | 0,07            | R43                   | 299,03523    | 0,06            |
| R2                                                                          | 299,11357    | 0,08            |                       |              |                 |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,36 |              |                 |                       |              |                 |
| <i>Izravnava VII</i>                                                        |              |                 | <i>Izravnava VII</i>  |              |                 |
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                 | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A1                                                                          | 298,40220    | 0,00            | R9                    | 298,95617    | 0,11            |
| A4                                                                          | 298,51006    | 0,12            | R11                   | 298,87151    | 0,11            |
| R5                                                                          | 299,10289    | 0,12            | R12                   | 299,90216    | 0,11            |
| R6                                                                          | 299,09293    | 0,12            | R13                   | 298,91542    | 0,11            |
| R7                                                                          | 299,09496    | 0,12            | R14                   | 299,51042    | 0,10            |
| R8                                                                          | 299,06948    | 0,11            |                       |              |                 |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,42 |              |                 |                       |              |                 |
| <i>Izravnava VIII</i>                                                       |              |                 | <i>Izravnava VIII</i> |              |                 |
| Reper                                                                       | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper                 | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A1                                                                          | 298,40220    | 0,00            | R22                   | 298,20311    | 0,13            |
| A2                                                                          | 295,17112    | 0,11            | R23                   | 298,30701    | 0,13            |
| A3                                                                          | 298,93072    | 0,12            | R24                   | 298,18357    | 0,13            |
| A4                                                                          | 298,51009    | 0,11            | R25                   | 297,98577    | 0,13            |
| R1                                                                          | 298,84067    | 0,12            | R26                   | 298,06641    | 0,13            |
| R2                                                                          | 299,11351    | 0,12            | R27                   | 298,20665    | 0,13            |
| R3                                                                          | 298,84625    | 0,12            | R28                   | 298,09440    | 0,13            |

Se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 10

|                                                                             |              |                                   |  |                     |              |                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------|--|---------------------|--------------|-----------------------------------|
| R4                                                                          | 298,85542    | 0,12                              |  | R29                 | 298,55914    | 0,13                              |
| R5                                                                          | 299,10291    | 0,10                              |  | R30                 | 298,19836    | 0,13                              |
| R6                                                                          | 299,09295    | 0,11                              |  | R31                 | 298,03083    | 0,13                              |
| R7                                                                          | 299,09499    | 0,11                              |  | R32                 | 298,17319    | 0,13                              |
| R8                                                                          | 299,06949    | 0,10                              |  | R33                 | 298,19876    | 0,12                              |
| R9                                                                          | 298,95619    | 0,10                              |  | R34                 | 298,07154    | 0,12                              |
| R10                                                                         | 298,38189    | 0,13                              |  | R35                 | 298,74714    | 0,13                              |
| R11                                                                         | 298,87153    | 0,09                              |  | R36                 | 299,05451    | 0,13                              |
| R12                                                                         | 299,90218    | 0,09                              |  | R37                 | 299,31442    | 0,13                              |
| R13                                                                         | 298,91544    | 0,09                              |  | R38                 | 299,17805    | 0,13                              |
| R14                                                                         | 299,51043    | 0,08                              |  | R39                 | 298,75595    | 0,13                              |
| R15                                                                         | 298,67375    | 0,08                              |  | R40                 | 298,77506    | 0,13                              |
| R16                                                                         | 298,57133    | 0,08                              |  | R41                 | 298,84104    | 0,13                              |
| R17                                                                         | 298,71026    | 0,08                              |  | R42                 | 299,06684    | 0,12                              |
| R18                                                                         | 298,41288    | 0,09                              |  | R43                 | 299,03514    | 0,12                              |
| R19                                                                         | 298,33660    | 0,09                              |  | R46                 | 298,62325    | 0,13                              |
| R20                                                                         | 297,49158    | 0,10                              |  | R47                 | 298,71379    | 0,12                              |
| R21                                                                         | 298,20723    | 0,12                              |  |                     |              |                                   |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm] = 0,31    |              |                                   |  |                     |              |                                   |
| <b>Izravnavo IX</b>                                                         |              |                                   |  | <b>Izravnavo IX</b> |              |                                   |
| <b>Reper</b>                                                                | <b>H [m]</b> | <b><math>\sigma_H</math> [mm]</b> |  | <b>Reper</b>        | <b>H [m]</b> | <b><math>\sigma_H</math> [mm]</b> |
| A1                                                                          | 298,40220    | 0,00                              |  | R22                 | 298,20320    | 0,10                              |
| A2                                                                          | 295,17121    | 0,07                              |  | R23                 | 298,30711    | 0,10                              |
| A3                                                                          | 298,93085    | 0,08                              |  | R24                 | 298,18367    | 0,10                              |
| A4                                                                          | 298,51008    | 0,08                              |  | R25                 | 297,98586    | 0,10                              |
| R1                                                                          | 298,84075    | 0,09                              |  | R26                 | 298,06651    | 0,10                              |
| R2                                                                          | 299,11358    | 0,09                              |  | R27                 | 298,20675    | 0,10                              |
| R3                                                                          | 298,84630    | 0,09                              |  | R28                 | 298,09450    | 0,10                              |
| R4                                                                          | 298,85545    | 0,09                              |  | R29                 | 298,55924    | 0,10                              |
| R5                                                                          | 299,10291    | 0,08                              |  | R30                 | 298,19846    | 0,10                              |
| R6                                                                          | 299,09295    | 0,08                              |  | R31                 | 298,03094    | 0,10                              |
| R7                                                                          | 299,09498    | 0,08                              |  | R32                 | 298,17330    | 0,10                              |
| R8                                                                          | 299,06949    | 0,08                              |  | R33                 | 298,19887    | 0,09                              |
| R9                                                                          | 298,95619    | 0,08                              |  | R34                 | 298,07165    | 0,09                              |
| R10                                                                         | 298,38189    | 0,10                              |  | R35                 | 298,74724    | 0,10                              |
| R11                                                                         | 298,87152    | 0,08                              |  | R36                 | 299,05462    | 0,10                              |
| R12                                                                         | 299,90217    | 0,08                              |  | R37                 | 299,31453    | 0,10                              |
| R13                                                                         | 298,91544    | 0,08                              |  | R38                 | 299,17816    | 0,10                              |
| R14                                                                         | 299,51043    | 0,08                              |  | R39                 | 298,75607    | 0,10                              |
| R15                                                                         | 298,67378    | 0,07                              |  | R40                 | 298,77519    | 0,10                              |
| R16                                                                         | 298,57136    | 0,07                              |  | R41                 | 298,84116    | 0,10                              |
| R17                                                                         | 298,71030    | 0,08                              |  | R42                 | 299,06696    | 0,09                              |
| R18                                                                         | 298,41291    | 0,08                              |  | R43                 | 299,03523    | 0,09                              |
| R19                                                                         | 298,33665    | 0,08                              |  | R46                 | 298,62335    | 0,10                              |
| R20                                                                         | 297,49163    | 0,08                              |  | R47                 | 298,71390    | 0,09                              |
| R21                                                                         | 298,20732    | 0,09                              |  |                     |              |                                   |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,32 |              |                                   |  |                     |              |                                   |

se nadaljuje...



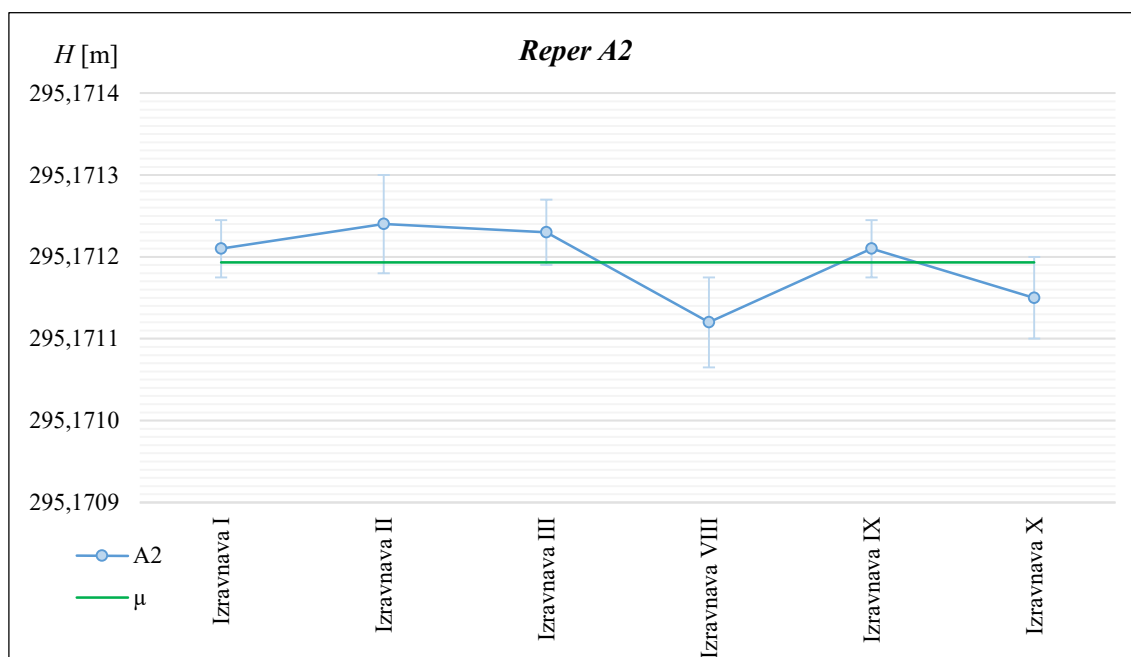
... nadaljevanje preglednice 10

| <i>Izravnava X</i>                                                              |              |                 | <i>Izravnava X</i> |              |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Reper                                                                           | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] | Reper              | <i>H</i> [m] | $\sigma_H$ [mm] |
| A1                                                                              | 298,40220    | 0,00            | R22                | 298,20313    | 0,12            |
| A2                                                                              | 295,17115    | 0,10            | R23                | 298,30704    | 0,12            |
| A3                                                                              | 298,93074    | 0,10            | R24                | 298,18360    | 0,12            |
| A4                                                                              | 298,51007    | 0,10            | R25                | 297,98579    | 0,12            |
| R1                                                                              | 298,84067    | 0,10            | R26                | 298,06644    | 0,12            |
| R2                                                                              | 299,11352    | 0,09            | R27                | 298,20668    | 0,12            |
| R3                                                                              | 298,84625    | 0,09            | R28                | 298,09442    | 0,12            |
| R4                                                                              | 298,85542    | 0,10            | R29                | 298,55917    | 0,12            |
| R5                                                                              | 299,10289    | 0,09            | R30                | 298,19839    | 0,12            |
| R6                                                                              | 299,09293    | 0,09            | R31                | 298,03086    | 0,11            |
| R7                                                                              | 299,09497    | 0,09            | R32                | 298,17322    | 0,11            |
| R8                                                                              | 299,06947    | 0,08            | R33                | 298,19879    | 0,11            |
| R9                                                                              | 298,95617    | 0,08            | R34                | 298,07157    | 0,11            |
| R10                                                                             | 298,38188    | 0,12            | R35                | 298,74716    | 0,12            |
| R11                                                                             | 298,87150    | 0,06            | R36                | 299,05454    | 0,11            |
| R12                                                                             | 299,90215    | 0,07            | R37                | 299,31445    | 0,11            |
| R13                                                                             | 298,91541    | 0,06            | R38                | 299,17807    | 0,11            |
| R14                                                                             | 299,51041    | 0,06            | R39                | 298,75598    | 0,11            |
| R15                                                                             | 298,67377    | 0,06            | R40                | 298,77509    | 0,11            |
| R16                                                                             | 298,57135    | 0,06            | R41                | 298,84107    | 0,11            |
| R17                                                                             | 298,71028    | 0,07            | R42                | 299,06687    | 0,10            |
| R18                                                                             | 298,41289    | 0,07            | R43                | 299,03514    | 0,10            |
| R19                                                                             | 298,33662    | 0,08            | R46                | 298,62327    | 0,12            |
| R20                                                                             | 297,49160    | 0,09            | R47                | 298,71382    | 0,11            |
| R21                                                                             | 298,20725    | 0,11            |                    |              |                 |
| A posteriori ocena natančnosti po izravnavi $\widehat{\sigma}_0$ [mm/km] = 0,30 |              |                 |                    |              |                 |

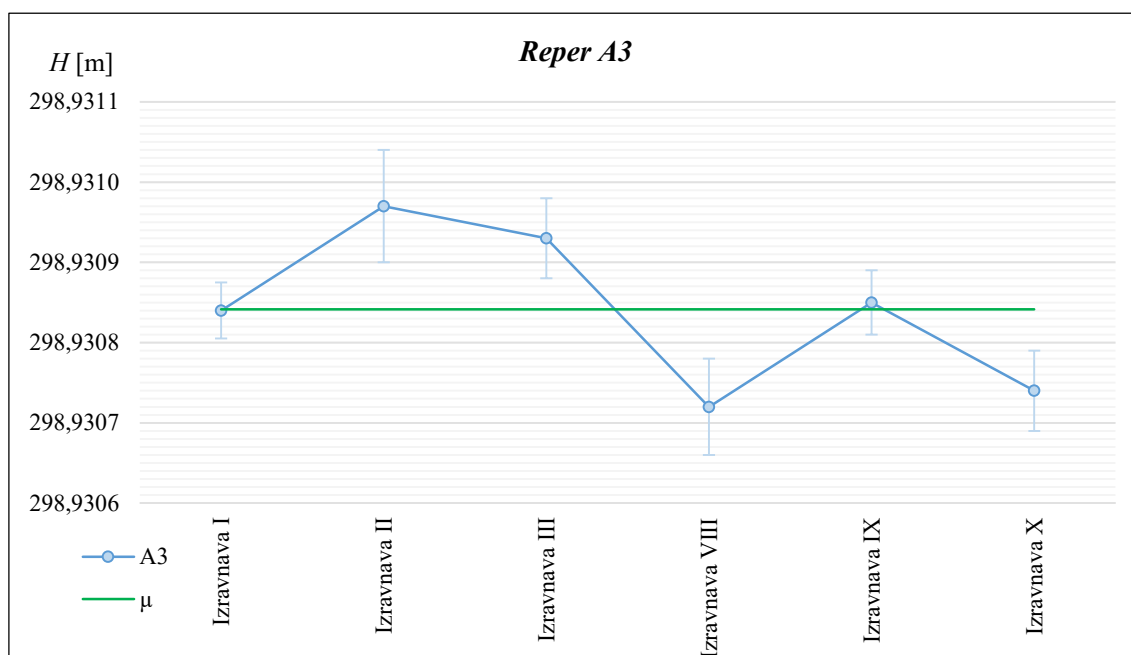
Po izvedenih izravnavah primerjamo a priori in a posteriori oceno natančnosti meritev pri niveliranju nivelmanskih vlakov in zank v obeh smereh. Kot je razvidno iz preglednice 7 je a priori ocena natančnosti meritev na osnovi razlik dvojnih merenj nivelmanskih vlakov pred izravnavo znašala 0,38 mm/km in 0,40 mm/km na osnovi odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank. Iz preglednice 10 lahko razberemo, da se a posteriori ocena natančnosti meritev po izravnavah giblje med 0,30 in 0,42 mm/km. Vrednosti so podobne (v večini izravnav boljše), kar kaže na dobro opravljene meritve. Povprečni standardni odklon izračunanih višin reperjev v vseh 10 izravnavah skupaj znaša 0,09 mm, kar pomeni, da so izravnane višine reperjev določene z zelo visoko natančnostjo. Najboljše rezultate izravnanih višin smo dosegli v izravnavi I, v kateri standardni odklon povprečno znaša 0,08 mm, najslabše pa v izravnavi II s povprečnim standardnim odklonom 0,13 mm. Rezultati izravnav so v prilogi A.

## 9 PRIMERJAVA REZULTATOV IZRAVNAV

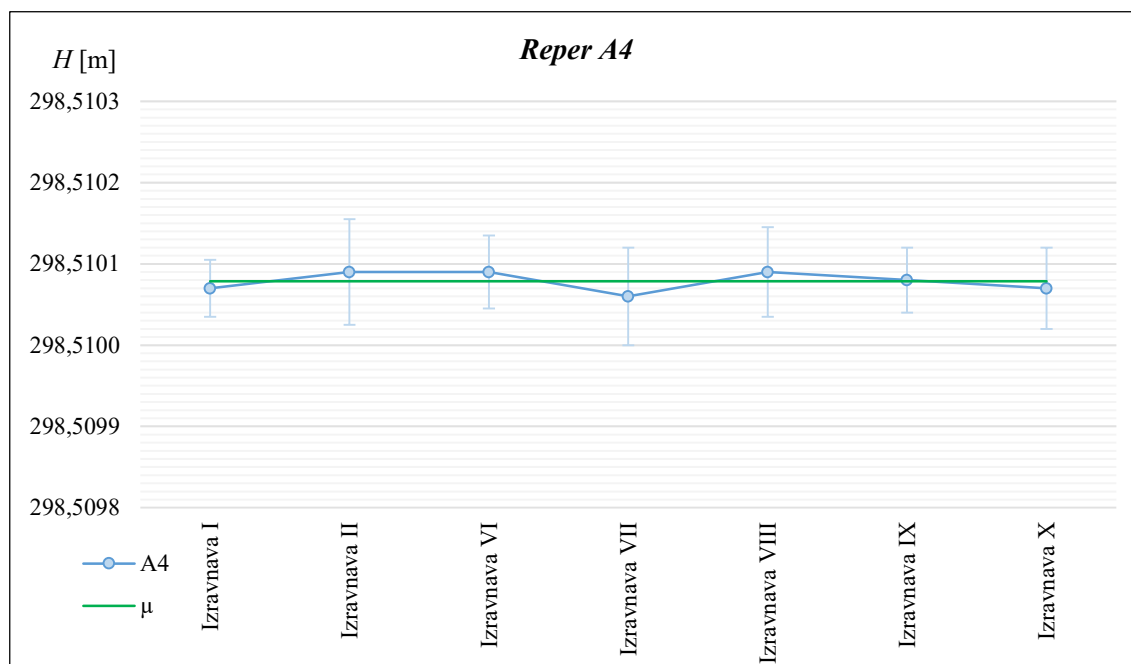
Za izbiro optimalne oblike nivelmanske mreže Šumi, je potrebno izravnane višine reperjev iz vseh 10 izravnav primerjati med seboj. Primerjavo smo izvedli tako, da smo višine reperjev povprečili ter nato srednjo vrednost odšteli od vsakega reperja v vsaki izravnavi posebej. Višine reperjev od izračunane srednje vrednosti odstopajo od  $-0,12$  mm do  $+0,13$  mm. Posebno pozornost smo namenili reperjem A2, A3 in A4, saj bodo poleg referenčnega reperja A1 v nadaljnjih izmerah predstavljali višinski datum lokalne nivelmanske mreže Šumi. V grafikonih 2, 3 in 4 je za vsak reper posebej predstavljena izravnana višina reperja s pripadajočo oceno natančnosti v posamezni izravnavi ter srednja vrednost  $\mu$  višin vseh izravnav v katere je bil vključen reper.



Grafikon 1: Predstavitev višin reperja A2 po izravnavah



Grafikon 2: Predstavitev višin reperja A3 po izravnavah



Grafikon 3: Predstavitev višin reperja A4 po izravninah

Iz grafikonov je razvidno, da se izravnane višine reperjev po posameznih izravninah za malo razlikujejo med seboj. Najbližje srednji vrednosti so višine reperja A4. Razlog za to sta majhna višinska razlika in oddaljenost od izhodiščnega reperja A1. Pri reperjih A2 in A3 pa se srednji vrednosti najbolj približata višini v izravnavi I ter izravnavi IX, medtem ko višine izračunane v ostalih izravninah odstopajo od srednje vrednosti. Za reper A2 lahko odstopanja v izravninah pripišemo večji višinski razliki glede na izhodiščni reper A1. Reper A3, kjer so odstopanja od srednje vrednosti največja, je hkrati tudi najbolj oddaljen od izhodiščnega reperja A1. Na podlagi izrisanih grafikonov lahko ocenimo, da je najbolj optimalna oblika nivelmanske mreže dosežena z izravnavo I, v kateri so za vhodni podatek izravnave uporabljene vse merjene višinske razlike med reperji v nivelmanski mreži Šumi.

## 10 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je bila predstavljena metoda izmere in vzpostavitev geodetske višinske mreže za spremljanje pomikov reperjev med izgradnjo objekta Šumi. Investitor gradnje je Šumijev Kvart, nepremičninska in holdinška dejavnost, d.o.o. Ker gre za gradnjo večjega objekta v središču mesta s tremi kletnimi etažami, je potrebno zagotoviti kakovostno ničelno izmero nivelmanske mreže, ki bo zagotavljala nadaljnjo spremljavo pomikov reperjev (okoljskih objektov) v času gradnje.

Meritve smo opravili po metodi za precizno izmero nivelmanskih mrež. Nivelirali smo v obe smeri, pozorni smo bili na dolžino vizure, razliko dolžin med latama, višino čitanja razdelbe nivelmanske late in postavljanje žabe na stabilna tla. Med merjenjem smo vodili terenski zapisnik, na katerega smo beležili številke začetnih in končnih reperjev, serijske številke lat na reperjih ter temperaturo med niveliranjem posameznih nivelmanskih vlakov.

Po izmeri smo podatke prenesli iz nivelirja in jih pripravili za izravnavo. Iz dobljenih podatkov smo izračunali višinske razlike med reperji ter primerjali odstopanja pri izmeri nivelmanskih vlakov in zapiranju nivelmanskih zank pred in po upoštevanju popravkov nivelmanskih lat. Vsa odstopanja tako pred kot tudi po upoštevanju popravkov so znotraj dopustnega odstopanja. Sledila je a priori ocena natančnosti meritev pred izravnavo, ki smo jo po izravnavi primerjali z a posteriori oceno natančnosti.

Vzpostavitev optimalne oblike geodetske mreže smo testirali tako, da smo izvedli deset ločenih izravnav merjenih višinskih razlik po posredni metodi najmanjših kvadratov z uporabo programa VimWin. Merilo za natančnost izračunanih višin reperjev posamezne izravnave predstavljajo standardni odkloni. Povprečni standardni odklon višin reperjev v vseh izravnavaх je znašal 0,09 mm. Visoko natančnost pripisujemo tudi konstantni temperaturi v času meritev, uporabi precizne merske opreme in primerni metodi izmere.

Na koncu smo izmed desetih izvedenih izravnav s pomočjo medsebojne primerjave izbrali najbolj primerno. Za reperje A2, A3 in A4, ki bodo v nadaljnjih izmerah predstavljali višinski datum nivelmanske mreže Šumi, smo izdelali tudi grafikone. Iz grafikonov se kljub majhnim odstopanjem velikosti  $\pm 0,13$  mm dobro vidi vpliv višinske razlike in oddaljenosti od izhodiščnega reperja A1 uporabljenega v izmeri, na določitev višin ostalim reperjem. Za najbolj optimalno določitev višin reperjev v nivelmanski mreži Šumi smo izbrali izravnavo I, v kateri so bile uporabljene vse merjene višinske razlike med reperji. Natančnost izračuna višin reperjev v tej izravnavi je bila v povprečju 0,08 mm.

## VIRI

Ambrožič, T., Kogoj, D., Štebe, G., Kregar, K., Marjetič, A., Savšek, S., Burja, J., Čuk, T. 2018. Poročilo o ničelni izmeri nivelmanske mreže Šumi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za geodezijo: 11 str., 3 pril.

Ambrožič, T. 2015. Zapiski iz predavanj pri predmetu Geodetski instrumenti in metode.

Ambrožič, T., Turk, G. 2004. Navodila za uporabo programa ViM, ver. 4.1.

Breznikar, A., Koler, B. 2015 Inženirska geodezija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 89 str.

GURS. 2015 Navodilo za izmero preciznega nivelmana: 8 str.

[https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/Vertikalna\\_sestavina/SVS\\_2000/Navodila/Navodilo\\_z\\_a\\_izmero\\_preciznega\\_nivelmana.doc](https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/Vertikalna_sestavina/SVS_2000/Navodila/Navodilo_z_a_izmero_preciznega_nivelmana.doc) (Pridobljeno 5. 10. 2019.)

Kogoj, D., Stopar, B. 2009. Geodetska izmera. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 37 str.

Koler, B., Savšek, S., Ambrožič, T., Sterle, O., Stopar, B., Kogoj, D. 2010. Realizacija geodezije v geotehniki. Geod. vestnik, letn. 54, št. 3: str. 450–468.

[http://www.geodetski-vestnik.com/54/3/gv54-3\\_450-468.pdf](http://www.geodetski-vestnik.com/54/3/gv54-3_450-468.pdf) (Pridobljeno 5. 10. 2019.)

Leica Geosystems. 2006. Leica DNA03/DNA10 User Manual. Heerbrugg, Leica Geosystems: 158 str.

<https://surveyequipment.com/assets/index/download/id/59/>  
(Pridobljeno 19. 10. 2019.)

Leica Geosystems. 2002. GSI online for Leica TPS and DNA: 54 str.

<http://www.usatfne.org/officials/electronic/manuals/leica/leica-dna-tps-online-guide.pdf>  
(Pridobljeno 19. 10. 2019.)

Marjetič, A. 2015 Geodetski instrumenti in metode. – študijsko gradivo za vaje.

Savšek, S., Ambrožič, T., Kogoj, D., Koler, B., Sterle, O., Stopar, B. 2010. Geodezija v geotehniki. Geod. vestnik, letn. 54, št. 1: str. 31–45. [http://www.geodetski-vestnik.com/54/1/gv54-1\\_031-045.pdf](http://www.geodetski-vestnik.com/54/1/gv54-1_031-045.pdf)  
(Pridobljeno 5. 10. 2019.)

Sluga, C. 1991. Geodezija 3. Zavod republike Slovenije za šolstvo in šport: 240 str.

Urbančič, T. 2010. Določitev vertikalnih premikov v višinski geodetski mreži na območju Ljubljanske kotline. Diplomna naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba T. Urbančič): 75 str.

*»Ta stran je namenoma prazna.«*

## **SEZNAM PRILOG**

### **PRILOGA A: Rezultati izravnav**

A.1: Izravnavna I

A.2: Izravnavna II

A.3: Izravnavna III

A.4: Izravnavna IV

A.5: Izravnavna V

A.6: Izravnavna VI

A.7: Izravnavna VII

A.8: Izravnavna VIII

A.9: Izravnavna IX

A.10: Izravnavna X

### **PRILOGA B: Poročila o kalibraciji nivelmanskih lat**

*»Ta stran je namenoma prazna.«*