

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Grahor, V., 2014. Primerjava prostornin na osnovi podatkov zajema z letalniki. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Koler, B., somentor Urbančič, T.): 64 str.

Datum arhiviranja: 01-07-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Grahor, V., 2014. Primerjava prostornin na osnovi podatkov zajema z letalniki. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Koler, B., co-supervisor Urbančič, T): 64 pp.

Archiving Date: 01-07-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GEODEZIJA  
SMER GEODEZIJA

Kandidat:

**VID GRAHOR**

**PRIMERJAVA PROSTORNIN NA OSNOVI PODATKOV  
ZAJEMA Z LETALNIKI**

Diplomska naloga št.: 958/G

**VOLUMES COMPARISON BASED ON UAV POINT  
CLOUD**

Graduation thesis No.: 958/G

**Mentor:**

doc. dr. Božo Koler

**Predsednik komisije:**

prof. dr. Bojan Stopar

**Somentor:**

asist. Tilen Urbančič

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

Ljubljana, 24. 06. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## **IZJAVE**

Podpisan **Vid Grahor** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**Primerjava prostornin na osnovi podatkov zajema z letalniki**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 5. 6. 2014

Vid Grahor

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## **BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	528.01:629.73(043.2)
<b>Avtor:</b>	Vid Grahor
<b>Mentor:</b>	doc. dr. Božo Koler
<b>Somentor:</b>	Asis. Tilen Urbančič univ. dipl. inž. geod.
<b>Naslov:</b>	Primerjava prostornin na osnovi podatkov zajema z letalniki
<b>Tip dokumenta:</b>	Diplomska naloga - univerzitetni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	64 str., 7 graf., 44 sl., 1 pril.
<b>Ključne besede:</b>	Izračun prostornin, letalniki, oblak točk, interpolacija, gridne celice, TIN, Metoda naravnih sosedov, Metoda inverzne razdalje, Multikvadratična funkcija, Navadni zleпки, Bayesov kriging

### **Izvleček:**

V diplomski nalogi je opravljena analiza prostornin deponiranega materiala, na osnovi oblakov točk zajema z brezpilotnima ploviloma, kvadrokopterjem in letalnikom. Pred obdelavo oblakov točk je bila izvedena s programom MeshLab. Za izračun prostornin smo uporabili različne metode interpolacij (Metoda naravnih sosedov, Metoda inverzne razdalje, Multikvadratična funkcija, Navadni zleпки, Bayesov kriging, TIN), ter različne dimenzije gridnih celic (0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m). Interpolacije so bile izvedene v programu ArcGis - ArcMap 10.2. Zaradi zaraščenosti deponije, ki v oblaku točk predstavlja šum, so bile interpoliranim gridnim ploskvam dodane klasično posnete detajlne točke. Prostornine so bile izračunane s programom AutoCAD Civil 3D 2013. Referenčno vrednost za oceno kakovosti določitve prostornin z različnimi metodami interpolacij, ter za različne velikosti gridnih celic, predstavlja prostornina določena z metodo TIN. Na osnovi analize višin oblakov točk je bilo ugotovljeno, da sta oblaka točk določena v različnih vertikalnih datumih. Ker so prostornine določene za vsak oblak točk posebej, to ne vpliva na izračun prostornin. Analiza rezultatov na obravnavani deponiji je pokazala, da obstajajo razlike v določitvi prostornin z različnimi interpolacijskimi metodami. Izbrana velikost gridne celice do 1 m bistveno ne vpliva na izračun prostornin. Razlike v izračunu prostornin med različnima oblakoma točk so manjše od 5%. Oblaka točk sta torej primerljive kakovosti.

**»Ta stran je namenoma prazna.«**



## **BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 528.01:629.73(043.2)  
**Author:** Vid Grahor  
**Supervisor:** Assist. Prof. Božo Koler, Ph. D.  
**Co-advisor:** Assist. Tilen Urbančič, B. Sc.  
**Title:** Volumes comparison based on UAV point cloud  
**Document type:** Graduation thesis - university studies  
**Notes:** 64 p., 7 graph., 44 fig., 1 ann.  
**Key Words:** Volumes computation, UAV, point cloud, interpolation, grid cells, TIN, Inverse Distance Weighted, Natural Neighbor, Multiquadric Function, Regularized Spline, Empirical Bayesian Kriging

### **Abstract:**

In the graduation thesis the analysis of volumes of deposited material, based on point clouds from unmanned aerial vehicles is accomplished. Point clouds were preprocessed in MeshLab. We used various interpolation methods (Inverse Distance Weighted, Natural Neighbor, Multiquadric Function, Regularized Spline, Empirical Bayesian Kriging) to produce grid surfaces with different grid cell dimensions (0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m). Interpolations were proceeded in ArcGis - ArcMap 10.2. Because the deposited material was overgrown with vegetation, additional points measured with polar method were added in point cloud. Volumes of deposited material were computed in AutoCAD Civil 3D 2013. Reference value, for quality control of volume computation with different interpolation methods and different grid cell dimensions, is based on TIN method. From the analysis, based on point cloud heights we founded, that the point clouds are determined in a different vertical datum. Volumes are determined for each point cloud separately, so the different vertical datum does not affect on volume computation. The analysis of the results, for discussed material depot showed, the differences, of volumes computation, between each interpolation methods, are present. Chosen grid cell size by 1 m, does not affect significantly on volume computation. Deviations of volume computations between each point cloud are smaller than 5%. Therefore the point clouds are comparable in quality.

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Božu Kolerju ter somentorju asist. Tilnu Urbančiču univ. dipl. inž. geod. za pomoč, usmeritve, strokovne nasvete in vložen čas pri izdelavi diplomskega dela.

Hvala podjetjema MODRI PLANET d.o.o. in LGB d.o.o. za posredovanje in uporabo podatkov.

Še posebej se zahvaljujem staršem in vsem bližnjim, ki so mi omogočili študij. Katarina, hvala za vso podporo, spodbudo in razumevanje.

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## KAZALO VSEBINE

Izjave	III
Bibliografsko - dokumentacijska stran z izvlečkom	V
Bibliographic - documentalistic information and abstract	VII
Zahvala	IX
<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGIJA</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Opredelitev in opis testnega območja</b>	<b>3</b>
<b>3. TEORETIČNE OSNOVE ZA IZVEDBO NALOGE</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Letalniki</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Osnovni princip večslikovne metode</b>	<b>5</b>
<b>3.3 Metode interpolacije</b>	<b>7</b>
<b>3.3.1 Osnovni opis, princip in uporaba interpolacij</b>	<b>7</b>
<b>3.3.2 Opis uporabljenih interpolacijskih metod</b>	<b>9</b>
<b>3.3.2.1 Metoda naravnih sosedov</b>	<b>9</b>
<b>3.3.2.2 Metoda inverzne razdalje</b>	<b>10</b>
<b>3.3.2.3 Radialne bazne funkcije</b>	<b>12</b>
<b>3.3.2.4 Metoda trend</b>	<b>13</b>
<b>3.3.2.5 Kriging</b>	<b>14</b>
<b>3.4 Opis metode triangulacije TIN</b>	<b>15</b>
<b>3.5 Izračun prostornin</b>	<b>17</b>
<b>3.5.1 Opis in osnovni princip metode primerjanja dveh ploskev</b>	<b>18</b>
<b>3.5.1.1 Izračun prostornin na podlagi gridnih celic</b>	<b>19</b>
<b>3.5.1.2 Izračun prostornin na podlagi neenakih trikotnikov TIN</b>	<b>20</b>
<b>4. IZVEDBA MERITEV IN ANALIZA REZULTATOV</b>	<b>23</b>
<b>4.1 Izvedba meritev</b>	<b>23</b>

---

<b>4.1.1</b>	<b>Izmera podjetja MODRI PLANET</b>	<b>23</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Izmera podjetja LGB</b>	<b>25</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Izmera študentov</b>	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Pred obdelava podatkov za izračun prostornin</b>	<b>28</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Pred obdelava oblakov točk v programu MeshLab</b>	<b>28</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Pred obdelava oblakov točk v programu AutoCAD Map 3D 2013</b>	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>Kreiranje ploskev v programu ArcGis - ArcMap 10.2</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Kreiranje ploskev v programu AutoCAD Civil 3D 2013</b>	<b>47</b>
<b>4.5</b>	<b>Izračun prostornin v AutoCAD Civil 3D 2013</b>	<b>48</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Analiza in vrednotenje rezultatov</b>	<b>48</b>
<b>4.5.1.1.</b>	<b>Analiza prostornin deponije za podatke MODRI PLANET</b>	<b>49</b>
<b>4.5.1.2.</b>	<b>Analiza prostornin deponije za podatke LGB</b>	<b>51</b>
<b>4.5.1.3.</b>	<b>Oblaku točk dodamo klasično izmerjene detajlne točke terena</b>	<b>54</b>
<b>5.</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>59</b>
<b>VIRI</b>		<b>62</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Shema poteka raziskovalne naloge	2
Slika 2: Geografska lega testnega območja	3
Slika 3: Prikaz testnega območja	4
Slika 4: Stereomodel je rezultat projekcije slikovnih točk iz stereopara	6
Slika 5: Thiessenovi poligoni in Delaunayeva triangulacija	9
Slika 6: Mreža Thiessenovih poligonov pred (levo) in po (desno) vključitvi nove točke X	10
Slika 7: Princip izbire sosednjih točk in določitev uteži	11
Slika 8: Prikaz stopnje vpliva glede na oddaljenost od točke	11
Slika 9: Prikaz prileganja ploskve z baznimi funkcijami za različne vrednosti	12
Slika 10: Prikaz ukrivljenega površja z Metodo trend	13
Slika 11: Prostorski trikotnik	15
Slika 12: Thiessenovi poligoni in Delaunayjevi trikotniki	16
Slika 13: Ponazoritev Delaunayjevega pravila	16
Slika 14: Princip izračuna prostornin s pomočjo plastnic	18
Slika 15: Osnovni princip izračuna delne prostornine s prostorninskim segmentom	19
Slika 16: Prikaz različnih prostorninskih segmentov in računskih količin	19
Slika 17: Prikaz tristrane prizme	21
Slika 18: Princip kreiranja novih TIN linij	22
Slika 19: Brezpilotni kvadrokopter podjetja MODRI PLANET	23
Slika 20: Brezpilotno letalo podjetja LGB	25
Slika 21: Prikaz poti letenja brezpilotnega letala	26
Slika 22: Shematski prikaz pred obdelave podatkov	28
Slika 23: Oblak točk pred obrezovanjem	29
Slika 24: Oblak točk po obrezovanju	30
Slika 25: Gradbeni stroj kot primer šuma	30
Slika 26: Prikaz dela v AutoCAD Map 3D 2013	32
Slika 27: Prikaz obrezanega oblaka točk območja deponije (levo) in območja okolice (desno)	32
Slika 28: Prikaz točkovnega sloja v ArcMap 10.2	34
Slika 29: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov LGB (desno), (interpolacija z Metodo inverzne razdalje)	35
Slika 30: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov MP (desno), (interpolacija z Metodo inverzne razdalje)	36

---

Slika 31: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov LGB (desno), (interpolacija z Metodo naravnih sosedov)	37
Slika 32: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov MP (desno), (interpolacija z Metodo naravnih sosedov)	38
Slika 33: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov LGB (desno), (interpolacija z Metodo trend)	39
Slika 34: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev(desno) iz podatkov MP, (interpolacija Navadni zleпки)	41
Slika 35: Ploskev deponije(desno) in osnovna ploskev(levo) iz podatkov LGB, (interpolacija z Multikvadratično funkcijo)	42
Slika 36: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev (desno) iz podatkov MP, (interpolacija Empirični Bayesov kriging)	43
Slika 37: Osnovna ploskev z vrisanim prečnim prerezom	45
Slika 38: Prečni prerez s prikazom poteka osnovnih ploskev MP ali LGB za vse metode interpolacij in velikost gridne celice 0,5 m	45
Slika 39: Prikaz TIN ploskve v AutoCAD Civil 3D 2013	47
Slika 40: Ploskve deponije za podatke LGB z vrisanim prečnim prerezom	53
Slika 41: Prečni prerez ploskev interpoliranih z Metodo inverzne razdalje	53
Slika 42: Ploskve deponije z vrisanim prečnim prerezom	56
Slika 43: Prečni prerez ploskev deponije za oba niza podatkov za velikosti gridne celice 0,4 m	56
Slika 44: Prečni prerez ploskev deponije Metoda naravnih sosedov za oba niza podatkov	57



## **KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Minimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP	44
Grafikon 2: Maksimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP	44
Grafikon 3: Prostornina nasipa glede na metodo interpolacije za podatke MP	49
Grafikon 4: Prostornina nasipa glede na metodo interpolacije za podatke LGB	51
Grafikon 5: Prostornina nasipa v odvisnosti od velikosti gridnih celic	52
Grafikon 6: Prostornine nasipa glede na izbrano metodo interpolacije - pred izboljšanjem podatkov MP in po izboljšanju	54
Grafikon 7: Prostornine nasipa - pred izboljšanjem podatkov LGB in po izboljšanju	55

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## 1. UVOD

Letalniki predstavljajo povsem novo tehnologijo, ki se je razmahnila v zadnjih desetih letih. Sprva so jih uporabljali samo v vojaške namene. Ker je bila uporaba človeško vodenih plovil prenevarna, ali pa enostavno predraga so uporabili letalnike. Sčasoma se je tehnologija letalnikov razširila tudi na druga področja, saj je zaradi svoje enostavne uporabe in nizke cene postala zanimiva za civilno uporabo. Ker ima letalnik vgrajene številne senzorje, kot so: Globalni navigacijski satelitski sistem - GNSS sprejemniki, kompas, višinomer, inercialna merska enota - INS, žiroskop in barimetrično tipalo pritiska, je upravljanje zelo enostavno, večino dela pa opravi plovilo kar samo. Tako so postala brezpilotna plovila sestavni del televizijskih prenosov, uporabljajo jih pri gašenju, nadzoru naftovodov, analizi naravnih katastrof, snemanju filmov in še mnogo drugih. Prednosti letalnikov smo spoznali tudi v geodetski stroki, saj so se v zadnjih letih začela pojavljati plovila, ki z vgrajeno visokoločljivostno nemersko kamero oz. digitalnim fotoaparatom predstavljajo nov način za fotogrametrični zajem podatkov (Bitenc, 2014).

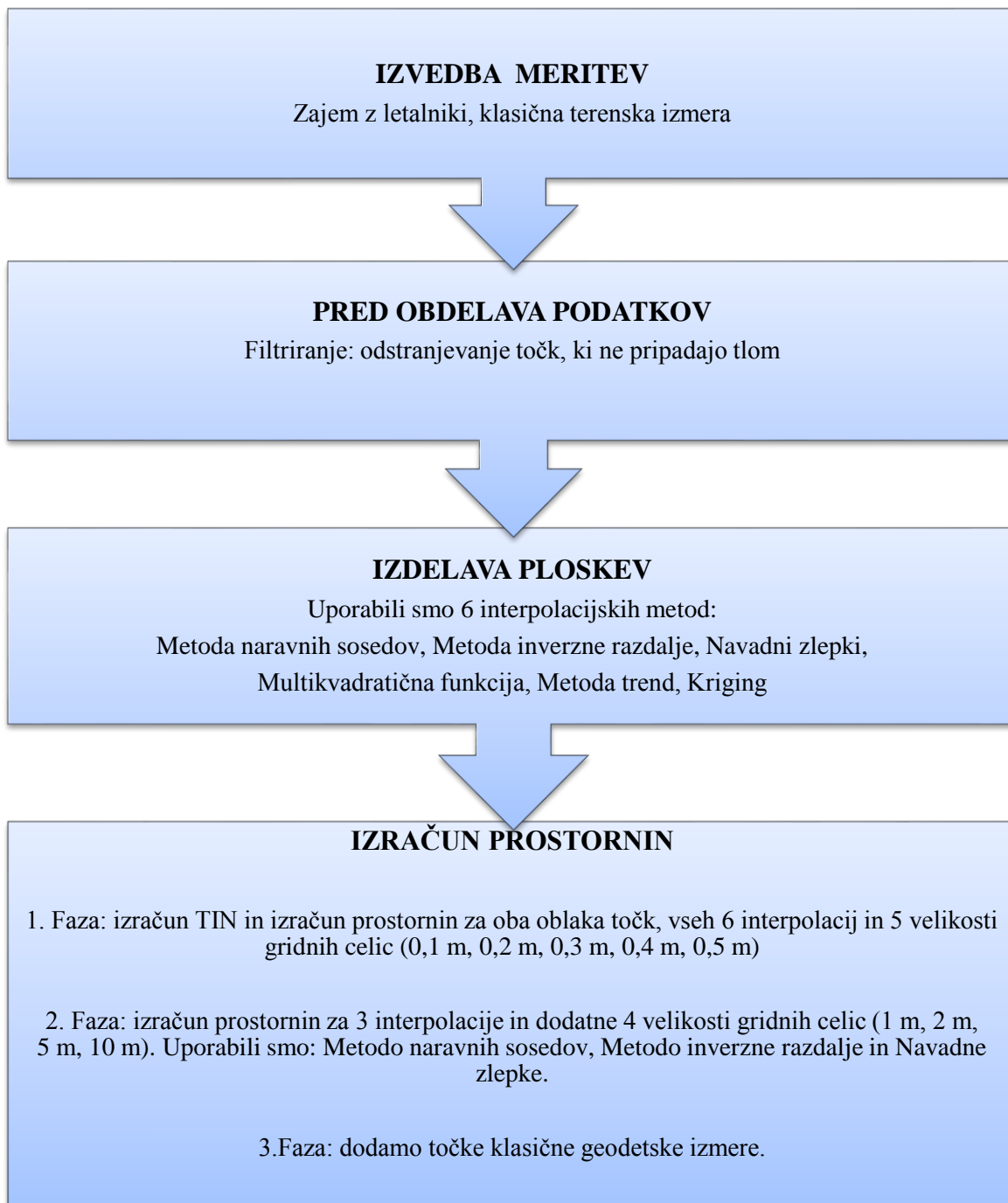
Fotogrametrični podatki mnogim področjem geodezije predstavljajo izhodišče, za končno rešitev problema, ali pa služijo kot vhodni podatki za nadaljnje delo. Eno takih področij je Inženirska geodezija, kjer se s pomočjo fotogrametričnih podatkov rešujejo inženirski problemi. Naše področje raziskave so podatki meritev z letalniki. Uporabili smo jih za izračun in primerjavo prostornin deponiranega materiala. Prostornine predstavljajo pomemben podatek za gradbena in zemeljska dela, saj izkop ali odvoz materiala predstavlja velik strošek pri gradnji, sam material pa je lahko surovina za nadaljnjo predelavo.

V diplomski nalogi bomo analizirali kakovost izračuna prostornin iz oblakov točk, izmerjenih z različnima brezpilotnima ploviloma. Prostornino deponiranega materiala smo izračunali na osnovi različnih načinov kreiranja ploskev terena.

Osnovna cilja sta, da na podlagi praktičnega primera ocenimo oz. opredelimo prednosti in slabosti snemanja terena z letalniki v primerjavi s klasično izmero, za potrebe izračuna prostornin. Drugi cilj je, da analiziramo rezultate, določimo najboljšo metodo ter velikost gridne celice za izračun prostornin.

## 2. METODOLOGIJA

Delo je potekalo v številnih zaporednih korakih, ki smo jih smiselno razdelili v shematskem prikazu. Na Slika 1, so prikazane posamezne faze raziskave.

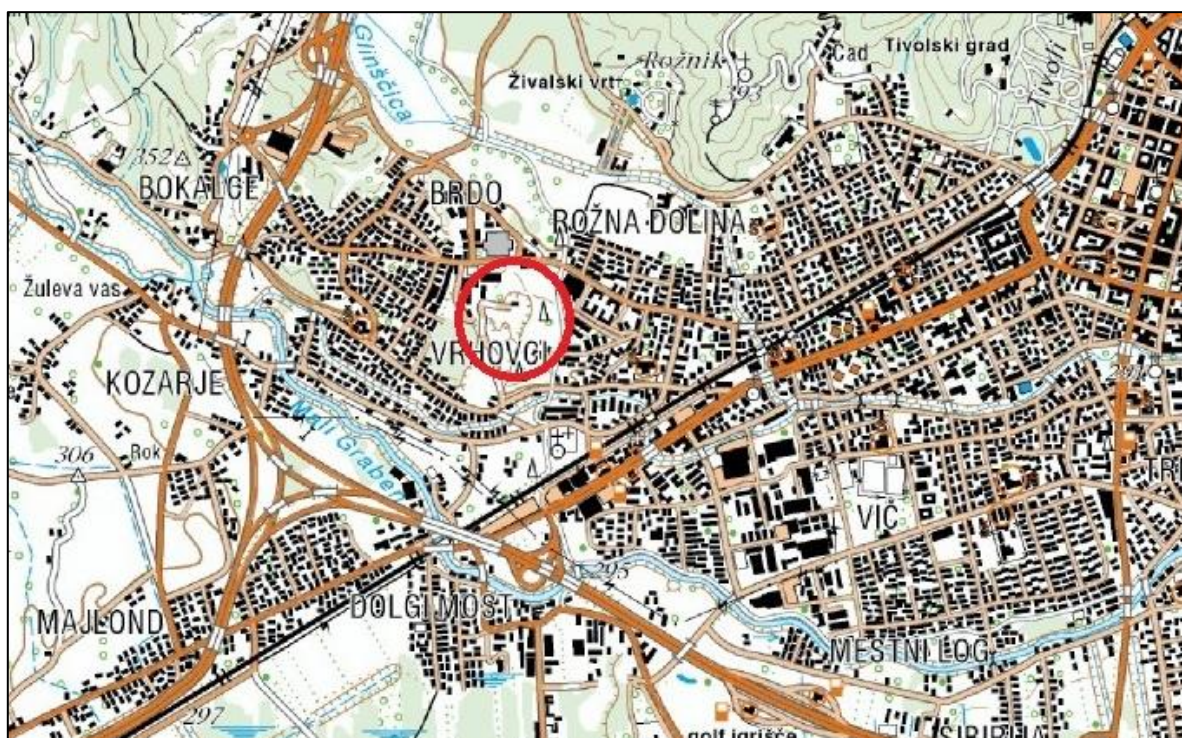


Slika 1: Shema poteka raziskovalne naloge

## 2.1 Opredelitev in opis testnega območja

Naše testno območje predstavlja deponija nasutega gradbenega materiala v stanovanjski četrti Brdo, ki je na jugozahodnem delu Ljubljane (Slika 2). Natančneje je to gradbišče večstanovanjskega naselja Zeleni Gaj, v neposredni bližini Tehnološkega parka, investitor je Stanovanjski sklad Republike Slovenije.

Zaradi svoje oblike in površine je deponija primerna za brezpilotni zajem podatkov, hkrati pa je možno v primernem času opraviti tudi klasično izmero, saj je geodetska mreža za potrebe gradnje stabilizirana v okolici deponije. Našteti razlogi so bili zadosten argument, da smo deponijo izbrali za naše testno območje.



Slika 2: Geografska lega testnega območja (Geopedia)

Na severni in vzhodni strani je zemljino preraslo grmičevje in tudi večje drevje, kar za zajem predstavlja dodatno težavo. Na delih s srednje visokim in visokim rastjem, pri snemanju iz zraka, težko dobimo točke tal, saj večina predstavlja točke krošenj in grmičevja. Območje naše raziskave je obkroženo z rdečo linijo (Slika 3).



**Slika 3: Prikaz testnega območja (MODRI PLANET, 2013)**

### **3. TEORETIČNE OSNOVE ZA IZVEDBO NALOGE**

#### **3.1 Letalniki**

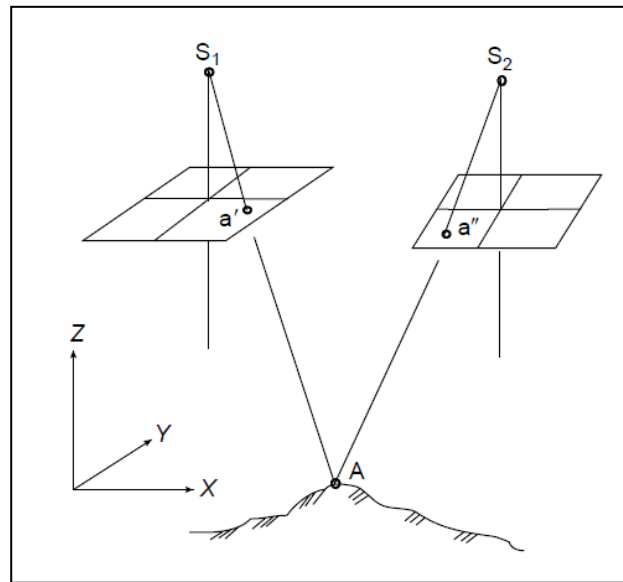
Letalniki so tista brezpilotna plovila (roboti), ki lahko samostojno letijo po vnaprej določenih točkah načrta za letenje in zajemajo različne vrste podatkov. Letalniki danes delujejo kot sistem, ki je sestavljen iz zračnega plovila, senzorjev visoke ločljivosti za snemanje podatkov, avtopilota in zemeljske postaje za prejetje in obdelavo informacij.

Letalnike ločimo na dva osnovna tipa: letalo in kopter (ima lahko več rotorjev). Letalo praviloma dosega večje hitrosti, zato lahko posledično preleti večja območja, kopter ima prednost na območjih z omejenimi zmoglostmi vzleta in pristanka. Za opazovanje površja se v osnovi uporablja videokamera in infrardeča kamera, lahko pa je nameščenih še veliko različnih senzorjev, kot so: termokamera, laserski skener, hiperspektralna kamera in drugi. Osnovna enota za navigacijo predstavlja GNSS, s pomožnimi napravami, kot so: žiroskop, inercialni merski sistem - INS, kompas, barimetrično tipalo in pospeškomer.

V geodeziji letalniki predstavljajo novo področje v fotogrametriji. Prednost letalnikov je, da so cenejši in hitreje pripravljene za zajem, kot uveljavljene tehnike zračnega zajema. Končni rezultati so na voljo zelo hitro po opazovanju in so visoke kakovosti. Slabost letalnikov pa predstavljata omejena nosilnost in čas letenja (Bitenc, 2014).

#### **3.2 Osnovni princip večslikovne metode**

Osnovni princip pridobitve prostorskih podatkov temelji na uporabi stereoparov aeroposnetkov. Osnovo predstavlja vzpostavitev stereomodela, nato sledi merjenje 3D- koordinat točk na stereomodelu. Stereopar je definiran z dvema posnetkoma istega območja, ki jih posnamemo iz dveh različnih položajev, tako da dosežemo določen odstotek prekrivanja vsebine. Rekonstrukcija posnetkov je možna le na območju, kjer imamo prekrivanje med posnetkoma. Po priporočilih prekrivanje posnetkov navadno znaša 60% v smeri leta in 30% med sosednjimi snemalnimi pasovi (Li, Zhu, Gold, 2005).



**Slika 4: Stereomodel je rezultat projekcije slikovnih točk iz stereopara (Li, Zhu, Gold, 2005, str. 38)**

Vsak posnetek je definiran s šestimi orientacijskimi parametri - tremi zasuki in tremi premiki. Parametre lahko določimo z uporabo GNSS in INS naprav v samem plovilu ali pa z merjenjem oslonilnih točk na terenu in posnetku (Ridić, 2012).

V digitalni fotogrametriji so posnetki v digitalni obliki, tako so koordinate točk podane s položajem slikovne točke v slikovni matriki. Če imamo točko podano na levem posnetku, lahko s slikovnim ujemanjem avtomatsko poiščemo odgovarjajočo homologno točko tudi na desnem posnetku (Ridić, 2012).

Z razvojem tehnologije so se razvile različne metode večslikovnega ujemanja. Vse se ukvarjajo s statističnim ugotavljanjem korelacije med dvema ali več območji ali pojavi na posnetku za prepoznavanje homolognih slikovnih točk na drugem posnetku. Kakovost in količina točk sta odvisni od prekritja terena ter od karakteristike podobe, kot sta šum in kontrast. Slikovno ujemanje torej predstavlja postopek, ki izbrani točki s pomočjo matematičnih in statističnih metod poišče najbolj verjetno homologno točko na drugi podobi (Hartman, 2008).

Ločimo tri vrste slikovnega ujemanja:

- ujemanje površin (angl. area - based matching),
- strukturno ujemanje (angl. structural matching),
- ujemanje geometrijskih elementov (angl. feature - based matching).



### 3.3 Metode interpolacije

Z brezpilotnim snemanjem testnega območja in računalniško obdelavo smo dobili oblake točk. Nekateri deli testnega polja ne vsebujejo točk, saj smo jih izrezali zaradi prisotnosti šuma, ali pa zaradi naklona terena niso zajete. Naš cilj je pridobiti zvezno ploskev, zato moramo določiti vrednosti praznim območjem. To storimo z interpolacijo.

#### 3.3.1 Osnovni opis, princip in uporaba interpolacij

Prostorska interpolacija je potek določitve vmesnih vrednosti med podanimi opazovanji (Šumrada, 2005). Pri kreiranju ploskev jo uporabljamo zato, da določimo vrednost višine neke točke tako, da uporabimo znane višine sosednjih točk (Li, Zhou, Gold, 2005). Osnovi cilj prostorske interpolacije je tako sestava zvezne ploskve na podlagi diskretnih točkovnih podatkov (Šumrada, 2005).

Pri postopku interpolacije se upoštevajo tudi predpostavke različnih metod interpolacije. Pogosto se upošteva, da je podobnost med bližnjimi točkami večja kot med bolj oddaljenimi (Aš, 2008).

Problem lahko definiramo tudi na naslednji način:

Če imamo dano množico  $n$  raztresenih točk,  $M_i = (x_i, y_i), i = 1, \dots, n$  in skalarne vrednosti  $z_i$  za vsako od točk, da velja  $z_i = F(x_i, y_i)$  za neko funkcijo  $F(x, y)$ , potem iščemo interpolacijsko funkcijo  $\bar{F} \approx F(x_i, y_i)$  tako, da je  $\bar{F}(x_i, y_i) = z_i$  (Ramos, 2001).

Interpolacijske metode lahko razdelimo na različne načine, najpogostejše delitve so naslednje:

#### a) Lokalne in globalne metode

Pri interpolaciji neznanih vrednosti lokalne metode upoštevajo izbrano okolico neznanne točke, medtem ko globalne metode interpolacije za izračun neznanih vrednosti upoštevajo celotno obravnavano območje. Lokalne metode ponavljaje določajo matematično funkcijo v okolici vsake nove točke na podlagi bližnjih podanih točk. Zahtevajo veliko število računskih operacij, zato je rezultat bolj kompleksna in podrobna ponazoritev ploskve. Globalne metode določijo eno samo matematično funkcijo, ki se najbolje prilega vsem podanim točkam (Šumrada, 2005).

## b) Deterministične in stohastične (geostatistične) metode

Deterministične metode uporabljajo matematične funkcije za izračun neznanih vrednosti na neznanih lokacijah (Šumrada, 2005). Delimo jih na različne tipe. Prvi tip predstavljajo metode, ki interpolirajo glede na stopnjo podobnosti med sosednjimi točkami (npr. Metoda z inverzno uteženo razdaljo, Metoda z inverzno razdaljo na potenco, Metoda naravnih sosedov, Metoda radialnih baznih funkcij). Naštete metode so lokalne in upoštevajo uteženo povprečje na izbranem območju. Drugi tip predstavljajo metode, ki temeljijo na stopnji glajenja (npr. Metoda trend). Te metode so globalne in poznane kot "funkcije prilaganj" (angl. fitted functions techniques).

Stohastične metode temeljijo na domnevnih modelih, ki izhajajo iz negotovosti naključnih variacij na področju obravnave. Za določitev neznanih vrednosti uporabljajo matematične in statistične operacije. Pri interpoliranju upoštevajo statistične lastnosti podatkov, kot je korelacija (npr. Polinomska regresija, Kriging) (Aš, 2008, cit. po Smith, Holland, Longley, 2003).

## c) Točne in približne metode

Točni interpolatorji tudi po interpolaciji ohranijo merjene vrednosti, tako predstavijo podatke točno.

Približni interpolatorji ne ohranijo vrednosti merjenih točk po interpolaciji. Razlike med merjenimi in interpoliranimi vrednostmi pa se navadno uporabljajo za ocenitev modela kakovosti (Aš, 2008, cit. po Peralvo 2003).

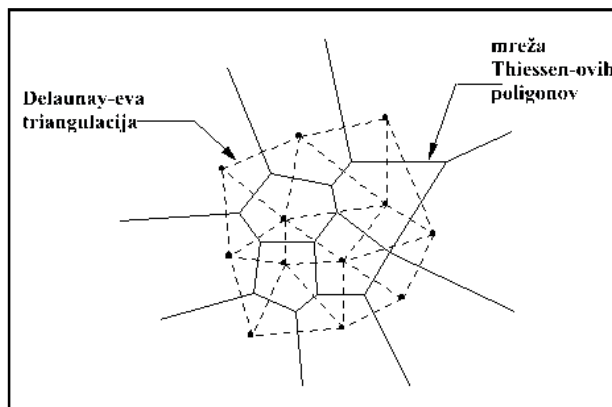
Površje lahko torej definiramo kot mrežo gridnih celic. Vsaki celici z interpolacijo priredimo vrednosti koordinat v vseh štirih ogliščih celice. Z velikostjo celice določimo podrobno detajla. Manjša kot je celica, bolj podrobno lahko predstavimo dejansko stanje površja.

### 3.3.2 Opis uporabljenih interpolacijskih metod

#### 3.3.2.1 Metoda naravnih sosedov

Metoda naravnih sosedov (angl. Natural neighbor) pri iskanju najprimernejših vrednosti uporablja Thiessenove poligone oziroma Voronoi diagrame in uteženem povprečju sosednjih vrednosti. Posebnost metode je, da uteži niso določene na osnovi razdalje, ampak območja (Aš, 2008).

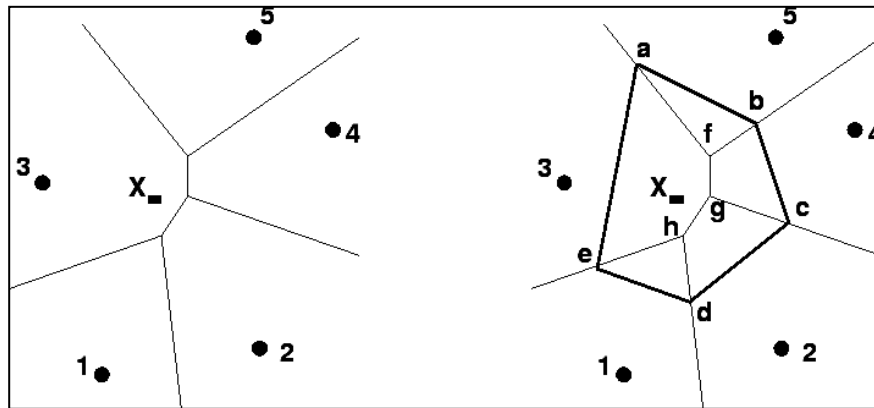
Mrežo Thiessenovih poligonov skonstruiramo na osnovi Delaunayeve triangulacije (Slika 5). Vsaki točki v mreži ustreza en Thiessenov poligon, ki je skonstruiran tako, da vozlišča poligona sovpadajo s središči očrtanih krogov trikotnikov Delaunayeve triangulacije.



Slika 5: Thiessenovi poligoni in Delaunayeva triangulacija (Aš, 2008)

Za določitev uteži naravnim sosedom interpolirane točke, se uporabljajo lokalne koordinate, uporablja se tudi termin naravne koordinate. Lokalne koordinate določajo, kolikšen vpliv bo imela vsaka od sosednjih točk na interpolirano vrednost.

Lokalne koordinate so prikazane na Slika 6. Točke 1 - 5 so dane točke, s poznanimi vrednostmi. Točko X želimo interpolirati. Ko vključimo X v mrežo, se spremeni triangulacijska mreža in s tem tudi mreža Thiessenovim poligonom. Z debelejšo črto je označen nov Thiessenov poligon okoli točke X. Tanjše črte predstavljajo predhodno stanje. V interpolacijo X vključimo samo tiste točke, katerih poligon se je spremenil. Utež  $\lambda_m(n)$  vsake od sosednjih točk, je definirana kot skupno območje, ki ga omejujeta Thiessenov poligon točke X in Thiessenov poligon vsake od sosednjih točk pred vključitvijo X. Večje kot je skupno območje, večja je utež in večji je vpliv točke na interpolirano vrednost (Aš, 2008).



Slika 6: Mreža Thiessenovih poligonov pred (levo) in po (desno) vključitvi nove točke X (Sukumar, 1997)

Utež  $\lambda_m(n)$  zasede vrednosti med 0 in 1. V primeru, ko interpolirana točka sovpada z obstoječo, je vrednost uteži 1. Vedno pa je vsota vseh uteži, ki vplivajo na interpolirano točko, enaka 1. Večja kot je relativna razdalja med točko naravnega soseda in interpolirano točko, manjši bo vpliv naravnega soseda na iskano vrednost (Owen, 1993).

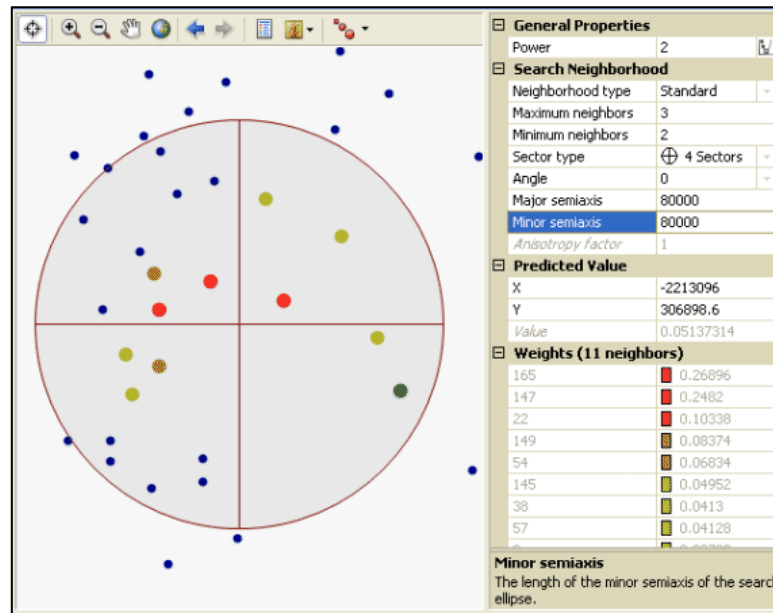
### 3.3.2.2 Metoda inverzne razdalje

Metoda inverzne razdalje (angl. Inverse distance weighted - IDW) je deterministična interpolacijska metoda. Temelji na predpostavki, da imajo pri iskanju novih vrednosti večji vpliv točke bližje lokaciji iskane vrednosti, kot pa točke na bolj oddaljeni lokaciji (Bobnar, Drobne, Šumrada, 2005).

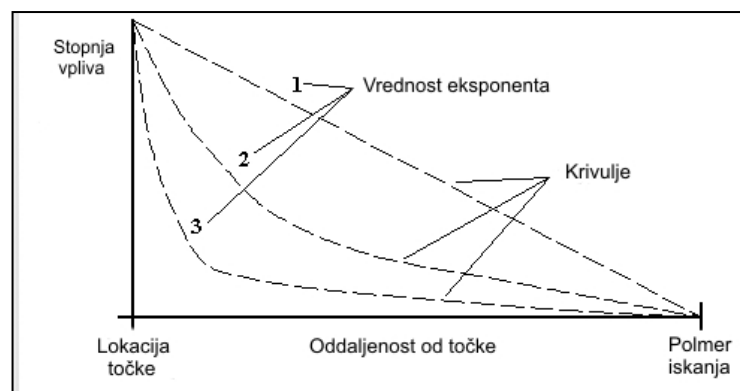
Podane točke so navadno naključno porazdeljene po celotnem obravnavanem območju, zato je izbira primerne razdalje iskanja vplivnih točk ključni problem. Razdalja iskanja določa vzorec izbranih točk za določitev vrednosti na novi lokaciji. Zaradi procesne enostavnosti se za obliko vplivnega območja po navadi privzame krog z izbranim radijem, lahko pa je to tudi kvadrat, kot območje gridnih celic. Pogoji izbire je lahko zasnovan tudi na minimalnem številu danih točk v okolici, navadno od 6 do 12 točk. Razdalja iskanja se povečuje, dokler ni izbranih predvideno število danih točk (Šumrada, 2005).

Vrednost Z koordinate, ki je povezana z vsako lokacijo podane točke, se pri izbranih točkah, ležečih v vplivnem območju, pomnoži z ustrežno utežjo. Vrednost utežnih faktorjev pada z ustrežno funkcijo razdalje med iskanim ogliščem gridne mreže in podanimi točkami. Funkcija razdalj je navadno eksponentna. To pomeni, da se izbere druga potenca in vpliv končnega niza točk pada obratno sorazmerno s kvadratom njihove razdalje ( $\frac{1}{d^2}$ ) od obravnavanega oglišča gridne mreže. Interpolirana vrednost je

določena kot utežno povprečje vseh izbranih točk (Šumrada, 2005). Na Slika 7 vidimo princip iskanja točk in določitev uteži. Določenih je 11 sosednjih točk, ki jim program priredi uteži. Izbrana je eksponentna funkcija.



Slika 7: Princip izbire sosednjih točk in določitev uteži (ArcGIS 10.2 - pomoč, 4. 2. 2014)



Slika 8: Prikaz stopnje vpliva glede na oddaljenost od točke (Aš, 2013)

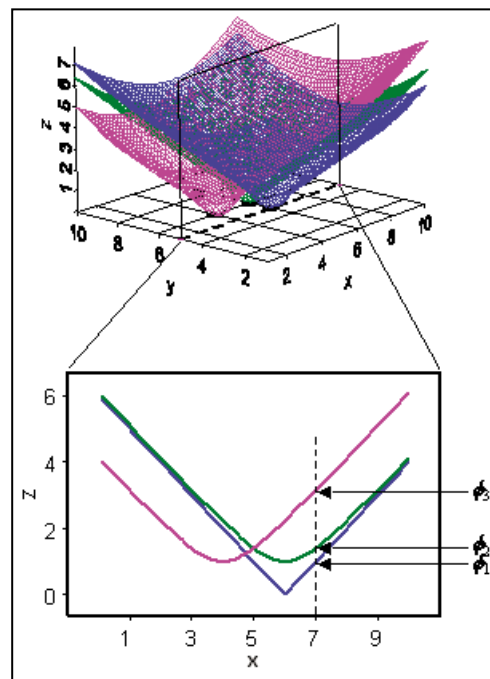
Metoda je primerna za rahlo razgibana območja, slabše pa se obnese pri interpoliranju vrhov in najnižjih točk terena, saj interpolirana točka nikoli ne zavzame višje oziroma nižje vrednosti od danih točk (Podobnikar, 2001).

### 3.3.2.3 Radialne bazne funkcije

Radialne bazne funkcije (angl. Radial basis functions) predstavljajo raznoliko skupino interpolacijskih metod. Vse metode so točni interpolatorji in težijo h glajenju ploskve. Osnovni namen interpolacije z radialnimi baznimi funkcijami je, da lahko vsako neprekinjeno ploskev aproksimiramo z vsoto nizov enostavnih ploskev, t.j. baznih funkcij. To pomeni, da interpolirano vrednost določimo kot linearno kombinacijo baznih funkcij (Aš, 2008).

Ker je vrednost bazne funkcije odvisna samo od oddaljenosti od dane točke, se imenujejo radialne. To zapišemo kot  $\phi(x) = \phi(|x|)$  oziroma v primeru, ko obstaja centralna točka  $c$ , je  $\phi(x, c) = \phi(|x - c|)$ , kjer je  $\phi$  radialna bazna funkcija (Aš, 2008). Na Slika 9 je prikazano prileganje ploskve v različnih točkah z baznimi funkcijami. Oznake  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  predstavljajo vrednost bazne funkcije za določeno vrednost v XZ ravnini.

Za razliko od metode inverznih utežnih razdalj, radialne bazne funkcije omogočajo določitev iskanih vrednosti tudi nad maksimalno oziroma pod minimalno vrednostjo podanih točk (ArcGis 10.2 - pomoč, 2014a).



Slika 9: Prikaz prileganja ploskve z baznimi funkcijami za različne vrednosti (ArcGis 10.2 - pomoč, 6. 2. 2014)

Izbira baznih funkcij je velika, vendar smo se osredotočili samo na naslednji dve:

- Navadni zlepek

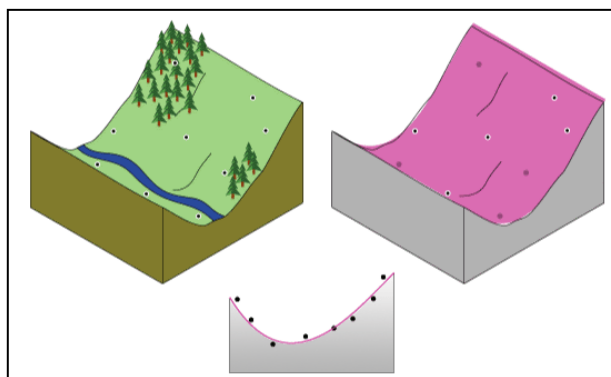
Metoda navadni zlepek (angl. Regularized spline) temelji na določitvi neznanih vrednosti s pomočjo matematične funkcije, ki zmanjša splošno ukrivljenost ploskve. Rezultat je gladka ploskev, ki se postopoma spreminja, nove vrednosti pa lahko presegajo maksimalno oziroma minimalno vrednost vzorčnih podatkov. Nova vrednost celice se določa na podlagi znanih točk v okolici. Vrednost uteži določa kako gladka bo končna ploskev. Večja kot je vrednost uteži, bolj gladka bo ploskev (ArcGis 10.2 - pomoč, 2014b).

- Multikvadratična funkcija

Multikvadratična (angl. Multiquadric) funkcija je med največkrat uporabljenimi baznimi funkcijami. Omogoča, da iz poljubno razporejenih točk dobimo eksaktno definirano zvezno ploskev. Pogosto se izkaže kot ena izmed najbolj točnih metod interpolacije in omogoča dobro prilaganje ploskve (Chenoweth, 2009).

#### 3.3.2.4 Metoda trend

Metoda trend (angl. Trend analysis) je globalna metoda, ki določi najboljše prilagajočo se površino, ki jo opredeljuje ustrezna enačba polinoma. Ta podaja iskano vrednost kot funkcijo geografske lokacije. Metoda minimalizira vsoto kvadratov odstopanj med vhodnimi vrednostmi in izračunano vrednostjo ploskve. Ker je to globalna analitična metoda, ki določi najboljše prilagajočo se površino za celoten niz podanih točk, se ploskev veliko krat ne prilega vsem podanim točkam. Ploskev je delno posplošena in ne upošteva vseh lokalnih detajlov (Šumrada, 2005).



Slika 10: Prikaz ukrivljenega površja z Metodo trend (ArcGis 10.2 - pomoč, 4. 2. 2014)

Parameter reda polinoma podaja stopnjo in vrsto polinomske enačbe, kar nadalje določa zahtevnost izračunane ploskve. Polinomska enačba drugega reda opredeljuje parabolično ploskev, ki ima samo eno obliko ukrivljenosti (konkavnost ali konveksnost). Kubična enačba že dovoljuje spremembe ukrivljenosti v katerem koli preseku. Enačbe polinomov višje stopnje omogočajo naraščajočo zapletenost in manjši poudarek lokalnim značilnostim. Ploskev je pri polinomih višjih stopenj bolj zglajena oziroma bolj posplošena (Šumrada, 2005).

### 3.3.2.5 Kriging

Od vseh interpolacijskih metod velja Kriging za pristop, ki temelji na najbolje opredeljenih teoretičnih postavkah. Osnovna ideja je v podrobni razpoznavi nekaterih značilnosti o splošnem poteku ploskve, kar se poizkuša ugotoviti iz merjenih vrednosti oziroma podatkov. Sledi uporaba tovrstnih dognanj za oceno in določanje vrednosti na manjkajočih ali neopredeljenih delih ploskve. Za metodo Kriging je najpomembnejši kriterij gladkosti ploskve, kar se skuša zagotoviti z uporabo statističnih dognanj in postopkov (Šumrada, 2005).

Obstaja veliko oblik, pristopov in potekov, ki skupaj ponazarjajo metodo kriging, tukaj se omejujemo le na Empirični Bayesov kriging, v nadaljevanju EBK (angl. Empirical Bayesian kriging). Spada med geostatistične metode. Vsebuje avtomatizacijo najtežjega dela pri izgradnji primernega modela kriginga. Druge metode kriginga zahtevajo "ročno" nastavitve parametrov, da dobimo ustrezne rezultate. EBK samodejno izračuna parametre s postopkom prevzorčenja in s pomočjo simulacij. Prav tako se razlikuje tudi po tem, da vse metode kriginga preračunajo semivariogram na podlagi znanih lokacij točk in ga nato uporabijo za izračun vrednosti na neznani lokaciji. Semivariogram predstavlja prostorsko korelacijo merjenih vzorčnih točk. Neznane vrednosti se pri krigingu ocenijo na podlagi najboljše nepristranske ocene ali z uteženim premikanjem povprečja. EBK upošteva predpostavko, da vsebuje približni semivariogram prave vrednosti za interpolacijsko območje.

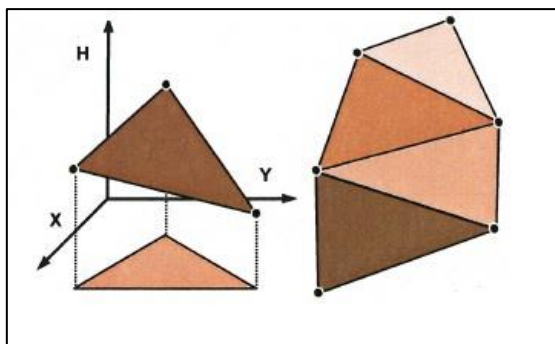
Druge metode kriginga za določitev parametrov semivariograma uporabljajo utežno metodo izravnave po metodi kvadratov najmanjših odstopanj, pri EBK se parametri ocenijo na podlagi omejene največje verjetnosti (ArcGis 10.2 - pomoč, 2014c).



### 3.4 Opis metode triangulacije TIN

Mreža neenakih trikotnikov TIN (angl. Triangulated Irregular Network - TIN) predstavlja zanesljiv, točen in učinkovit model za obdelavo in predstavitev prostorskih ploskev. Pojem triangulacija se nanaša na postopek sestave najprimernejših trikotnikov na podlagi končne množice podanih točk. Takšni trikotniki omogočajo dobro ponazoritev lokalnih značilnosti obravnavanega področja, ker vsak trikotnik hkrati določa lastno ravnino v prostoru. Pojem neenak ponazarja načelo oblikovanja najbolj primernih trikotnikov, ker so točke lahko podane z zelo različno prostorsko razporeditvijo in gostoto. Pojem mreža označuje sklenjene trikotnike, za katere se lahko opredeli ravninska trikotniška topologija, ki je kot sosedstvo in zaporednost pomembna sestavina TIN strukture. Topologija trikotnikov omogoča raznovrstne obdelave in analize TIN sestave (Šumrada, 2005).

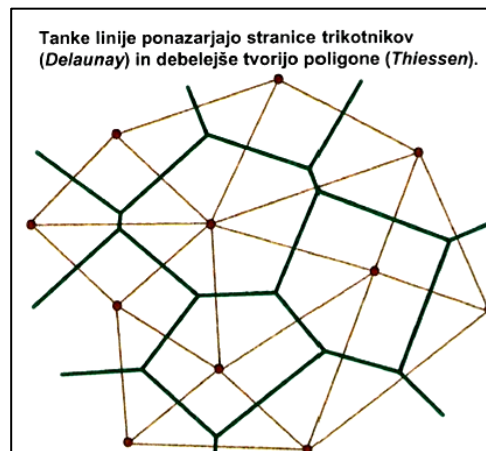
Najbolj poznana teoretična osnova za določitev trikotniške mreže je sestava Thiessenovih poligonov in najbolj poznan postopek določitve trikotnikov je Delaunayjev algoritem. Osnovno načelo slednjega je sestava čim bolj pravilnih (enakostraničnih) trikotnikov iz končne množice naključno razporejenih točk. Na oblikovanje TIN mreže lahko vplivamo z določitvijo lomnih linij (angl. break lines). Celoten postopek se lahko sicer odvija v ravnini na podlagi le dveh koordinat vsake točke, vendar pa ob upoštevanju tretje vrednosti v vsaki točki rezultat predstavlja prostorsko ploskev, ki jo tvori mreža različnih trikotnikov. Na Slika 11 je prikazan prostorski trikotnik, ki določa svojo ravnino v 3D prostoru ter hkrati določa njen naklon in prostorsko orientacijo (Šumrada, 2005).



Slika 11: Prostorski trikotnik (Šumrada, 2005)

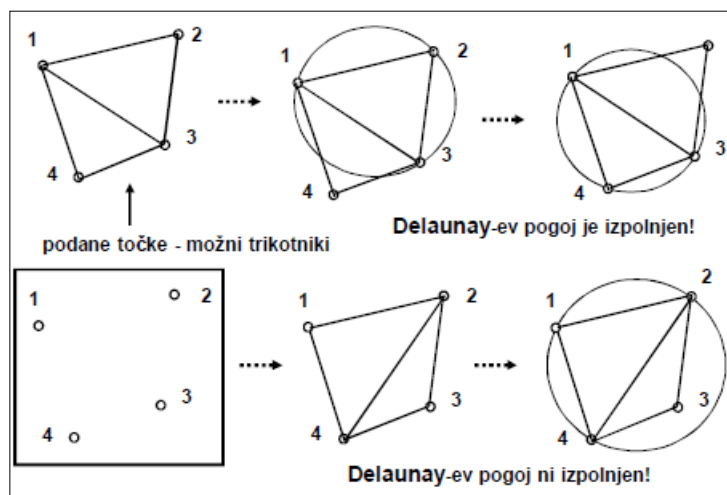
Vsako podano točko lahko obkrožimo z ustreznim iz ravnih segmentov sestavljenim poligonom oziroma območjem, za katerega velja, da so vse točke v tem ravninskem območju bližje obravnavani podani točki kot kateri koli drugi podani točki (Slika 12). Tak poligon imenujemo Thiessenov poligon in določa "vplivno območje" okoli podane točke. Vse podane točke na robu obravnavanega območja imajo odprta

ali neskončna vplivna območja, vse notranje točke pa dobijo končna, s poligoni omejena območja, ki so geometrično pravilni mnogokotniki (Šumrada, 2005).



Slika 12: Thiessenovi poligoni in Delaunayjevi trikotniki (Šumrada, 2005)

Za poenostavljeno ponazoritev uporabe Delaunayjevega algoritma sestave trikotnikov si lahko zamislimo štiri podane točke (Slika 13). Iz podanih točk sta možni dve triangulaciji. Osnovno načelo Delaunayjevega algoritma triangulacije temelji na pravilu, da očrtani krog vsakega na novo formiranega trikotnika ne sme vsebovati nobene druge podane točke, ki je lahko potencialno oglišče trikotnika (Šumrada, 2005).



Slika 13: Ponazoritev Delaunayjevega pravila (Šumrada, 2005)

### 3.5 Izračun prostornin

S stališča geodezije imamo pri zemeljskih delih opraviti s spremembo naravnega reliefa zemljišča v umetno oblikovano topografijo. Pri izračunu prostornine aproksimiramo zemeljske mase z geometrijskim telesom, katerega prostornino lahko izračunamo.

Način izračuna prostornin zemeljskih mas je odvisen od naslednjih parametrov:

- velikost in vrsta objekta,
- razgibanost terena,
- način projektiranja, zahtev po natančnosti.

V odvisnosti od oblike gradbenega telesa, za katerega je potrebno določiti velikost prostornin zemeljskih mas so razvite različne metode izračuna (Breznikar, Koler, 2009).

V osnovi se objekti delijo na linijske in ploskovne objekte. Glede na vrsto objekta pa se nanašajo različne metode izračuna prostornin. Naše področje raziskave predstavlja deponija, ki spada med ploskovne objekte. V nadaljevanju so opisane različne metode izračuna prostornin ploskovnih objektov, ki predvidevajo uporabo določene programske opreme za hitrejši izračun.

Najpogosteje se uporabljajo naslednje metode:

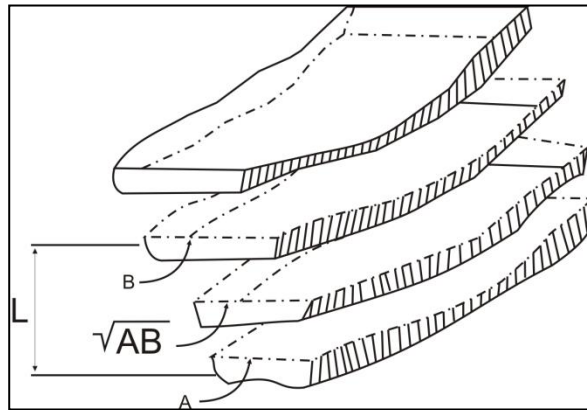
#### a) Metoda prečnih profilov

Čeprav se v večini uporablja pri linijskih objektih, je njena uporaba možna tudi pri ploskovnih objektih. Za potrebe v gradbeništvu je to najbolj zaželena metoda, zato se večkrat zahteva, da se prostornina materiala izračuna z metodo prečnih profilov.

Običajno poteka izračun prostornin na osnovi površine prečnih profilov terena in razdalje med profili. Pri tem kot osnovno telo smatramo prizmatoid, prostornina pa izračunamo s pomočjo Simpsonovih enačb (Breznikar, Koler, 2009).

### b) Prostornina izračunana iz površin plastnic

Območja posameznih profilov sestavljajo površine, ki jih opisujejo plastnice, razdaljo med posameznimi profili pa predstavlja višinski interval plastnic (Slika 14). Prostornino lahko izračunamo s pomočjo plastnic, z uporabo prečnih profilov ali s pomočjo prizem (Schofield, Breach, 2007).



**Slika 14: Princip izračuna prostornin s pomočjo plastnic (Surveydrawing, 10. 4. 2014)**

### c) Metoda primerjanja dveh ploskev

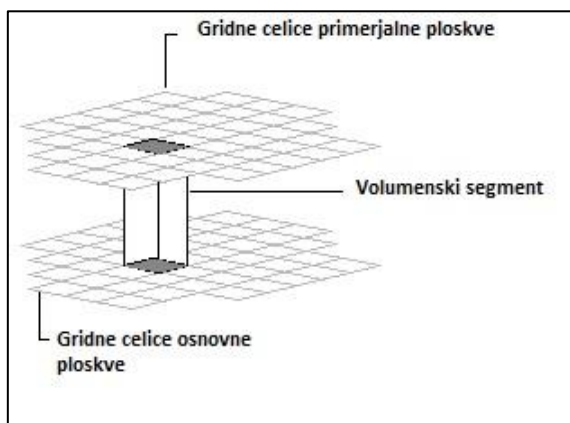
V naši raziskavi smo se za izračun prostornin odločili za slednjo metodo, ki je v nadaljevanju podrobneje opisana.

#### 3.5.1 Opis in osnovni princip metode primerjanja dveh ploskev

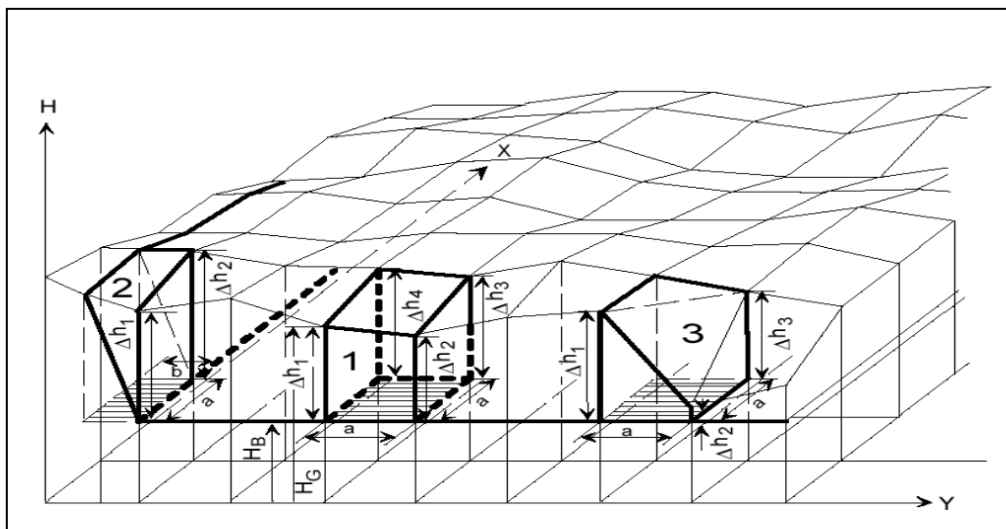
Metoda temelji na primerjanju dveh ploskev. Osnovna ploskev (angl. base surface) predstavlja obstoječ, nespremenjen teren pred posegom. Primerjalna ploskev (angl. comparison surface) predstavlja spremenjen teren oziroma poseg v prostoru, katerega prostornino želimo izračunati. V našem primeru sta ploskvi definirani na podlagi gridnih celic ali na podlagi neenake trikotniške mreže TIN. Izračun prostornine je odvisen od osnovne oblike ploskve (gridna celica ali trikotnik), saj se celotna prostornina sestavi iz seštevka delnih prostornin posameznih celic.

### 3.5.1.1 Izračun prostornin na podlagi gridnih celic

Vse interpolirane ploskve, ki so rezultat šestih interpolacijskih metod so definirane z gridno mrežo. Prostornina na podlagi dveh ploskev predstavlja presek med osnovno in primerjalno ploskvijo. V vsaki gridni celici se primerja vrednost višine na osnovni in primerjalni ploskvi. Razliko višin med gridnimi celicami predstavlja prostorninski segment ali stolpič, ki je prikazan na Slika 15. Višine so znane v vseh štirih ogliščih gridne celice. Tako dobimo stolpiče za celotno območje, kje se celice pokrivajo.



Slika 15: Osnovni princip izračuna delne prostornine s prostorninskim segmentom (AutoCAD Civil 3D - pomoč, 18. 2. 2014)



Slika 16: Prikaz različnih prostorninskih segmentov in računskih količin (Breznikar, Koler, 2009)

Med osnovno ploskvijo in primerjalno ploskvijo se tako oblikujejo štiristrane prizme, katerih prostornino izračunamo po enačbi:

$$V_i = \frac{P}{4} (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4)$$

P ... površina osnovne ploskve prizme ( $P = a^2$ ),

$\Delta h_1 - \Delta h_4$  ... višinske razlike med osnovno ploskvijo in primerjalno ploskvijo v posameznih temenih gridne celice.

Skupno prostornino dobimo s seštevkem prostornin posameznih prizem:

$$V = \sum_1^n V_i$$

Posebno pozornost je treba posvetiti robnim prostorninskim celicam, kjer se zaradi prekrivanja obeh ploskev oblikujejo drugi pravilni liki: klini ali piramide (št. 2 in 3) (Slika 16), katerih prostornine moramo izračunati po ustreznih enačbah (Breznikar, Koler, 2009).

### 3.5.1.2 Izračun prostornin na podlagi neenakih trikotnikov TIN

Mreža neenakih trikotnikov spada med najbolj pogoste metode za upodobitev ploskev, ki je predstavljena z množico točk. Izračun prostornin poteka med osnovno in primerjalno ploskvijo, ki sta definirani s TIN mrežo. Prostornino pri tej metodi izračunamo podobno kot v primeru gridnih celic. Celotna prostornina je sestavljena iz prostorninskih segmentov, ki so v tem primeru tristrane prizme. Pri prejšnji metodi smo poznali površino osnovne ploskev, v tem primeru pa jo moramo izračunati na osnovi položajnih koordinat vseh treh oglišč trikotnika:

$$p_t = \frac{1}{3} [y_1(x_2 - x_3) + y_2(x_3 - x_1) + y_3(x_1 - x_2)]$$

kjer je:

$p_t$  ... površina osnovne ploskve (površina trikotnika),

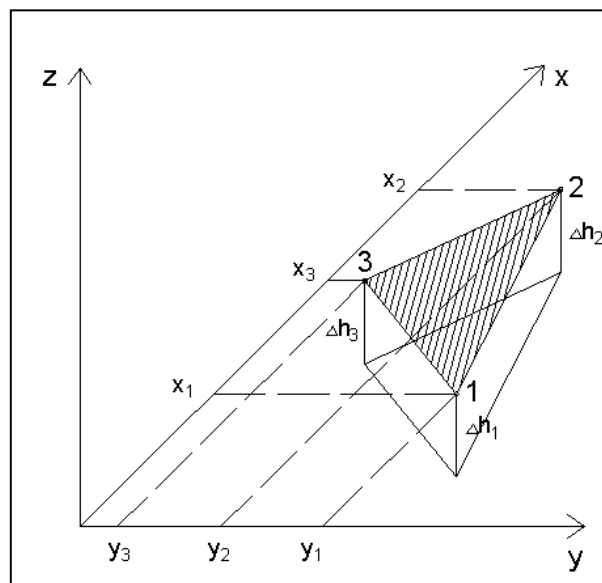
$x$  in  $y$  so položajne koordinate oglišč trikotnika.

Nato izračunamo prostornino:

$$V_i = \frac{p_t}{3} (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3),$$

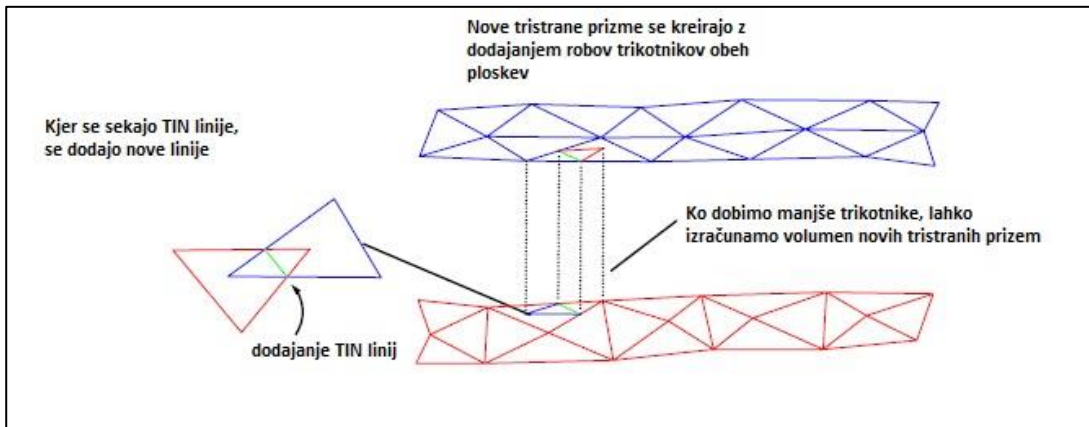
kjer je:

$\Delta h_1 - \Delta h_3$  ...višinske razlike med osnovno ploskvijo in primerjalno ploskvijo v posameznih ogliščih trikotnika.



**Slika 17: Prikaz tristrane prizme (Breznik, Koler, 2009)**

Tudi v tem primeru izračunamo prostornino s seštevanjem posameznih delnih prostornin. Na robovih, kjer se trikotniki osnovne ploskve in primerjalne ploskve ne ujemajo, se oblikujejo novi trikotniki. Kjer se TIN linije sekajo, se dodajo nove linije in ustvari se nov trikotnik. Rezultat so manjše tristrane prizme iz katerih lahko ponovno izračunamo delno prostornino. Postopek je prikazan na Slika 18. Ta metoda predstavlja zelo natančen izračun prostornine med dvema ploskvama.



**Slika 18: Princip kreiranja novih TIN linij (AutoCAD Civil 3D - pomoč, 19. 2. 2014)**



## 4. IZVEDBA MERITEV IN ANALIZA REZULTATOV

### 4.1 Izvedba meritev

Snemanje z brezpilotnim plovilom je za neizkušenega operaterja lahko zelo zahtevno, ker je oprema zelo specifična. Pomembno je znanje daljinskega upravljanja plovila in predhodno planiranje samega leta. Za izdelavo testnih izračunov, smo zato uporabili podatke izmer testnega območja podjetij MODRI PLANET, družba za razvoj, zajemanje in obdelavo podatkov, d.o.o. - MP in LGB, geodetski inženiring in informacijske tehnologije, d.o.o. - LGB, ki imata ustrezne izkušnje na področju brezpilotnega zajema podatkov. Vzporedno smo uporabili rezultate geodetske izmere, ki so jo izvedli študenti 2. letnika magistrskega študija Geodezije in geoinformatike, v okviru vaj pri predmetu Geodezija v inženirstvu 2.

#### 4.1.1 Izmera podjetja MODRI PLANET

Podjetje MODRI PLANET za svoje meritve uporablja štiri rotorni kopter Microdrone MD4 - 1000, ki ima nameščen digitalni fotoaparatus Olympus Pen EP - 1. Kamera ima nameščen 18 x 13,5 mm senzor, ločljivost 12,3 milijona točk in fiksni objektiv z goriščno razdaljo 17 mm.



Slika 19: Brezpilotni kvadrokopter podjetja MODRI PLANET (Pajtler, 2013)

Kvadrokopter ima nameščen GNSS sistem, INS sistem, kar mu omogoča samostojno letenje po vnaprej določeni poti, lahko pa se ga upravlja izključno preko daljinskega vodenja. Položaj vzleta in območje, ki ga je potrebno preleteti se določi v programu mdCockpit. Program je povezan z aplikacijo Google Earth, kjer enostavno določi vzletno mesto in se nato s poligonom označi širše območje zajema. Program nato samostojno planira pot leta, pri tem pa upošteva nastavitve (vzdolžni in prečni preklap posnetkov, višino leta, hitrost leta, upošteva zeleno ločljivost posnetkov). V programu se lahko opravi tudi simulacijo leta in spremlja letalo med letenjem. Za georeferenciranje se uporabljajo oslonilne točke, ki so signalizirane s črno tarčo na belem ozadju. Za določitev koordinat oslonilnih točk se uporablja GNSS - RTK metoda ali pa klasična metoda izmere, odvisno od situacije. V primeru GNSS - RTK metode izmere se koordinate določijo z večkratnimi merjenji (Peterman, Mesarič, 2012).

Za nadaljnjo obdelavo uporabljajo program 3D Survey, ki so ga razvili sami v podjetju. Program vsebuje avtomatizirane postopke za prepoznavanje oslonilnih točk, slikovno ujemanje, georeferenciranje. Tako lahko izdelajo georeferenciran oblak točk, ortofoto, digitalni model višin (angl. digital elevation model - DEM), digitalni model površja (angl. digital surface model - DSM), ploskev z mrežo TIN. Za naše testno območje smo dobili oblak točk in digitalni ortofoto.

Osnovne informacije zajema podatkov testnega polja:

- višina leta: 80 m,
- število oslonilnih točk: 9,
- število posnetih fotografij: 46,
- 3D odstopanja koordinat oslonilnih točk:  $\pm 2 - 3$  cm,
- število identificiranih 3D veznih točk v postopku izravnave: 28615,
- ločljivost posnetkov 2 cm.

### 4.1.2 Izmera podjetja LGB

Podjetje LGB za zajem podatkov uporablja brezpilotno letalo eBee švicarskega proizvajalca SenseFly. Letalo ima nameščen digitalni fotoaparatus s senzorjem 6,17 x 4,63 mm, ločljivostjo 16,1 milijona točk in objektivom z goriščno razdaljo 4,4 mm. Letalo ima vgrajen GNSS sprejemnik in lahko leti samostojno ali pa s pomočjo daljinskega vodenja.



**Slika 20: Brezpilotno letalo podjetja LGB (SenseFly, 22. 1. 2014.)**

Položaj vzleta in območje, ki ga je potrebno preleteti se določi v programu eMotion. Program je povezan z aplikacijo Google Earth, kjer se lahko enostavno določi vzletno mesto in se nato s poligonom označi širše območje zajema. Program nato samostojno planira pot leta, pri tem pa upošteva nastavitve (vzdolžni in prečni preklap posnetkov, višino leta, hitrost leta, upošteva zeleno ločljivost posnetkov). V programu se lahko opravi tudi simulacijo leta in spremlja letalo med letenjem. Ločljivost zajetih fotografij je odvisna tudi od višine poleta. Nižja je višina poleta, večja je ločljivost podatkov in obratno. Za georeferenciranje se uporabljajo oslonilne točke. V našem primeru so za oslonilne točke uporabili bele križe. Koordinate oslonilnih točk so določene na osnovi GNSS - RTK meritev ali s klasično metodo izmere.

Za naše območje so uporabili 4 od 9 oslonilnih točk, ki jih je za georeferenciranje uporabilo podjetje MODRI PLANET.

Na Slika 21 je prikazan polet letala čez območje deponije. Iz slike so razvidna mesta, kjer so bile posnete fotografije. Rdeča barva predstavlja pot letenja. Rdeč pravokotnik predstavlja območje preleta. Iz Slika 21 je razvidno, da plovilo zajame večje območje kot je potrebno, da zagotovi zadosten preklap med posnetki. Območje preleti v vzdolžni in prečni smeri, tako zagotovi željen odstotek prekrivanja fotografij, dobro pokritost s fotografijami in zagotovi, da so oslonilne točke posnete na večini fotografij. Bele oznake predstavljajo točko, kjer je bil zajet posnetek. Približni položaj posnetka se uporabi pri nadaljnji obdelavi.



**Slika 21: Prikaz poti letenja brezpilotnega letala (LGB, Google Earth, 2013)**

Za nadaljnjo obdelavo so uporabili program Postflight Terra 3D. Program vsebuje avtomatske postopke za slikovno ujemanje in georeferenciranje. Tako lahko izdelajo georeferenciran oblak točk, ortofoto, digitalni model višin (angl. digital elevation model - DEM), ploskev z mrežo TIN. Za svoje testno območje smo dobili oblak točk in digitalni ortofoto.

Osnovne informacije zajema podatkov testnega polja:

- višina leta: 150 m,
- število oslonilnih točk: 4,
- število posnetih fotografij: 135,
- 3d odstopanja koordinat oslonilnih točk:  $\pm 1,2$  cm,
- število identificiranih 3D veznih točk v postopku izravnave: 267848,
- ločljivost posnetkov: 5 cm.

### 4.1.3 Izmera študentov

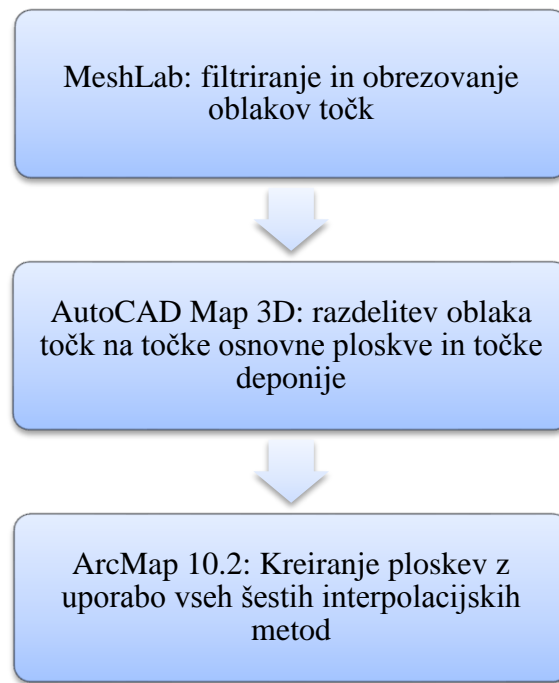
V okviru vaj, pri predmetu Geodezija v inženirstvu II, so študentje magistrskega študija Geodezija in geoinformatika izvedli terensko izmero deponije, saj so tudi sami izvedli izračun prostornin. Uporabili so klasično geodetsko metodo izmere. Posneli so detajlne karakteristične točke lomov terena. Uporabljena oprema:

- tahimeter Leica FlexLine TS06,
- prizma GPR 111,
- stativ,
- togo grezilo.

Območje deponije so posneli z detajlnimi točkami, z uporabo polarne metode, tako da so izmerili lomne linije terena nasipa in detajlne točke, ki opisujejo dejansko obliko v naravi. Izmerjene so tudi točke, ki ležijo okoli 5 metrov od spodnjega roba in so bile izmerjene, za potrebe določitve osnovne ploskve.

## 4.2 Pred obdelava podatkov za izračun prostornin

Vhodne podatke za nadaljnje delo predstavljajo oblak točk in digitalni ortofoto, ki sta produkta izmere podjetij MODRI PLANET in LGB, ter detajlne točke klasične geodetske izmere študentov. Pred izračunom prostornine je potrebno narediti še pred obdelavo oz. filtriranje oblakov točk. V fazi filtriranja smo ročno odstranili točke, ki ne predstavljajo točk tal. Delo je sestavljeno iz več zaporednih korakov, ki so pregledno predstavljene v spodnjem shematskem prikazu (Slika 22).



Slika 22: Shematski prikaz pred obdelave podatkov

### 4.2.1 Pred obdelava oblakov točk v programu MeshLab

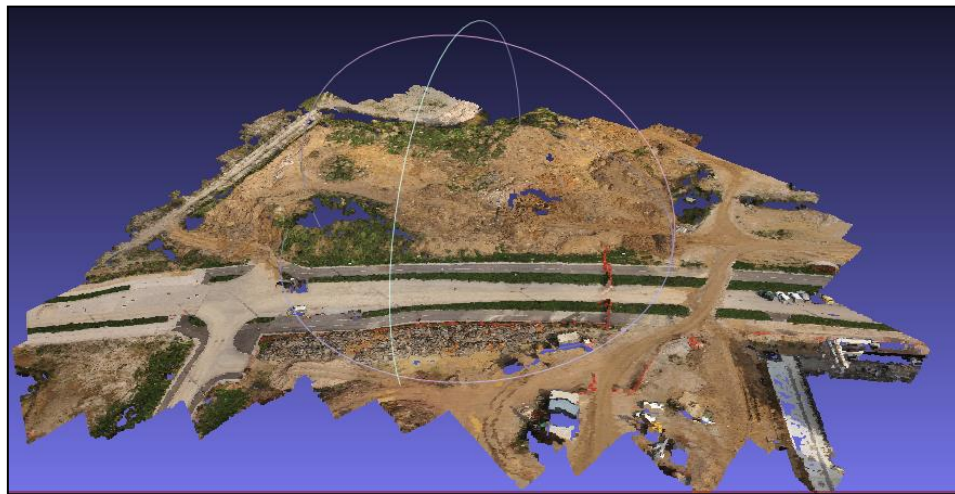
Z zajemom iz zraka, dobimo veliko število točk. Za izračun prostornin je zato prvoten oblak točk potrebno filtrirati oz. odstraniti točke, ki ne predstavljajo točk tal. Neželene točke imenujemo tudi šum. V našem primeru šum predstavljajo: krošnje dreves, gradbeni stroji, varnostne ograje, grmičevje, objekti in druge stvari na terenu, v času zajema. Šum lahko znatno vpliva na samo obliko reliefa, zato je treba oblak točk podrobno pregledati in odstraniti nepotrebne točke. Za odstranitev šuma lahko uporabimo različne tehnike. Najpogosteje se uporablja avtomatsko filtriranje, ki ga dopolnimo z ročnim brisanjem točk.

Avtomatsko filtriranje oblakov točk se je izvedlo v programu, ki je namenjen obdelavi podatkov. Filtri, ki jih lahko uporabimo, so različni. V našem primeru so bili uporabljeni filtri za brisanje vegetacije. Rezultat je prečiščen oblak točk, ki vsebuje točke nasutega materiala. Izkazalo se je, da je po izvedenem filtriranju v podatkih ostalo kar nekaj točk, ki ne predstavljajo tal. Za ročno filtriranje obdelavo smo izbrali program MeshLab.

MeshLab je prosto dostopen program, ki nam omogoča enostavno urejanje oblakov točk. V program smo uvozili oblaka točk formata \*.ply, ki je pogosto uporabljen za shranjevanje oblakov točk. Poleg koordinat točk zapis vsebuje tudi podatke o barvi in transparentnosti posamezne slikovne točke ter podatke o normali posamezne točke (Wikipedija, 2014). Ker je oblak sestavljen iz več milijonov točk, je pomembno da imamo zmogljiv računalnik, saj je lahko delo zelo zamudno. Ker vsaka točka vsebuje tudi podatke o barvi, lažje ločimo rastje in objekte od zemljine. Oblaka točk sta zajemala širše območje deponije, zato smo oblak točk najprej obrezali na izbrano območje.

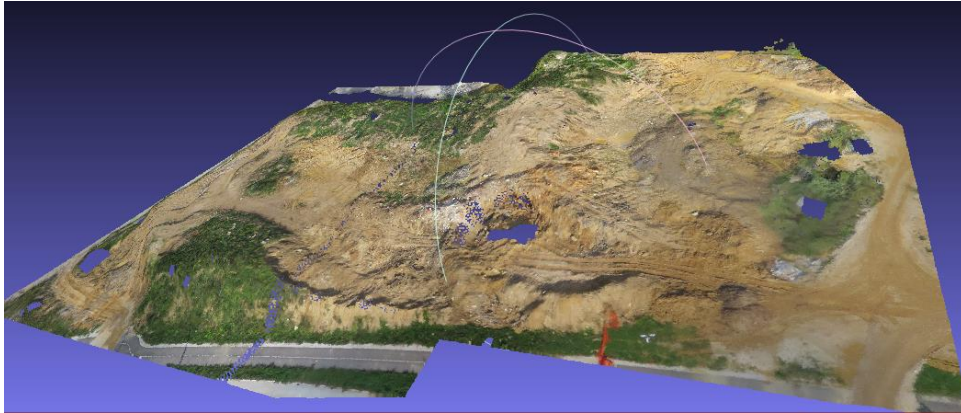
Uporabljeni ukazi:

- *Select vertexes* - izbira točk iz oblaka točk,
- *Delete the current set of vertices* - izbris izbranih točk.

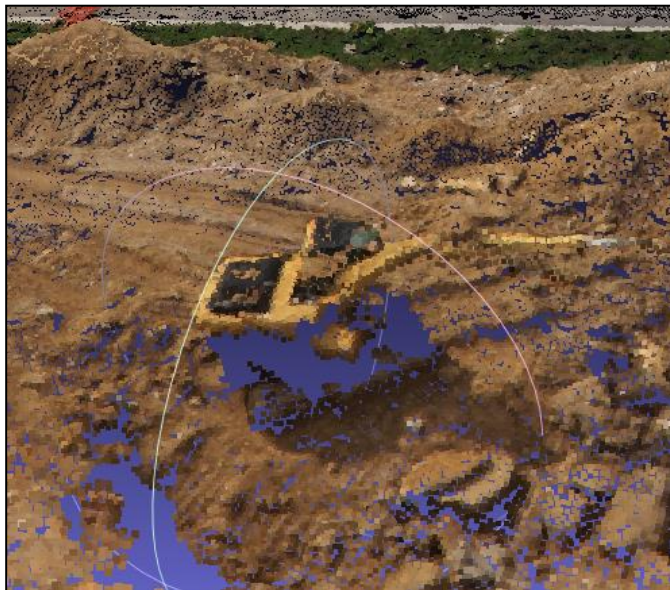


**Slika 23: Oblak točk pred obrezovanjem**

Sledilo je ročno brisanje točk. Da bi odstranil vse morebitne znake šuma smo pregledali celotno testno polje. Na določenih mestih so ostale neželene točke, ki jih je treba ročno odstraniti. Uporabimo zgoraj omenjene ukaze in pazimo, da po nepotrebnem ne izbrišemo točk terena. Na Slika 24 je za primerjavo prikazan obrezan oblak točk.



**Slika 24: Oblak točk po obrezovanju**



**Slika 25: Gradbeni stroj kot primer šuma**

Iz Slika 25 je razvidno, da bi prikazan gradbeni stroj zelo spremenil obliko reliefa deponije. Podatki o barvi so znatno pripomogli, da smo prepoznali gradbeni stroj ter te točke odstranili. Pomembno je, da sistematično in natančno pregledamo celotno območje. V nasprotnem primeru lahko pri nadaljnjem delu pride do velikih odstopanj pri kreiranju ploskev in izračunu prostornin. Pojavijo se dodatni hribčki in grebeni.



Na koncu smo obrezan in prečiščen oblak točk izvozili v formatu \*.xyz, ki je pogosteje uporabljen zapis za shranjevanje oblaka točk. Omenjeni zapis ne vsebuje podatkov o barvi točk, pač pa samo 3D koordinate vseh točk in predstavlja ASCII datoteko, ki jo lahko odpremo in urejamo v beležnici.

Uporabljeni ukazi:

- *File -> Export Mesh as.*

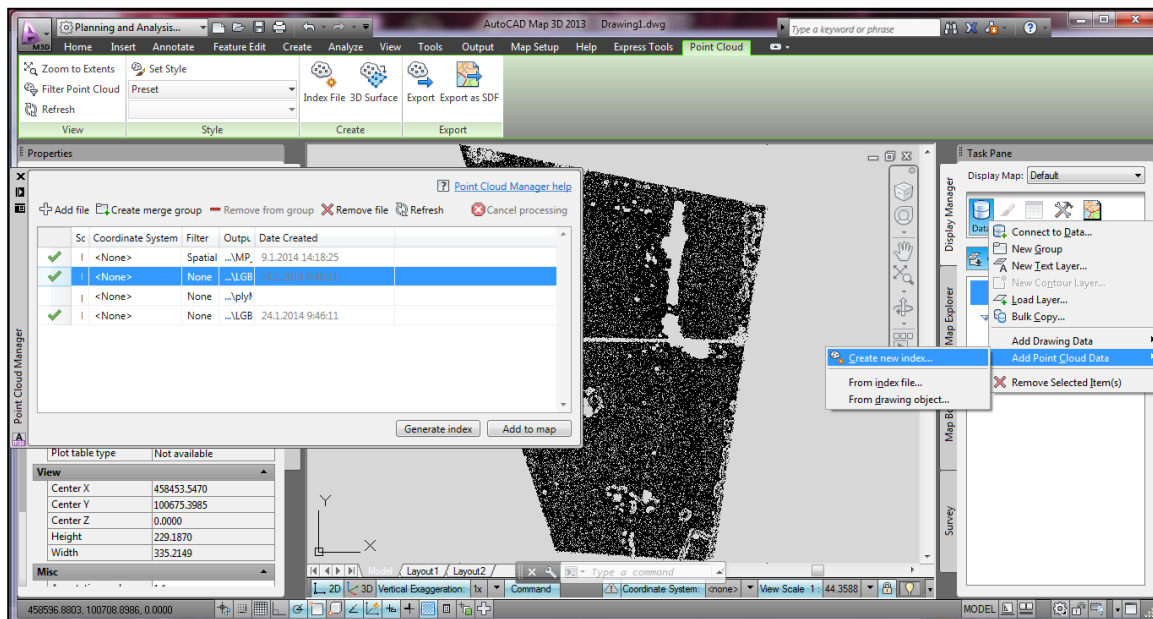
Nastavimo format \*.xyz, brez upoštevanja normale in shranimo.

#### **4.2.2 Pred obdelava oblakov točk v programu AutoCAD Map 3D 2013**

Oblak točk, ki smo ga izvozili iz programa MeshLab, je potrebno razdeliti na območje osnovne ploskve in območje deponije. Osnovno ploskev sestavljajo točke, ki predstavljajo bližnjo okolico deponije oz. njen spodnji rob. Ker so točke združene v enem oblaku točk, smo za razdelitev oblaka točk uporabili podatke klasične izmere. Z detajlnimi točkami smo določili spodnji rob območja deponije, ki smo ga povezali v poligon. Spodnji rob deponije opisuje zunanjo mejo točk za ploskev deponije in notranjo mejo točk za osnovno ploskev. Robne točke okolice predstavljajo zunanjo mejo točk za osnovno ploskev.

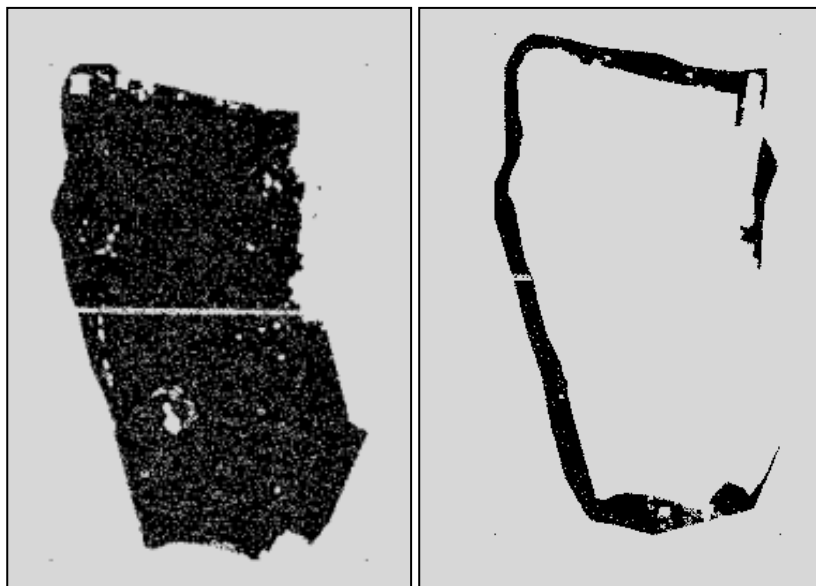
Razrez oblakov smo želeli opraviti v programu AutoCAD Civil 3D 2013, vendar program ne podpira izvoza oblaka točk. Iskali smo program, kjer bo možno izvesti enake operacije in izvoz oblaka točk. Rešitev predstavlja program AutoCAD Map 3D, ki ima več orodij za obdelavo oblaka točk.

Delo smo začeli v že obstoječi datoteki z izrisanima mejnima poligonoma za obe ploskvi. Najprej smo uvozili oblaka točk. V oknu *Task Pane* se nahaja gumb *Data*, s klikom nanj se nam pokaže možnost *Add point cloud data*. Izbrali smo *Create new index file*, saj program uporablja svoj format za oblikovanje oblaka točk s končnico \*.isd. Odpre se pojavno okno *Point cloud manager*, izberemo *Add file*, nastavimo format *Ascii (\*.xyz)* ter odpremo datoteko. Ko se datoteka pojavi v zavihku, s klikom na gumb *Generate index* ustvarimo oblak točk.



Slika 26: Prikaz dela v AutoCAD Map 3D 2013

Kreiran oblak točk je treba sedaj razdeliti na območje deponije in območje okolice. To storimo tako, da oblaku z ukazom *Filter point cloud*, v zavihku *Point cloud*, ki se pojavi ob kliku na oblak točk, dodamo filter, ki bo izločil točke. Uporabimo ukaze: *Filter point cloud* -> *Filter by: spatial* -> *Locate on map*. Tako izrišemo poligon, ki poteka točno po že pripravljenem mejnem poligonu. Ko zaključimo z izrisom, potrdimo z ukazom *Apply filter*. Rezultat je oblak točk na Slika 27 (levo), ki predstavljajo samo območje točk nasutja materiala.



Slika 27: Prikaz obrezanega oblaka točk območja deponije (levo) in območja okolice (desno)

Obrezan oblak točk nato izvozimo z ukazom *Export*, v zavihku *Point cloud*. Izberemo format \*.xyz in shranimo. Enako naredimo za točke, ki predstavljajo okolico deponije na Slika 27 (desno) in jih bomo uporabili za osnovno ploskev. Posebno pozornost je treba nameniti izrisu poligona za izbor točk okolice, saj so točke v območju med dvema poligonoma. Ta oblak shranimo posebej za oblikovanje osnovne ploskve.

### **4.3 Kreiranje ploskev v programu ArcGis - ArcMap 10.2**

V tem poglavju je opisano delo v programu ArcMap, kjer smo uporabili vse interpolacijske metode iz poglavja 3.3.2. S pomočjo interpolacij smo kreirali ploskve na osnovi gridnih celic različnih dimenzij. V okviru posameznih interpolacijskih metod so slikovno prikazani primeri rezultatov.

Programski paket ArcGis razvijalca ESRI vsebuje veliko paleto različnih orodij, za obdelavo, analize in prikaz prostorskih podatkov. Razdeljen je na več aplikacij, vsaka predstavlja določeno vrsto orodja za prostorske podatke. Za nas je bil najbolj primeren ArcMap 10.2, ki vsebuje veliko vtičnikov za napredne prostorske analize in izvedbo številnih interpolacij. Naš cilj je, da uporabimo vsaj šest interpolacijskih metod.

#### a) Uvoz datotek.

Delo smo začeli z uvozom oblakov točk. Uporabili smo orodje *ASCII 3d to feature class* in izbrali ASCII datoteko formata \*.xyz. V nastavitvah je potrebno določiti izhodno datoteko in geometrijski tip datoteke. Izbrali smo *Multipoint* zaradi velikega števila točk in prostor med točkami nastavili na 1, to za lažji uvoz točk zahteva program. Rezultat je že obrezan točkovni sloj deponije in točkovni sloj osnovne ploskve (Slika 28).



**Slika 28: Prikaz točkovnega sloja v ArcMap 10.2**

Dobljen točkovni sloj nam omogoča izvedbo prostorskih interpolacij. Program izvede interpolacije na določenem območju, zato je treba definirati zunanjo mejo interpolacije. V nasprotnem primeru ploskev ne bo predstavljala zelenega območja. Za zunanjo mejo deponije smo uporabili poligon, s katerim smo v programu AutoCAD Map 3D obrezali oblak točk na območje deponije. Poligon smo izvozili kot "shape" datoteko in jo odprli kot nov sloj v programu ArcMap 10.2. Nato smo poligon z orodjem *Feature to polygon* obodni poligon preoblikovali v ploskovni sloj, ki bo služil kot "maska" za interpolacijo. Enako smo naredili za omejitev interpolacije za osnovno ploskev, le da je tukaj poligon drugačen. Dobili smo zelene sloje, tako da smo lahko nadaljevali z interpolacijami.

Za naše področje raziskave smo se odločili za gridne celice velikosti 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, zato da bi dobili optimalno velikost celic za izračun prostornine.

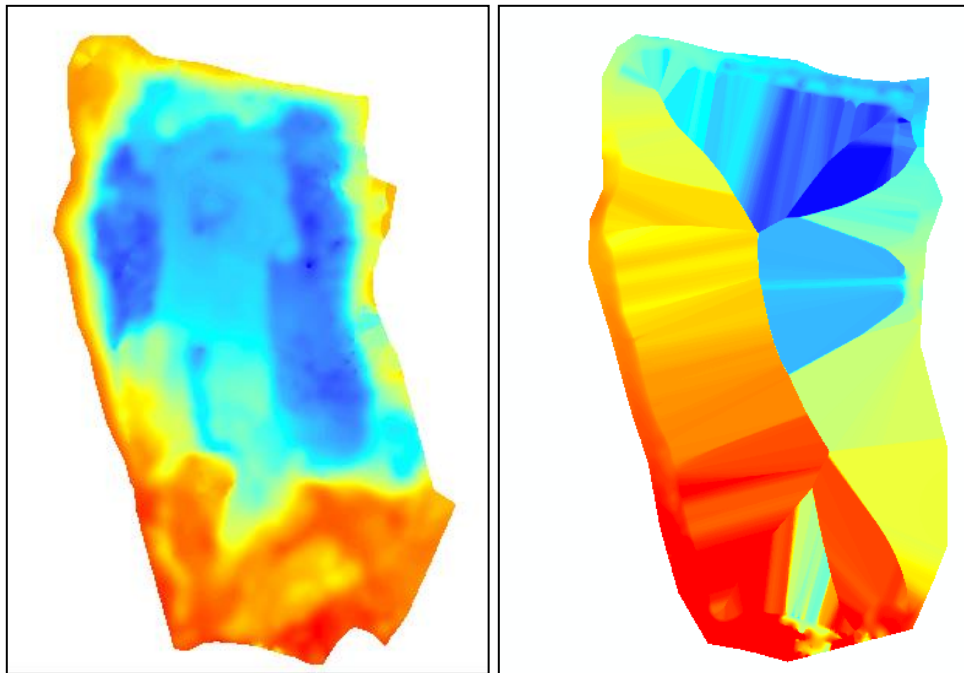
## b) Interpolacije ploskev

### b1) Interpolacija z Metodo inverzne razdalje

Za interpolacijo z Metodo inverzne razdalje uporabimo orodje *IDW*, vtičnika *3D analyst*, ki omogoča prostorske analize. Za interpolacijo smo izbrali naslednje nastavitve:

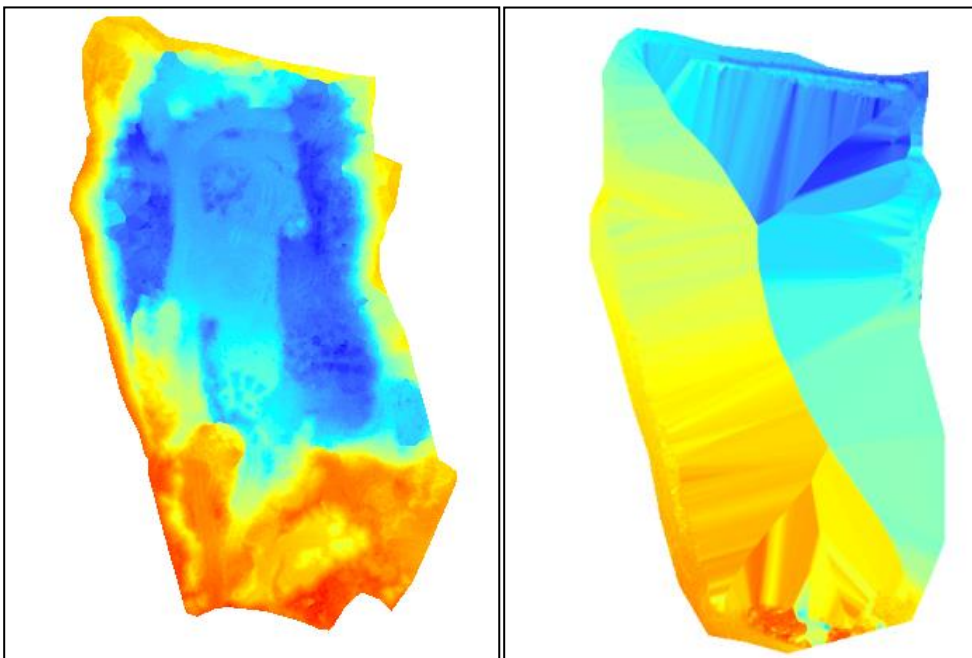
- *Input point features*: točkovni sloj deponije ali osnovne ploskve,
- *Z value field*: *shape.z* in predstavlja vrednost višine oziroma Z koordinato,
- *Output raster*: določimo ime izhodne datoteke in lokacijo za shranjevanje,
- *Output cell size*: velikost celice,
- *Power*: velikost eksponenta funkcije. Izbrali smo 2,
- *Search radius*: radij iskanja variabilni,
- *Number of points*: število točk okolice 12.

S klikom na gumb *Environments* se odpre seznam nastavitvev, kjer lahko še bolj podrobno opredelimo pogoje interpolacije. Izberemo *Raster analysis* in za masko nastavimo izbran poligon za zunanjo mejo interpolacije. Vse nastavitve potrdimo in zažene se interpolacija IDW, ki lahko traja tudi nekaj ur. Vzrok je velika količina podatkov in velikost gridnih celic.



**Slika 29: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov LGB (desno), (interpolacija z Metodo inverzne razdalje)**

Na Slika 29 je prikazana ploskev deponije iz podatkov LGB, z velikostjo gridnih celic 0,1 m. Ploskev je prikazana z barvno lestvico višin. Temno modre vrednosti predstavljajo najvišje dele deponije na nadmorski višini 315,613 m, rdeče vrednosti predstavljajo najnižje dele na nadmorski višini 305,109 m. Podobne rezultate smo dobili za vse velikosti gridnih celic istega oblaka točk. Glede na barvno lestvico se ploskve različne resolucije ne razlikujejo, vidni so le bolj nazobčani robovi zaradi večjih celic. Pri interpolaciji oblaka točk MODRI PLANET (MP), na Slika 30, smo dobili nižje vrednosti višin. Najvišja vrednost višin za velikost gridne celice je bila 314,855 m, najnižja vrednost pa 304,527 m. Iz slike je tudi razvidno, da ni večjih odstopanj med obema različicama podatkov. Rezultat predstavlja 5 ploskev deponije in 5 osnovnih ploskev za vsak oblak točk. Prikaz minimalnih in maksimalnih vrednosti višin je predstavljen v grafikonih 1 in 2 na koncu poglavja in v prilogi A.



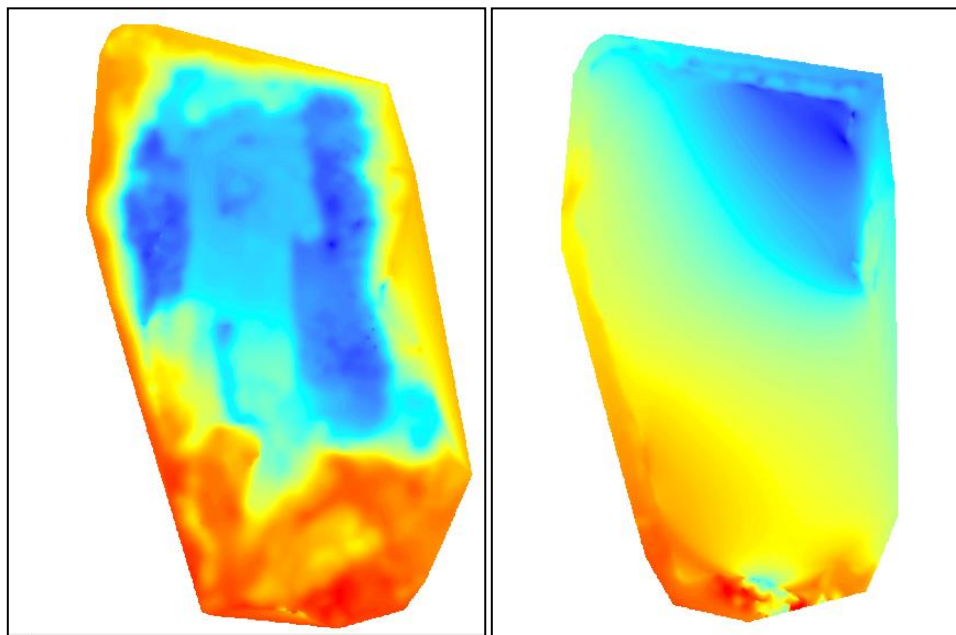
**Slika 30: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov MP (desno), (interpolacija z Metodo inverzne razdalje)**

Na Slika 30 je prikazana ploskev deponije in osnovna ploskev iz oblaka točk MP, z velikostjo gridnih celic 0,1 m. Iz barvne lestvice je razvidno, da po sredini osnovne ploskve poteka neke vrste greben, ki je nastal z interpolacijo. To je verjetno posledica pomanjkanja točk na sredini, saj je ploskev kreirana le na podlagi točk na obrobni delih. Razlike pa znašajo okoli 1 m, zato greben na izračun prostornin ne bo imel posebnega vpliva. Prikaz minimalnih in maksimalnih vrednosti višin je predstavljen v grafikonih 1 in 2 na koncu poglavja in v prilogi A.

### b2) Interpolacija z Metodo naravnih sosedov

Za interpolacijo z Metodo naravnih sosedov uporabimo orodje *Natural neighbor* vtičnika *3D analyst*. Metoda ne omogoča posebnih nastavitev, potrebujemo le vhodni točkovni sloj, nastavimo Z vrednosti, izhodni sloj in velikost gridih celic. V okolju *Environments* ponovno nastavimo "masko", ki jo potrebujemo za zunanjo mejo interpolacijskega območja. Interpolacija za posamezno ploskev je trajala tudi do ene ure. Ponovno dobimo po 5 ploskev deponije in 5 osnovnih ploskev za vsak sklop podatkov.

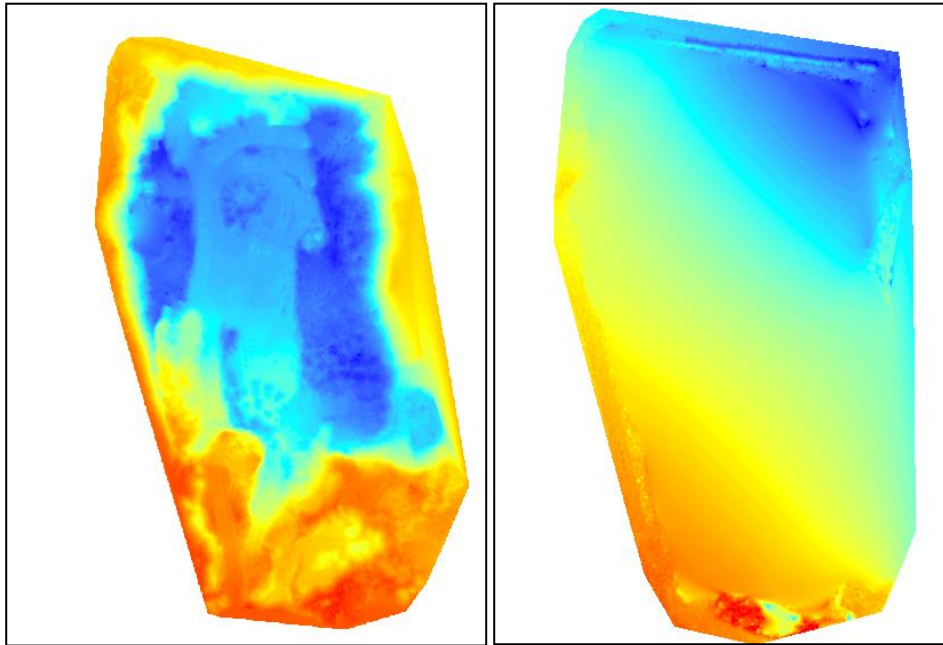
Na Slika 31sta prikazani ploskvi deponije, interpolacija z Metodo naravnih sosedov, velikost gridne celice je 0,2 m. Vidimo, da interpolacijska metoda nekoliko poenostavi mejo deponije, ki je bolj gladka, nekatere krivine so izpuščene. Vrednosti višin so za oba niza podatkov primerljive z Metodo inverzne razdalje, razlika je le v nekaj centimetrih, kar je razvidno na koncu poglavja v grafikonih 1 in 2 in v prilogi A. Konfiguracija terena je ostala nespremenjena, brez večjih odstopanj.



**Slika 31: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov LGB (desno), (interpolacija z Metodo naravnih sosedov)**

Tudi pri interpolaciji osnovnih ploskev, se je meja ploskve nekoliko spremenila, od začetne geometrije. Interpolacija se je izvedla v območju vseh krajinih točk deponije, tako da so izpuščene posamezne krivine na robu. Na Slika 32 je prikazana ploskev deponije in osnovna ploskev interpolacije z Metodo naravnih sosedov za podatke MP. Vidimo da višina narašča iz jugozahodnega dela proti severovzhodu, kjer so najvišje vrednosti višin in so okoli 1 m višje kot na jugozahodnem delu. Osnovna ploskev je bolj gladka

kot ploskev interpolirana z Metodo inverzne razdalje. Prikaz minimalnih in maksimalnih vrednosti višin za podatke LGB je predstavljen v prilogi A.



**Slika 32: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov MP (desno), (interpolacija z Metodo naravnih sosedov)**

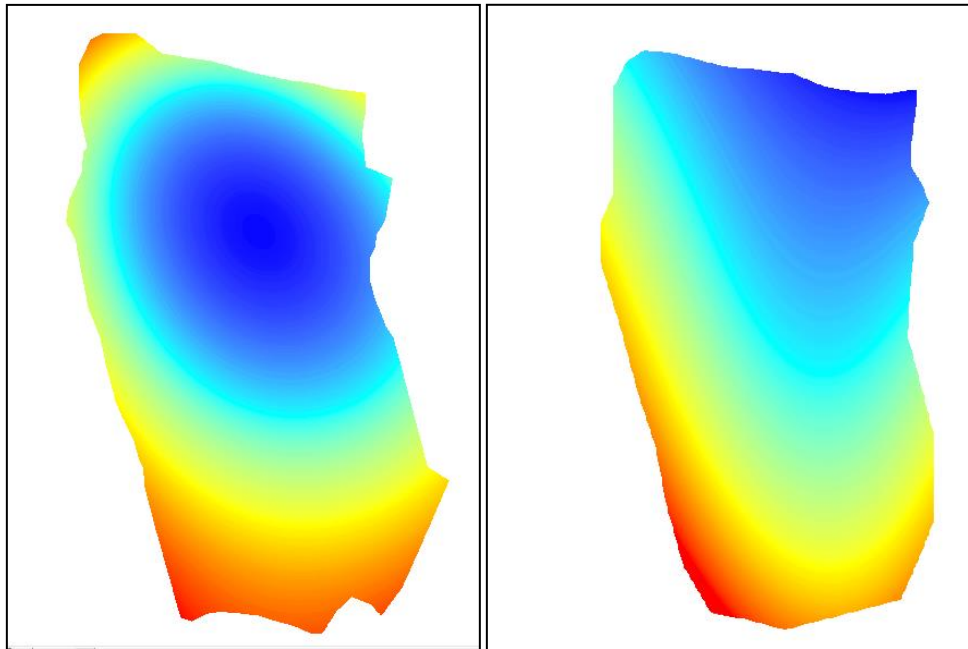
### b3) Interpolacija z Metodo trend

Za interpolacijo z Metodo trend uporabimo orodje *Trend*, vtičnika *3D analyst*. Kot pri prejšnjih metodah nastavimo vhodni sloj, Z vrednosti in velikost celic. Posebej moramo nastaviti naslednje vrednosti:

- *Polynomial order*: vrednost polinoma od 1 do 12 in določa kompleksnost ploskve. Izbrali smo 7,
- *Type of regression*: tip regresije podatkov. Izbrali smo linearno regresijo.

Na koncu smo nastavili še mejo območja interpolacije, ki je enaka za vse interpolacije. Trend spada med enostavnejše interpolacije, zato procesiranje ne traja dolgo. Na Slika 33 vidimo ploskev deponije in osnovno ploskev, kreirano z Metodo trend. Metoda je globalna, kar pomeni, da se ploskev povsem ne prilega vsem vrednostim. Vidimo, da vrednost polinoma vpliva na ukrivljenost ploskve, ta je zelo posplošena. Barvna lestvica prikazuje višine, ki v obliki elips naraščajo proti maksimalnim vrednostim. Minimalne in maksimalne vrednosti višin so predstavljene grafikonih 1 in 2, na koncu poglavja in v prilogi A.





**Slika 33: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev iz podatkov LGB (desno), (interpolacija z Metodo trend)**

Vrednosti višin gridnih točk, ki smo jih dobili z interpolacijo odstopajo za okoli 0,8 m od minimalnih in okoli 0,5 m od maksimalnih vrednosti, ki smo jih dobili s prejšnjima metodama interpolacije, kar je razvidno iz grafikonov 1 in 2 in iz priloge A. Obe različici podatkov sta dali podobne rezultate, tako da podatkov MP ne opisujemo posebej. Na Slika 33 je razvidno, da ploskvi ne predstavljata pravilne konfiguracije terena v naravi. Metoda se ni izkazala za točno, vendar smo jo vključili v raziskavo, ker smo želeli primerjati vsaj šest interpolacijskih metod.

#### b4) Radialne bazne funkcije - Navadni zleпки

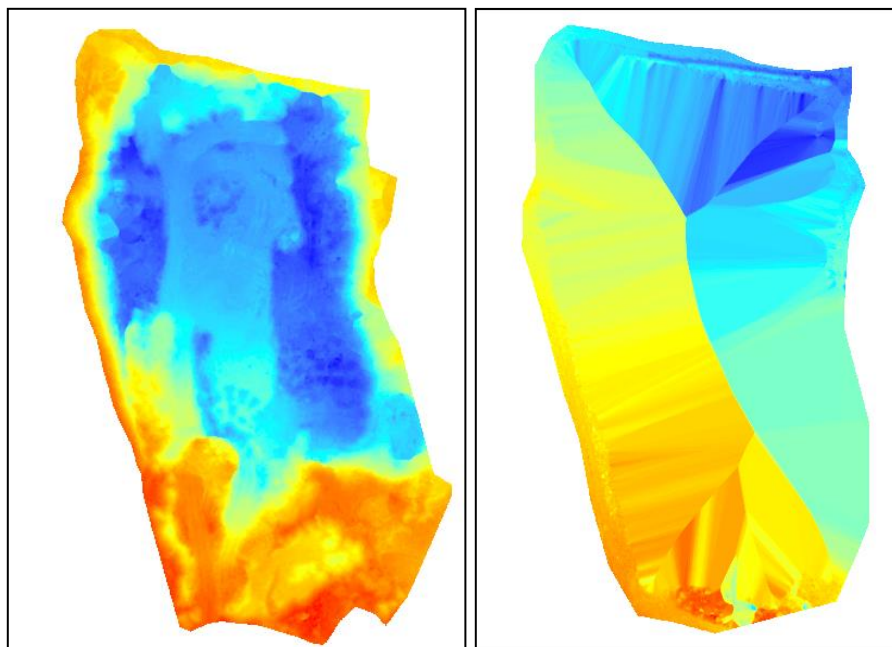
V raziskovalnem delu naloge smo hoteli vključiti interpolacijo Navadni zleпки, vendar se je izkazalo, da orodje *Spline* v programu ne deluje za večjo količino podatkov. Rešitev predstavljajo radialne bazne funkcije, kjer so kot bazna funkcija vgrajeni tudi Navadni zleпки in delujejo brez posebnih težav.

Za interpolacijo smo uporabili orodje *Radial basis functions*, ki ga najdemo v vtičniku *Geostatistical analyst*. Začetne nastavitve so enake kot pri vsaki interpolacijski metodi, posebnosti so naslednje:

- *Search neighborhood*: soseska iskanja točk za interpolacijo. Izbrali smo standard,
- *Maximum neighbors*: največje število sosedov smo nastavili na 15,
- *Minimum neighbors*: najmanjše število sosedov smo izbrali 10,
- *Radial basis function*: izbira radialne funkcije *Completely regularized spline* za Navadne zlepkke.

Ostale nastavitve ostanejo privzete. Na koncu nastavimo še meje interpolacije enako kot pri ostalih metodah. Izgradnja ploskve z metodo Navadnih zlepkov traja nekaj ur, vzrok je zapleten matematični izračun interpolacijskih vrednosti.

Na Slika 34 je prikazana ploskev deponije in osnovna ploskev, velikost gridne celice je 0,1 m. Rezultati so zelo podobni, kot pri Metodi inverzne razdalje. Interpolirane minimalne in maksimalne vrednosti višin so predstavljene v grafikonih 1 in 2 in v prilogi A. Meje interpolacije so dobro definirane in niso spremenjene, kot pri interpolaciji z Metodo naravnih sosedov. Minimalne in maksimalne vrednosti višin so primerljive z Metodo inverzne razdalje in Metodo naravnih sosedov. Z večanjem gridnih celic do velikosti 0,5 m, se ekstrema višin bolj spreminjata pri podatkih MP, kar znaša do 12,1 cm med ploskvijo resolucije 0,1 m in med ploskvijo resolucije 0,5 m. Pri podatkih LGB je razlika le do 2 cm. Višinski podatki so predstavljeni v grafikonih 1 in 2 na koncu poglavja in v prilogi A. Osnovna ploskev ima podobno konfiguracijo kot pri interpolaciji z Metodo inverzne razdalje. Višinske vrednosti so primerljive z ostalimi interpolacijami.

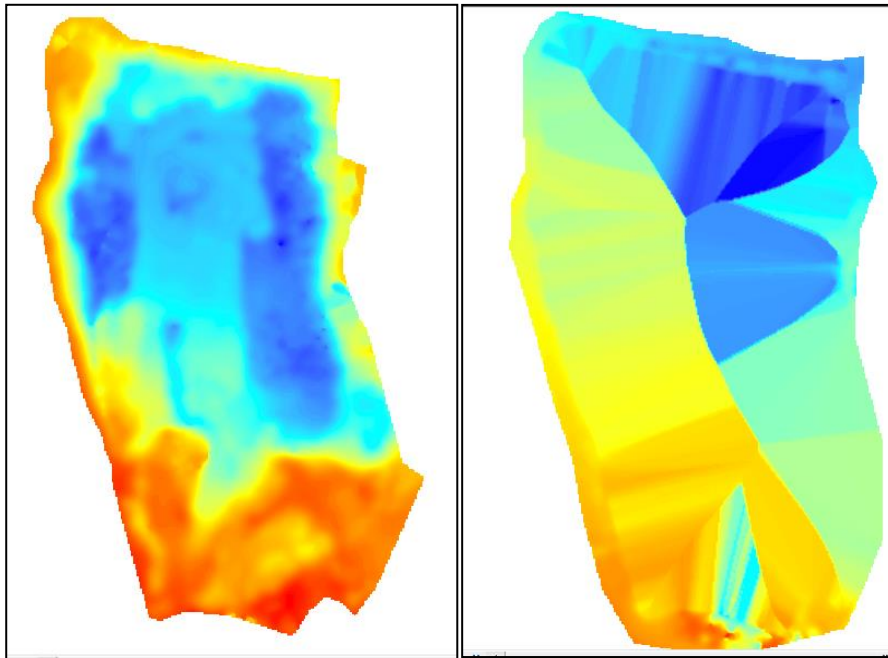


**Slika 34: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev(desno) iz podatkov MP, (interpolacija Navadni zleпки)**

#### b5) Radialne bazne funkcije - Multikvadratična funkcija

Multikvadratično funkcijo smo uporabili, ko smo naleteli na težave s preveliko količino podatkov. Nekatere metode so zato odpovedale, Multikvadratična funkcija pa se je dobro obnesla. Ker je funkcija ena od radialnih baznih funkcij, so nastavitve v orodju *Radial basis functions* enake, kot pri interpolaciji s funkcijo Navadni zleпки. V nastavitvi *Radial basis function* v spustnem seznamu izberemo *Multiquadric function* in ponovno nastavimo meje interpolacije. Zaradi zahtevnih izračunov interpolacijskih vrednosti je postopek izgradnje ploskve dolgotrajen in traja več ur.

Primer rezultatov je prikazan na Slika 35, kjer vidimo ploskev deponije in osnovno ploskev iz podatkov LGB, velikost gridne celice je 0,5 m. Ploskev je le na robu bolj nazobčana, kar je vedno težava pri večjih gridnih celicah, vendar je konfiguracija ploskve primerljiva z bolj natančnimi različicami. Rezultati so primerljivi s funkcijo Navadnih zlepkov, kar je razumljivo, saj so vsi pogoji in nastavitve enake, le radialna funkcija se spremeni v Multikvadratično. Lahko pa izpostavimo, da Multikvadratična funkcija tudi preseže maksimalne in minimalne vrednosti vzorčnih višin za 2 - 3 cm. Vzorčne višine predstavljajo minimalne in maksimalne vrednosti višin podanih točk. Rezultati so predstavljeni v grafikonih 1 in 2, na koncu poglavja in v prilogi A.



**Slika 35: Ploskev deponije(desno) in osnovna ploskev(levo) iz podatkov LGB, (interpolacija z Multikvadratično funkcijo)**

#### b6) Empirični Bayesov Kriging

V nalogi smo nameravali izvesti navadni Kriging, vendar so pri interpolaciji v programu ArcMap 10.2 nastale težave, saj je bila izhodna ploskev na nekaterih delih brez vrednosti. Luknjičasta ploskev je verjetno posledica prevelike količine podatkov, zato metoda odpove ali pa dobimo popačene rezultate. Kot alternativno možnost smo izbrali Empirični Bayesov Kriging.

Za interpolacijo smo uporabili orodje *Empirical Bayesian Kriging*, ki ga najdemo v vtičniku *Geostatistical analyst*. Začetne nastavitve se ne razlikujejo, pojasnjene so le naslednje posebnosti:

- *Data transformation type*: tip transformacije podatkov. Izbrali smo *None*, torej brez transformacije.

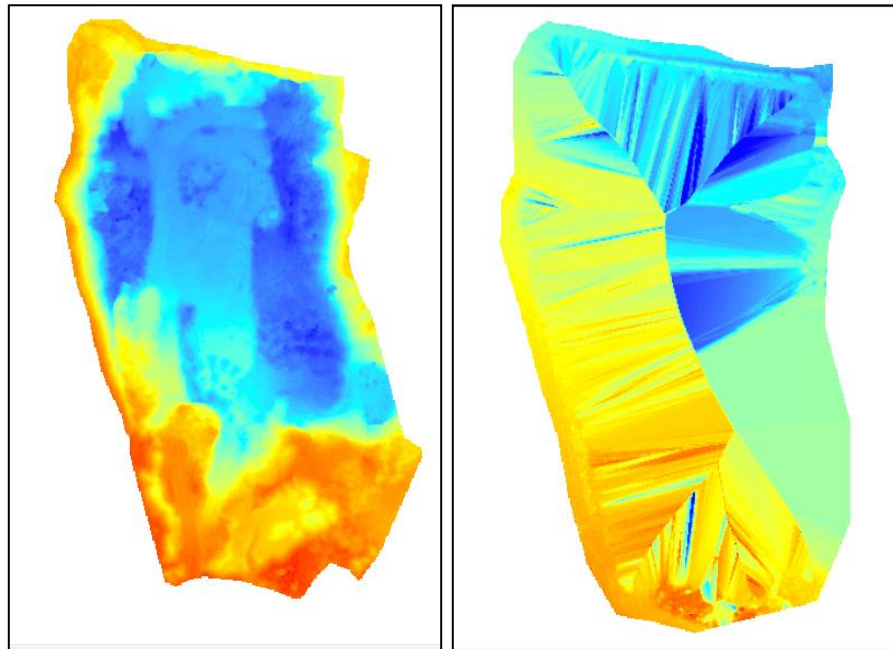
Additional model parameters - dodatni parametri modela:

- *Maximum number of points of each local model*: največje število točk za lokalni model je v našem primeru 100 točk.
- *Local model area overlap factor*: faktor prekrivanja lokalnih modelov oziroma podvzorcev je 1.
- *Number of simulated semivariograms*: število simuliranih semivariogramov, ki jih bo program uporabil za izbiro točk je 100. To nam omogoča, da program sam izbere semivariogram s pomočjo simulacij.

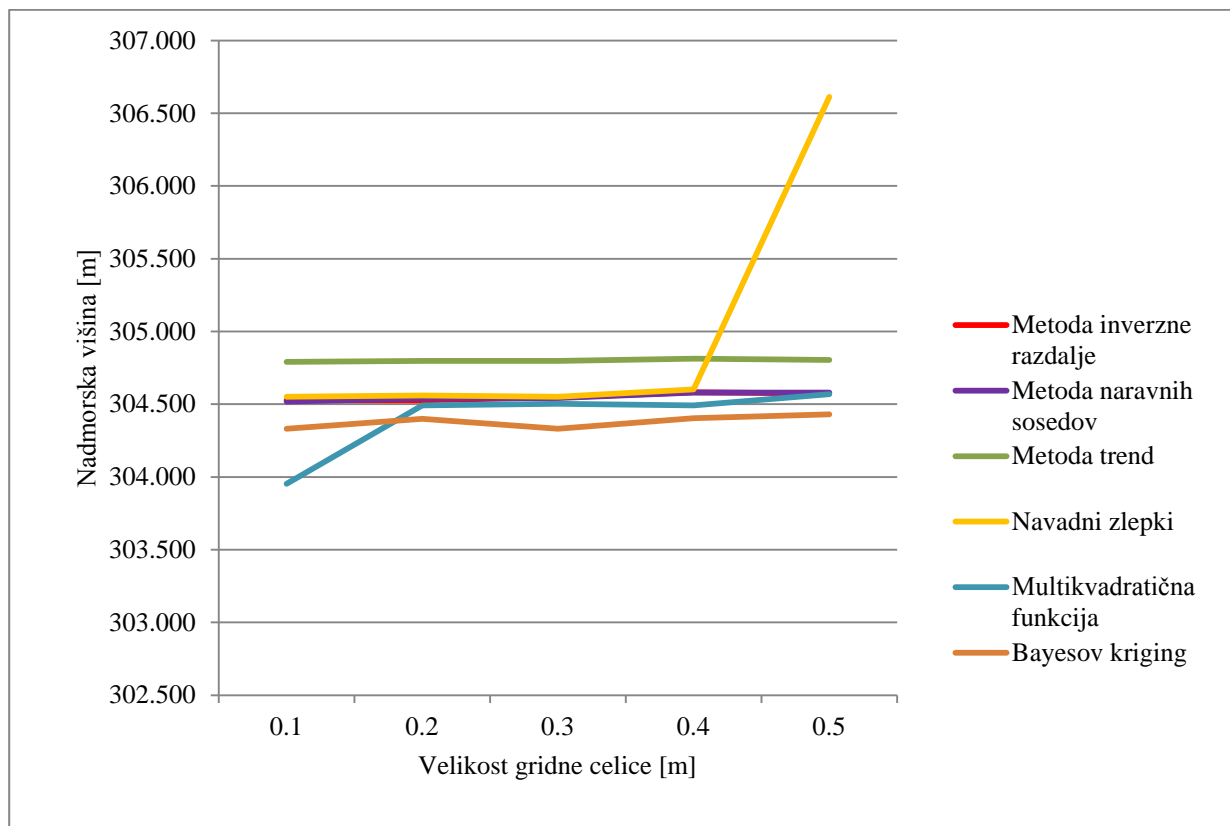
Search neighborhood parameters - parametri iskanja sosednjih točk za interpolacijo:

- *Search neighborhood*: soška iskanja točk za interpolacijo. Izbrali smo *Standard circular*-krožno iskanje,
- *Maximum neighbors*: največje število sosedov smo nastavili na 15,
- *Minimum neighbors*: najmanjše število sosedov smo izbrali 10.

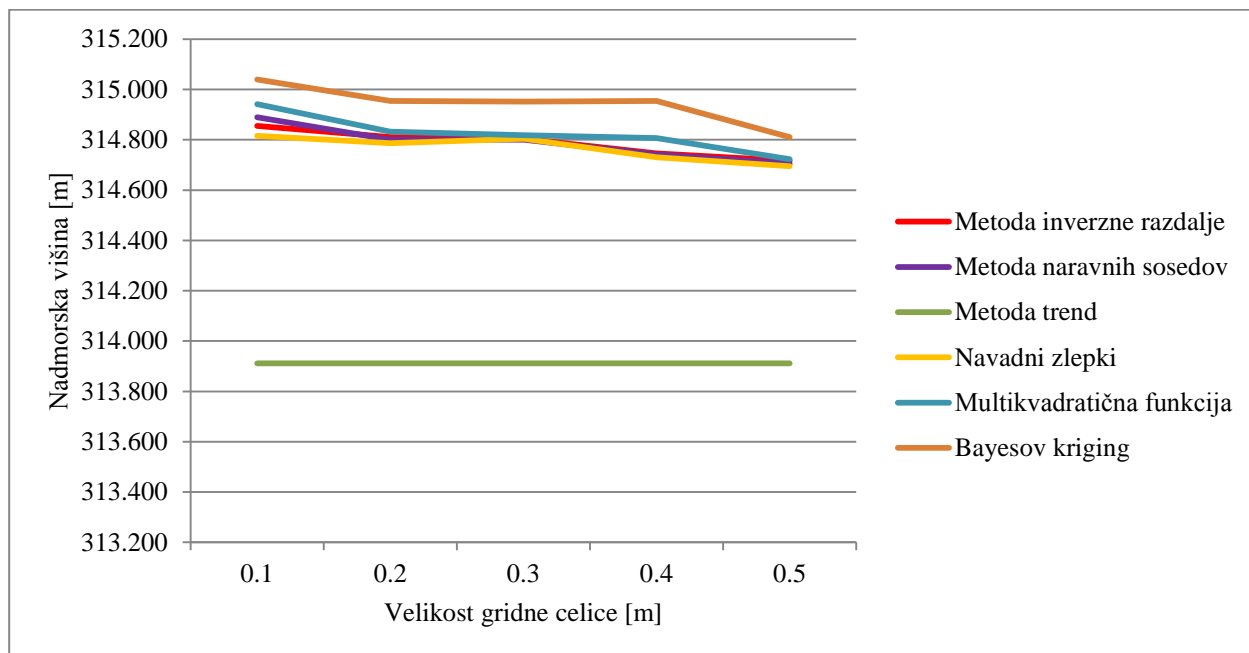
Drugi parametri so ostali nespremenjeni. Na Slika 36 je prikazan primer ploskve deponije in osnovne ploskve z interpolacijo Empirični Bayesov kriging. Velikost gridnih celic je 0,4 m. Konfiguracija ploskve deponije je primerljiva z ostalimi točnimi metodami. Vrednosti višin deponije ne odstopajo več kot 1 cm od vrednosti višin ostalih uporabljenih metod interpolacije. Rezultati so predstavljeni v grafikonih 1 in 2 in v prilogi A. Za razliko od ploskve deponije so vrednosti na osnovni ploskvi interpolirane v neke vrste pasovih zato je konfiguracija terena popačena, višine pa presegajo normalne vrednosti. Mejna vrednost odstopa od ostalih metod tudi do 3 m.



**Slika 36: Ploskev deponije (levo) in osnovna ploskev (desno) iz podatkov MP, (interpolacija Empirični Bayesov kriging)**



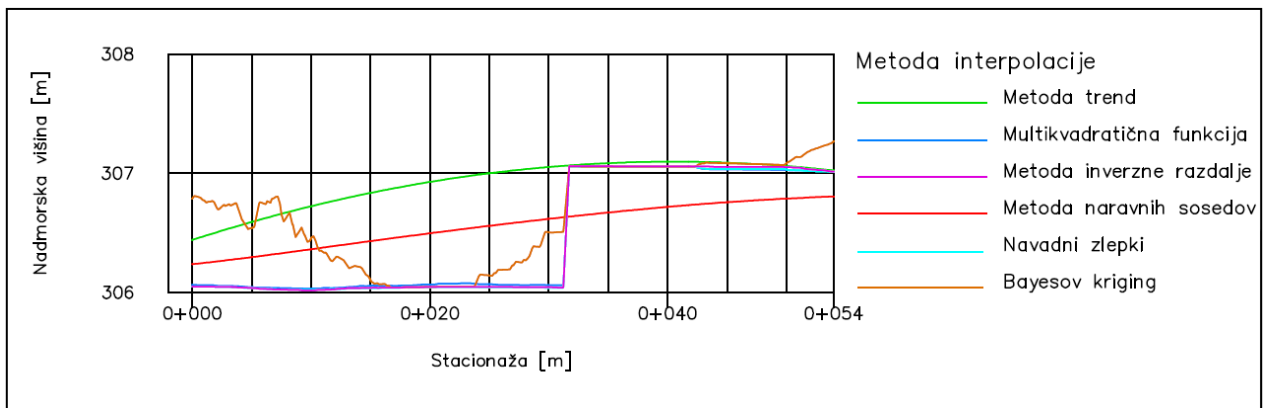
**Grafikon 1: Minimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP**



**Grafikon 2: Maksimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP**



Slika 37: Osnovna ploskev z vrisanim prečnim prerezom



Slika 38: Prečni prerez s prikazom poteka osnovnih ploskev MP ali LGB za vse metode interpolacij in velikost gridne celice 0,5 m

Na Slika 37 je prikazan prečni prerez. Uporabili smo ploskve vseh metod interpolacij za oba niza podatkov. Velikost gridne celice je 0,5 m. Prečni prerez je predstavljen na Slika 38 in prikazuje potek ploskev za različne interpolacije. Na Slika 38 vidimo, da je program, glede na izbrano interpolacijo tvoril skoraj enaki ploskvi za oba niza podatkov, torej za podatke MP in podatke LGB. Dobro je razvidno, da pri Metodi trend in Metodi naravnih sosedov ploskev poteka bolj gladko, brez večjih preskokov v višini. Pri ostalih metodah pa pride do preskoka na sredini ploskve, kjer ni bilo točk za interpolacijo. Metoda Bayesov kriging pa interpolira bolj nazobčano in razgibano ploskev.

### c) Izvoz datotek

Vse interpolirane ploskve, ki so rezultat šestih interpolacijskih metod, je bilo potrebno izvoziti v formatu, ki je primeren za nadaljnjo analizo v programu AutoCAD Civil 3D 2013.

Na začetku z desnim klikom na izbrani sloj izberemo opcijo *Data - export data*, odpre se okno za izvoz podatkov. Pomembno je, da nastavimo velikost celic (angl. cell size) na izvorno velikost interpolacije. Format datoteke je *Grid*, ime datoteke in mesto shranjevanja nastavimo po želji. Pomembno je, da vedno izberemo opcijo *Raster dataset*, tako omogočimo izvoz rastrskih podatkov. Na koncu še shranimo podatkovni sloj.

Pri izbiri ustreznega formata za izmenjavo med posameznimi programi, smo imeli veliko težav, saj je le malo formatov podprtih s strani ArcGis in AutoCAD programov. Na tem področju se velikokrat pokažejo pomanjkljivosti v programski opremi.

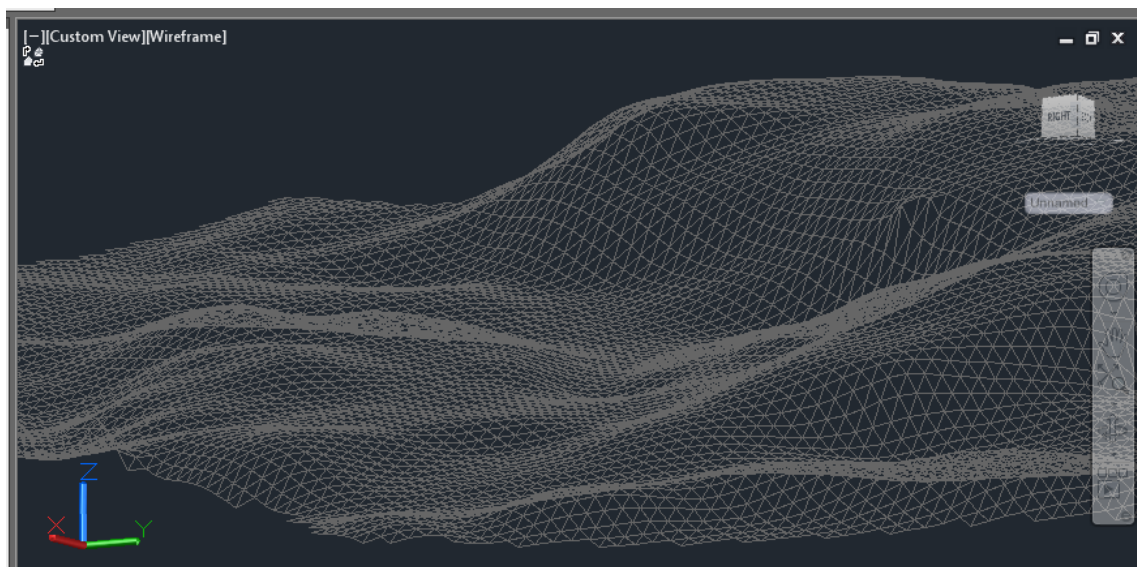


#### 4.4 Kreiranje ploskev v programu AutoCAD Civil 3D 2013

Kreiranje ploskev TIN smo opravili v programu AutoCAD Civil 3D 2013, ki se pogosto uporablja v gradbeništvu in geodeziji. Program ima vgrajena različna orodja za analize ploskev, zato je bil primeren za naše delo.

Večino ukazov v programu izvajamo v stolpičnem podmeniju *Toolspace*. V zavihku *Prospector* smo z desnim klikom na *Surfaces* izbrali *Create surface*. Odpre se okno kjer izberemo tip ploskve, ki je v našem primeru *TIN surface*, izberemo še ime ploskve ter način prikaza ploskve, ki je lahko s plastnicami, TIN mrežo, robom območja in drugo. Potrdimo z *OK* in dobimo prazno ploskev, kateri moramo še določiti točke, ki definirajo ploskev. V *Toolspace* izberemo svojo ploskev, nato *Definition* in kliknemo na *Point files*. Odpre se okno za dodajanje točk, kjer izberemo našo ASCII datoteko \*.xyz, obrezanega oblaka točk za območje deponije ali za območje osnovne ploskve. Rezultat je TIN ploskev za izbrano območje. Za dele izbranega območja, kjer zaradi šuma ni bilo točk, program interpolira vrednosti višin na podlagi zgostitve trikotnikov. Vsaka vrednost višine se interpolira na podlagi vrednosti oglišč trikotnika v katerem leži.

V program smo uvozili tudi vse ploskve določene z gridnimi celicami. Postopek je podoben kot je opisano zgoraj, vendar v tem primeru izberemo ukaz *Create surface from DEM* in izberemo določeno datoteko izbrane gridne ploskve iz programa ArcMap 10.2.



Slika 39: Prikaz TIN ploskve v AutoCAD Civil 3D 2013

## 4.5 Izračun prostornin v AutoCAD Civil 3D 2013

Izračun prostornin omogoča funkcija *Analyze/Volumes dashboard*. V pogovornem oknu najprej ustvarimo novo ploskev za izračun prostornin z ukazom *Create new volume surface*. Nastavimo še način določitve prostornine (angl. Type), ki je v našem primeru TIN ploskev ali pa gridna ploskev, saj bomo računali prostornino obeh tipov. Določimo osnovno ploskev (angl. Base surface) in primerjalno ploskev (angl. Comparison surface). Za izračun prostornine smo izbirali med vsemi ploskvami, ki smo jih opisali v poglavju 4.3. Če izberemo gridno ploskev, nastavimo še velikost gridnih celic. Vrednosti so enake interpoliranim velikostim celic. Kombinacija obeh ploskev mora sovpadati v velikosti gridnih celic in metodi interpolacije. V primeru, ko izberemo TIN ploskvi, samo potrdimo izbiro. Rezultat se prikaže v pogovornem oknu *Volumes dashboard*.

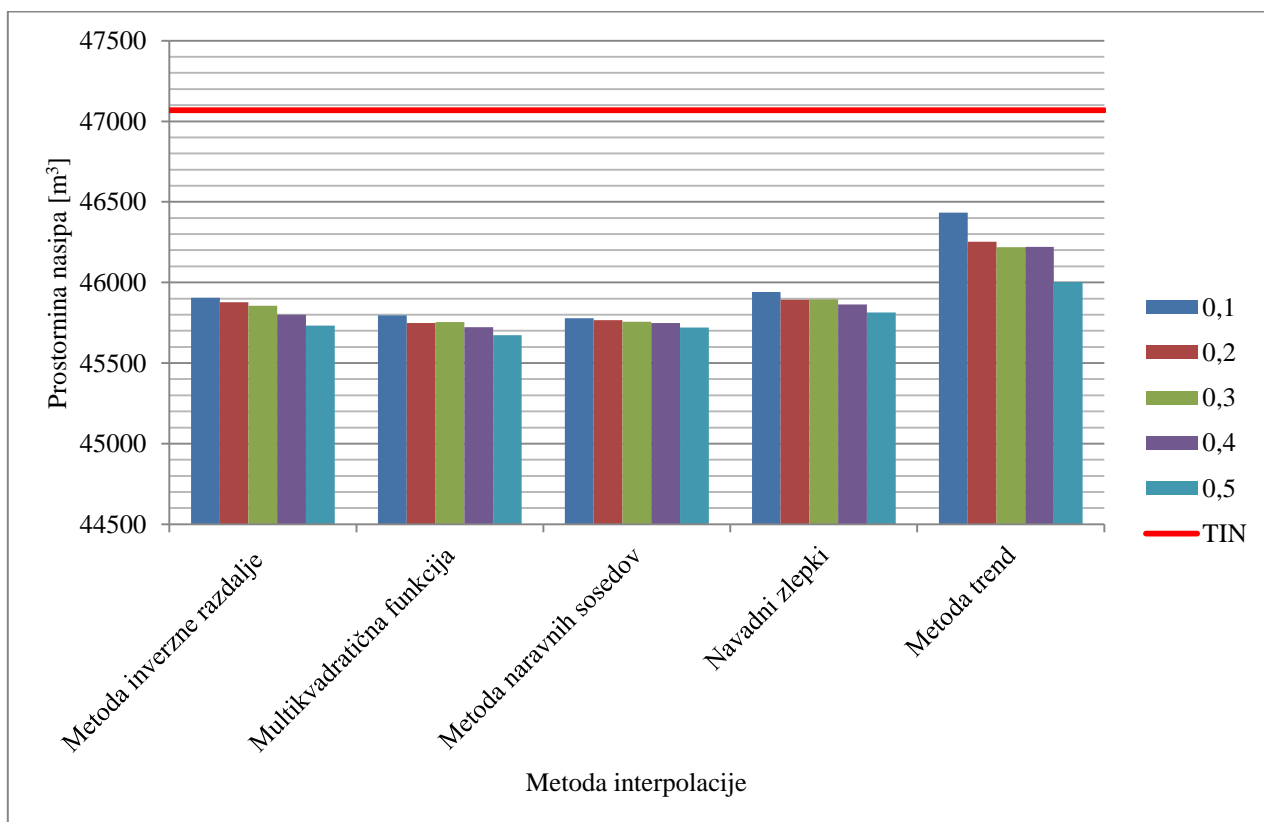
### 4.5.1 Analiza in vrednotenje rezultatov

Rezultati izračunov so prostornine nasipa deponije zemeljske mase, ki služi kot testno območje. V začetku rezultate razdelimo na dva dela, saj smo uporabili podatke dveh snemanj, zato imamo za vsak podatkovni sklop več rezultatov. Rezultate je smiselno definirati na podlagi referenčne prostornine. Metoda TIN je v programu AutoCAD Civil 3D zelo dobro definirana in s presekom trikotnikov omogoča, da se k celotni prostornini prištejejo tudi robni deli, ki so problematični. Ker metoda TIN najboljšo opisuje dejanski teren, bo prostornina iz TIN ploskev za vsak sklop podatkov služila kot referenčna prostornina.

Za vsako metodo interpolacije imamo torej 5 interpoliranih ploskev, ki so razvrščene glede na velikost gridne celice, skupaj 30 ploskev, ki jih primerjamo s prostornino metode TIN. Zaradi velike prostornine nasipa, je nesmiselno podajati rezultate z natančnostjo več kot  $1 \text{ m}^3$ . Prostornine smo razdelili po barvni lestvici glede na velikost gridne celice. Izračunana prostornina metode TIN ni odvisna od velikosti gridnih celic.

#### 4.5.1.1. Analiza prostornin deponije za podatke MODRI PLANET

Vrednost prostornine izračunane z metodo TIN znaša **47.069 m<sup>3</sup>** in je referenčna vrednost za ostale interpolacije. V splošnem velja, da lahko različne metode primerjamo med seboj, če rezultati ne odstopajo več kot **5%** od referenčne vrednosti. Cilj analize je, da primerjamo izračunane prostornine na osnovi interpoliranih ploskev, ki so dobljene z različnimi interpolacijskimi metodami in izberemo tri najboljše metode za nadaljnjo analizo. V raziskavo je bila vključena tudi Metoda Bayesov kriging, vendar je odstopanje rezultatov večje od 5%, zato smo jo eliminirali. Na grafikonu 3 so predstavljeni rezultati izračuna prostornin.



**Grafikon 3: Prostornina nasipa glede na metodo interpolacije za podatke MP**

Ugotovimo lahko, da se odstopanje od referenčne vrednosti veča z velikostjo gridnih celic, kar je povsem razumljivo, saj se z večanjem gridnih celic zmanjšajo podrobnosti interpoliranega površja. Odstopanje vrednosti prostornine postopoma raste, razen pri Metodi trend, kjer so večje razlike med posameznimi gridnimi celicami.

Če primerjamo vrednosti prostornin, lahko opazimo, da so vsi rezultati manjši od prostornine metode TIN. Rezultati Metode trend se najmanj razlikujejo od TIN metode, kar je presenetljivo, saj Metoda trend ne spada med točne interpolacijske metode. Sledijo Navadni zleпки. Največja prostornina slednje metode, je skoraj enaka najmanjši prostornini Metode trend, zato lahko rečemo, da so medsebojna odstopanja velika. Metoda inverzne razdalje je primerljiva z Metodo navadnih zlepkov. Najmanjše razlike za posamezno velikost celice dobimo z Metodo naravnih sosedov, prostornine se razlikujejo le za nekaj kubičnih metrov. Rezultati Multikvadratične funkcije se najbolj razlikujejo od referenčne vrednosti, vendar so razlike v primerjavi z Metodo naravnih sosedov minimalne.

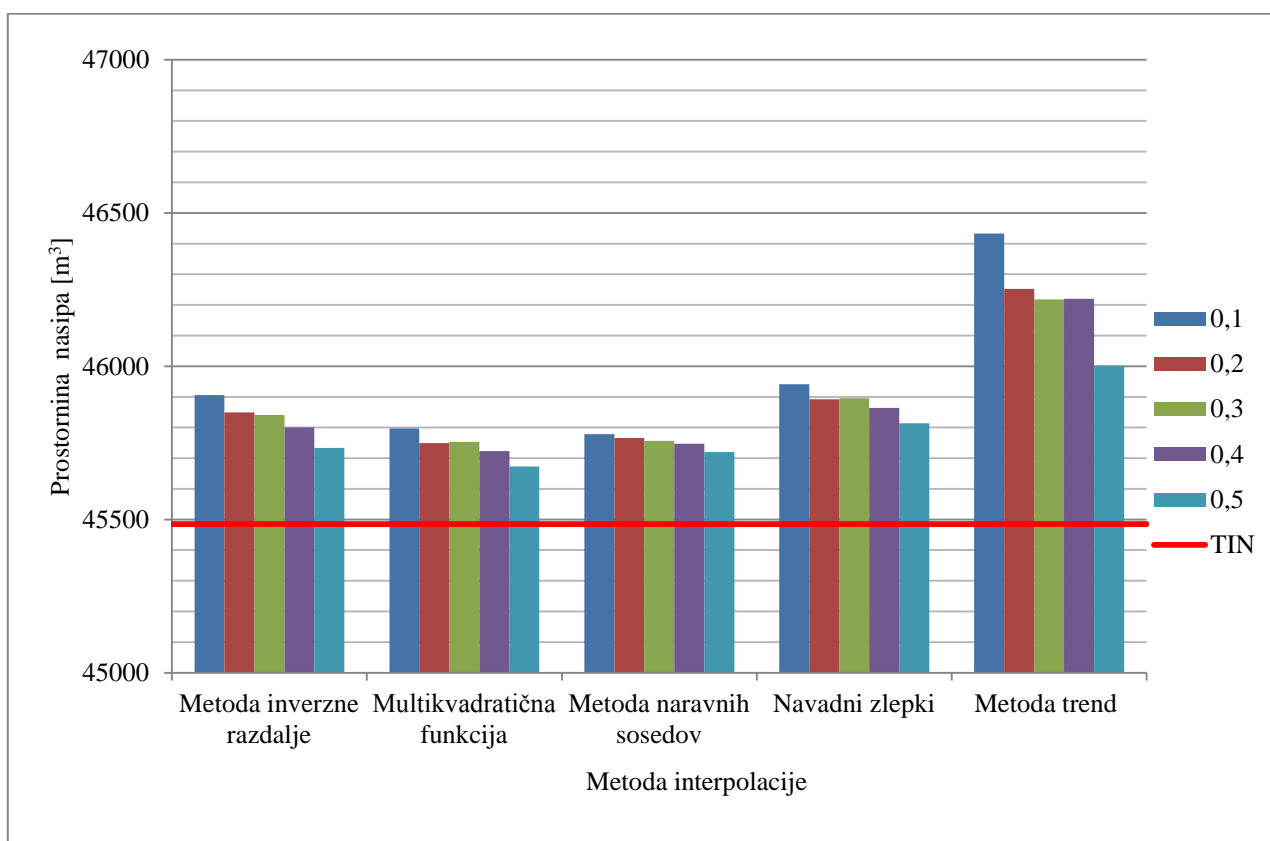
Po rezultatih sodeč lahko trdimo, da so rezultati Metode naravnih sosedov, Navadnih zlepkov, Metode inverzne razdalje in Multikvadratične funkcije primerljivi med seboj. Multikvadratična funkcija se je izkazala kot povsem primerljiva z Metodo naravnih sosedov. Izstopa predvsem Metoda trend, kjer je ploskev zelo poenostavljena vendar so rezultati najbolj primerljivi s TIN metodo. Za potrditev rezultatov bi morali narediti podrobnejše analize. To je zadosten argument, da smo jo izločili iz nadaljnje obravnave. Sledita Metoda inverzne razdalje in Navadni zleпки. Obe metodi sta dobro poznani in se pogosto uporabljata za interpolacijo točkovnih podatkov, zato je razumljivo, da so prostornine v rangu dovoljenega odstopanja od referenčne vrednosti prostornine.

Za nadaljnje analize, ko bomo dodali klasično merjene točke, smo izbrali:

- Metodo inverzne razdalje,
- Navadne zlepkve,
- Metodo naravnih sosedov.

#### 4.5.1.2. Analiza prostornin deponije za podatke LGB

Vrednost prostornine izračunane z metodo TIN znaša **45.485 m<sup>3</sup>** in je referenčna vrednost za ostale metode. Vrednost prostornine se za **1.584 m<sup>3</sup>** razlikuje od referenčne prostornine iz podatkov MP. Pogoji 5% velja tudi za podatke LGB. Ponovno smo izvedli primerjavo metod interpolacije z metodo TIN. Rezultati so predstavljeni na grafikonu 4.

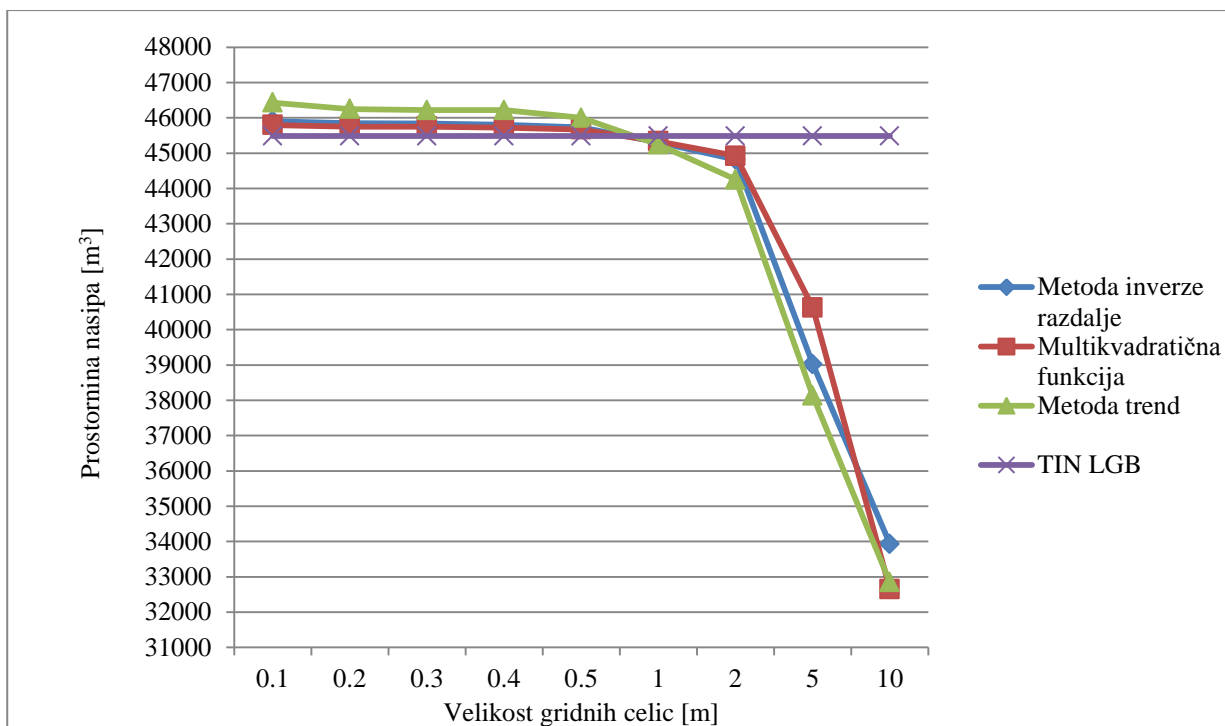


**Grafikon 4: Prostornina nasipa glede na metodo interpolacije za podatke LGB**

Vse vrednosti prostornin so višje od metode TIN. Dejansko se je spremenila le prostornina metode TIN. Rezultati ostalih metod so podobni kot pri oblaku točk MODRI PLANET. To pomeni, da kljub slabši ločljivosti (2 oz. 5 cm), ki sta posledice različnih višin leta (80 in 150 m), velikosti sensorja in ločljivosti fotoaparata, dobimo enako kakovostne podatke. Program za isti mejni poligon izvednoti višine na istih mestih. Vendar to ni vzrok za enakost vrednosti. Sklepamo lahko, da za obravnavan primer oz. tako geometrijsko obliko deponije ločljivost nima velikega vpliva. Kakovost obeh oblakov točk je kljub različni ločljivosti primerljiva. Ker je prostornina TIN manjša od ostalih, se z večanjem gridnih celic

prostornine bolj približujejo vrednosti TIN. Metoda trend se je v tem primeru izkazala za najmanj natančno, vrednosti za posamezne gridne celice pa zelo padajo. Najbolj podobna je Multikvadratična funkcija, sledi Metoda naravnih sosedov in kot tretja Metoda inverzne razdalje. Razlika prostornin se tako pojavi le pri TIN metodi, kar dokazuje, da smo uporabili različna sklopa podatkov.

Iz grafikona 5 je razvidno, da obstaja vpliv velikosti gridne celice na končni rezultat. Za analizo omenjenega vpliva smo za določene metode interpolacije naredili še izračun prostornin za večje gridne celice. Izbrali smo celice velikosti 1 m, 2 m, 5 m in 10 m. Med interpolacijami smo izbrali Multikvadratično funkcijo, kot metodo, ki se TIN najbolj približa, Metodo inverzne razdalje, kot tretjo najboljšo rešitev in Metodo trend, kot najslabšo rešitev. Rezultati so prikazani v grafikonu 5, skupaj z manjšimi gridnimi celicami.

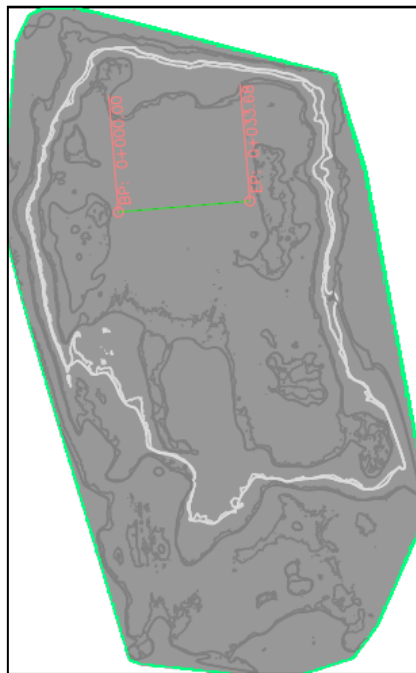


**Grafikon 5: Prostornina nasipa v odvisnosti od velikosti gridnih celic**

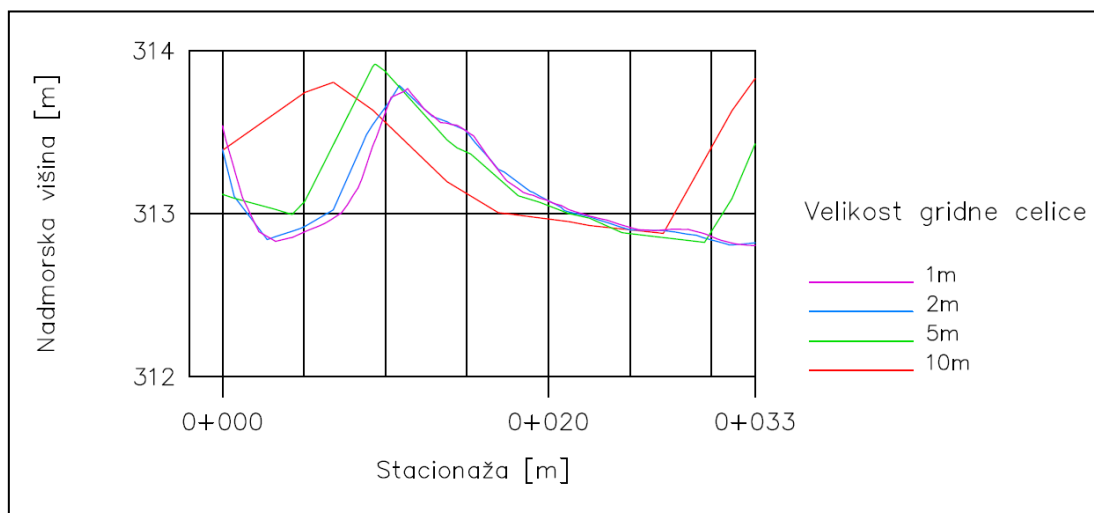
Ugotovimo lahko, da je pri manjši velikosti celic prostornina večja od TIN metode. Z večanjem celic, se rezultati približujejo prostornini TIN, do velikosti celic 0,5 m. Če bi izbrali gridne celice velikosti med 0,5 m in 1 m, bi bil rezultat najbližje referenčni vrednosti TIN, v določeni vrednosti pa enak. Ko nastavimo celice velikosti 2 m, je prostornina manjša od referenčne vrednosti in se nato strmo spušča do vrednosti med 32000 in 33000 m<sup>3</sup> za velikost celic 10 m. Iz ugotovitev lahko trdimo, da je vpliv velikosti gridne

celice velik, zato je izbira velikosti gridne celice zelo pomembna. Če izbiramo celice večje od 2 m, so odstopanja rezultatov večja od 5%, ki veljajo v dobri praksi.

Na Slika 40 so prikazane ploskve deponije interpolirane z Metodo inverzne razdalje, za podatke LGB z vrisanim prečnim prerezom. Na Slika 41 je prikazan potek ploskev, po prečnem profilu, pri različni velikosti gridnih celic. Pri velikosti gridne celice 1 m in 2 m, ni velikih odstopanj pri poteku ploskve, ko pa povečamo velikost celice na 5 m ali 10 m, nastanejo večja odstopanja pri poteku ploskve.



**Slika 40: Ploskve deponije za podatke LGB z vrisanim prečnim prerezom**



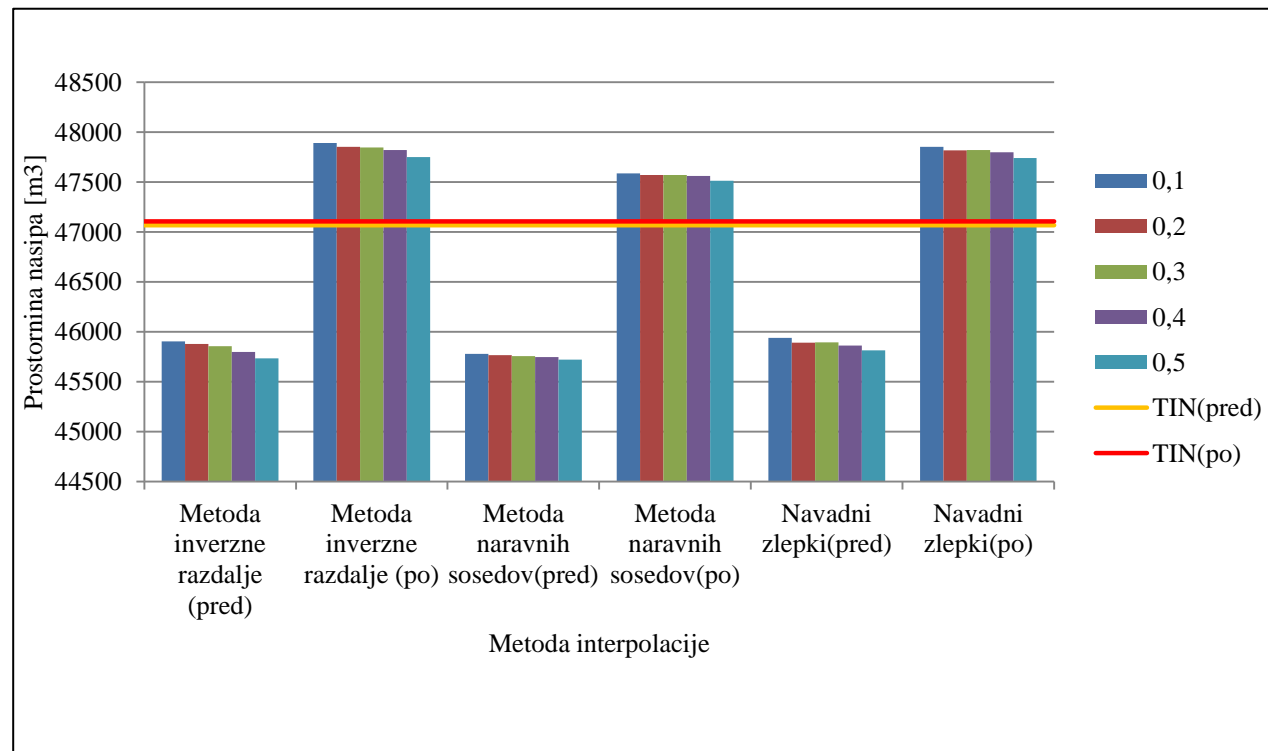
**Slika 41: Prečni prerez ploskev interpoliranih z Metodo inverzne razdalje**

#### 4.5.1.3. Oblaku točk dodamo klasično izmerjene detajlne točke terena

V obeh oblakih točk obstajajo območja, kjer je zelo malo točk, ali pa so celo prazna. To je posledica poraščenosti terena, saj smo na teh območjih v postopku filtriranja odstranili točke, ki predstavljajo šum. Z namenom, da bi izboljšali pokritost terena z merskimi podatki, smo v oba oblaka točk dodali še klasično posnete detajlne točke, ki so jih izmerili študentje. Sklepali smo namreč, da bomo tako dobili boljše definirane ploskve in s tem tudi boljše rezultate. Osredotočili smo se na tri interpolacijske metode, ki so se najbolj približale rezultatom metode TIN: Metodo inverzne razdalje, Navadne zlepk in Metodo naravnih sosedov.

Delo je potekalo v programu AutoCAD Civil 3D 2013, kjer lahko z enostavnimi ukazi dodamo točke v že obstoječi oblak točk. Nato smo ponovno izvedli interpolacije za vse velikosti gridov, le za zgoraj naštetih interpolacijskih metode. Postopek je enak, kot je opisano v poglavju 4.5. Ponovno smo izračunali prostornine deponije za vse gridne ploskve ter po metodi TIN. Primerjava rezultatov je predstavljena v grafikonih 6 in 7.

Podatki MP:

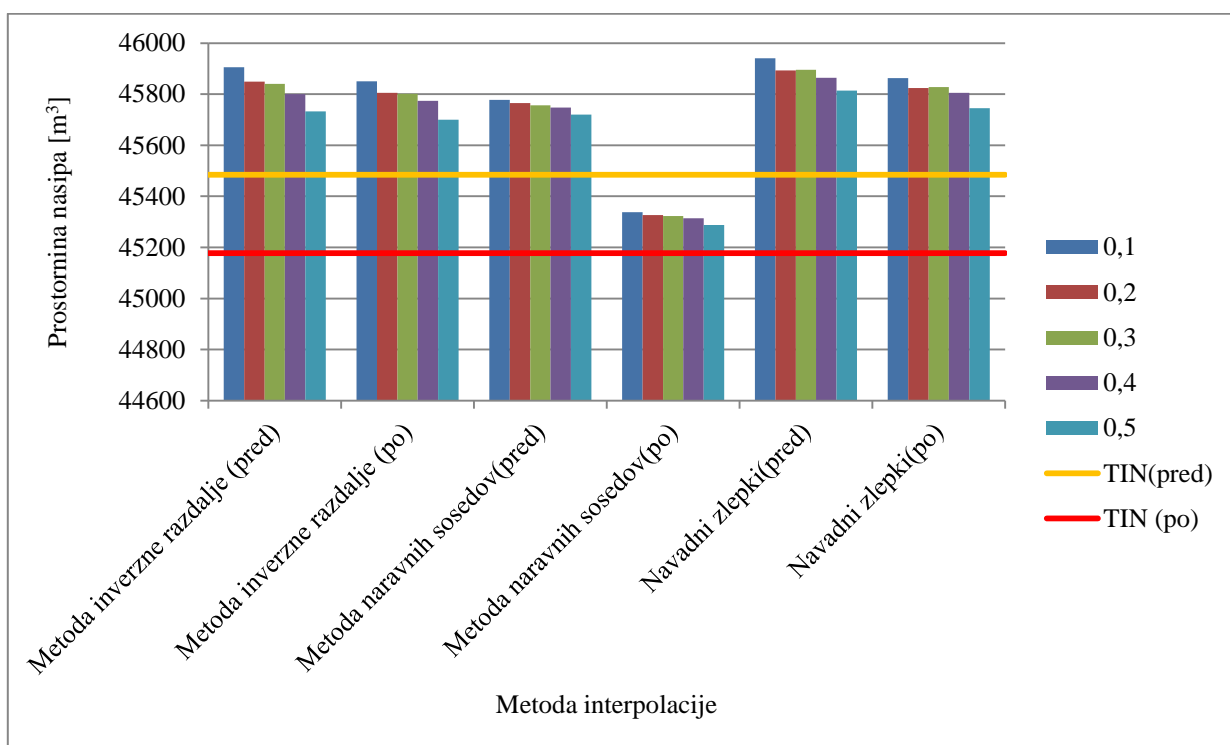


**Grafikon 6: Prostornine nasipa glede na izbrano metodo interpolacije - pred izboljšanjem podatkov MP in po izboljšanju**



Iz grafikona 6 je razvidno, kako so se vrednosti prostornin spremenile zaradi dodatnih točk. Razlika prostornin metode TIN je minimalna, kar dokazuje, da je metoda dobro definirana in da se trikotniki dobro prilegajo površju. Več težav prazna območja povzročijo interpolacijam gridnih ploskev. V vseh treh primerih, se je prostornina mnogo bolj približala TIN metodi, absolutne vrednosti, pa so se glede na stanje pred dodajanjem točk občutno spremenile. Razmerje prostornin, glede na velikost celice, se je ohranilo. Zanimivo je, da so vse interpolacije presegle vrednost prostornine TIN. Ob tem lahko trdimo, da z dodatnimi točkami, ki jih posnamemo na problematičnih območjih, izboljšamo natančnost oblaka točk. Tako dobimo boljše podatke za nadaljnjo uporabo in zmanjšamo velikost praznih območij v oblaku točk.

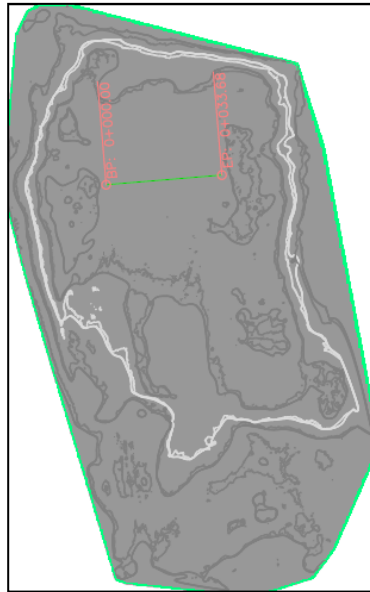
### Podatki LGB



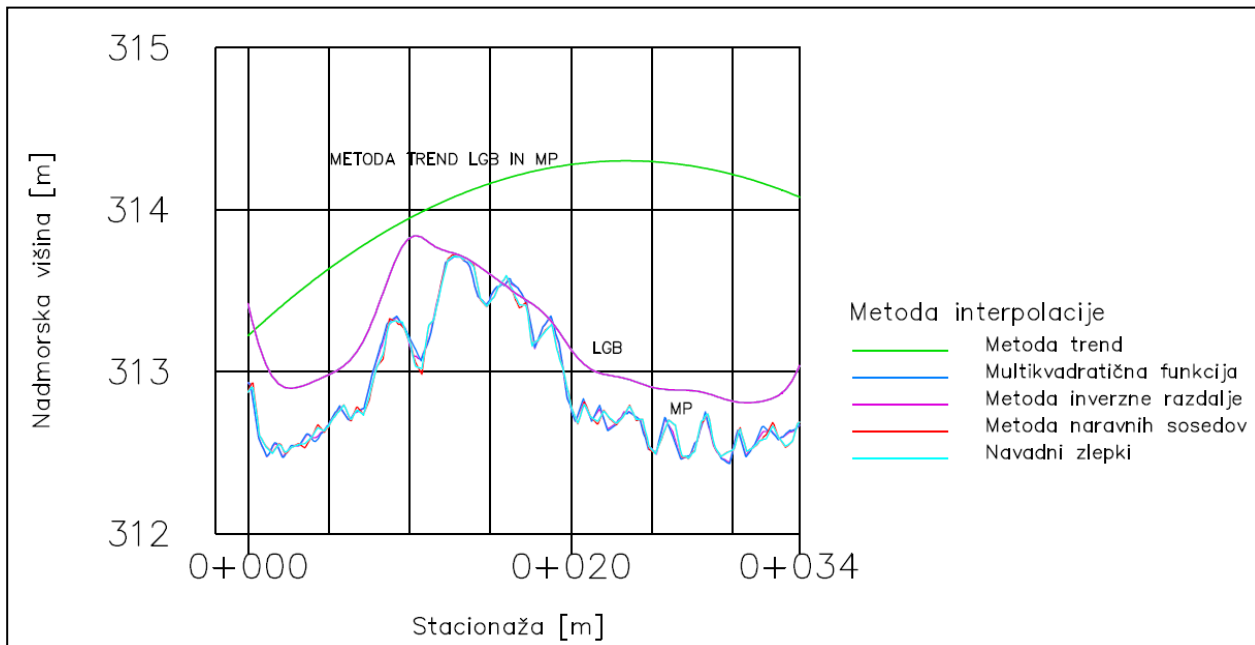
**Grafikon 7: Prostornine nasipa - pred izboljšanjem podatkov LGB in po izboljšanju**

Iz grafikona 7 je razvidno, da so se tudi v tem primeru vrednosti prostornin spremenile. Za razliko od podatkov MP, se vrednosti v vseh primerih zmanjšajo. Če se osredotočimo na TIN metodo, je vrednost manjša za nekaj  $100 \text{ m}^3$ , kar je več v primerjavi z vrednostjo TIN za podatke MP. Razlike za ostale interpolacije so neprimerno manjše, kot za podatke MP. Izstopa Metoda naravnih sosedov, kar je razvidno iz grafikona 7.

Zadnja grafikona kažeta, da gre morebiti za neskladnost v vertikalnem datumu med posameznima nizoma podatkov, zato smo v AutoCAD Civil 3D 2013 izvedli dodatno primerjavo, ki bi lahko potrdila naše domneve. Na Slika 42 je vrisan prečni prerez ploskve deponije obeh nizov podatkov. Podroben potek prečnega prereza je prikazan na Slika 43, uporabljena je bila velikost gridne celice 0,4 m.

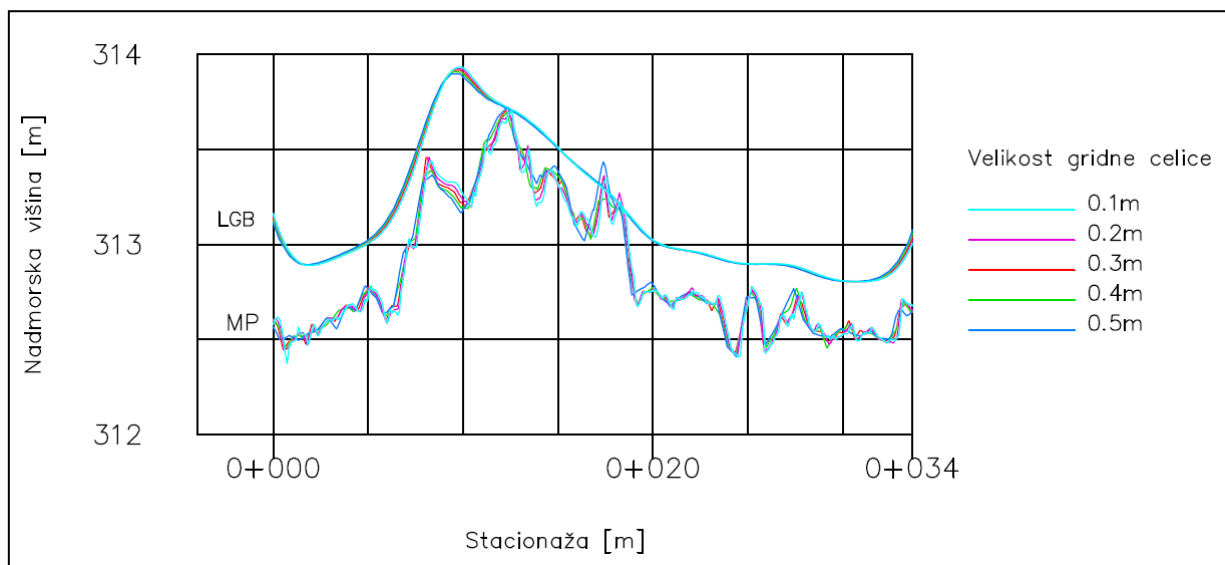


Slika 42: Ploskve deponije z vrisanim prečnim prerezom



Slika 43: Prečni prerez ploskev deponije za oba niza podatkov za velikosti gridne celice 0,4 m

Na prerezu je razviden prečni profil za različne metode interpolacije (Slika 43). Vidimo da ni večjih odstopanj med posameznimi metodami interpolacij, izstopa le Metoda trend. Pojavljajo pa se odstopanja v vertikalnem datumu med obema nizoma podatkov. Vse ploskve, za podatkovni niz LGB ležijo višje od ploskev za podatkovni niz MP, višinska razlika med obema nizoma podatkov znaša do 0,5 m. Izvzamemo lahko le ploskvi Metode trend, ki popolnoma odstopata od drugih ploskev in sta povsem enaki. S tem lahko potrdimo, da je prišlo do odstopanj v višinskem datumu med obema nizoma podatkov. Pomemben podatek je, da so pri snemanju z letalnikom LGB uporabili le 4 oslonilne točke podjetja MP, kar bi lahko vplivalo na spremembo višinskega datuma. Na koncu smo v prečni prerez (Slika 42) dodali ploskve obeh nizov podatkov, pridobljene z Metodo naravnih sosedov. Rezultati so predstavljeni na Slika 44. Potrdimo lahko, da prihaja do odstopanja v višinskem datumu med obema nizoma podatkov. Dodatno pa lahko rečemo, da velikost gridnih celic nima velikega vpliva na potek ploskve. Uporabili smo različne velikosti celic, iz Slika 44 pa je razvidno, da ni večjih odstopanj med prečnimi profili ploskev različnih dimenzij gridnih celic.



**Slika 44: Prečni prerez ploskev deponije Metoda naravnih sosedov za oba niza podatkov**

AutoCAD Civil 3D 2013 ima težave in pri tvorjenju grida, saj v izračun vključi le cele gridne celice, prizem in kvadrov, ki ostanejo na robovih pa ne. Odločili smo se, da ocenimo razliko med pravo vrednostjo prostornine, če upoštevamo tudi te manjše izpuščene dele in prostornino, ki smo jo izračunali direktno z uporabo funkcije v programu. V ta namen smo izračunali delne prostornine v teh obrobni predelih. Izračun smo izvedli tako, da smo velikost gridne celice nastavili na 1 cm. Dobili smo rezultat, ki znaša  $3,26 \text{ m}^3$ . Rezultat ni popoln, saj na zahodni strani ni bilo dovolj točk za izvedbo interpolacije. S tem lahko potrdimo, da obstaja razlika v prostorninah zaradi obrobni območij, vendar nimamo zadostnih podatkov, da bi lahko v celoti izračunali dejansko razliko. Ta na celotno vrednost prostornine sicer ne bi imela večjega vpliva, saj je razlika od dejanske vrednosti le do nekaj sto kubičnih metrov in ni večja od 5% dejanske prostornine, kar smo opredelili kot pogoj.

## 5. ZAKLJUČEK

Kot izhodišče raziskave sta nam služila oblaka točk, ki sta jih s svojima brezpilotnima letalnikoma posneli podjetji MODRI PLANET, družba za tehnološki razvoj, zajemanje in obdelavo podatkov, d.o.o. in LGB, geodetski inženiring in informacijske tehnologije, d.o.o. Oblaka smo obrezali, naredili pred obdelavo in oblak točk razdelili na območje osnovne in primerjalne ploskve. Izvedli smo različne vrste interpolacij za oba tipa ploskve iz gridnih celic različnih dimenzij. Iz oblaka točk smo kreirali TIN ploskev in izračunali prostornino deponiranega materiala. Ta vrednost je predstavljala referenčno vrednost pri analizi rezultatov izračunov prostornin iz gridnih celic (0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m), dobljenih z različnimi metodami interpolacij (Metoda naravnih sosedov, Metoda inverzne razdalje, Multikvadratična funkcija, Navadni zlepci, Bayesov kriging) .

Zajem terena ni bil opravljen pod istimi pogoji, tudi obdelava oblaka točk in filtriranje podatkov je bilo opravljeno v različnih programskih paketih. Pričakovali smo, da bo za posamezno metodo interpolacije in velikostjo gridne celice prišlo do manjših razlik v izračunani prostornini. Prostornina deponiranega materiala za podatke MP, izračunane z metodo TIN znaša  $47.069 \text{ m}^3$ , prostornina za podatke LGB izračunane z metodo TIN znaša pa je manjša za  $1.584 \text{ m}^3$ . Ti dve vrednosti prostornin sta predstavljali referenčno vrednost pri analizi rezultatov izračunov prostornin iz ploskev z različno velikostjo gridnih celic, dobljenih z različnimi metodami interpolacij. Rezultati so pokazali, da se prostornine posameznih metod interpolacije razlikujejo od referenčne vrednosti, a ne za več kot 5%. Ko smo primerjali oba niza podatkov med seboj, smo ugotovili, da je razlika le v prostornini izračunani z metodo TIN. Ker smo za izračun prostornine uporabili različne velikosti gridnih celic, smo analizirali tudi vpliv spreminjanja velikosti gridne celice na vrednost izračunane prostornine. V ta namen smo za izračun prostornin dodatno uporabili tudi večje gridne celice (1 m, 2 m, 5 m, 10 m). Iz rezultatov lahko ugotovimo, da je vpliv velikosti gridne celice velik, zato je izbira velikosti gridne celice zelo pomembna. Če izbiramo celice večje od 2 m, so odstopanja rezultatov večja od 5%. Primerjava rezultatov pokaže, da sta obravnavana oblaka, kljub različnemu snemalnemu sistemu, različnim pogojem v času snemanja ter različni programski opremi za obdelavo oblaka točk, primerljive kakovosti.

Izračunane količine smo primerjali tudi s prostornino deponije na osnovi posnetih detajlnih točk klasične geodetske izmere. Zanimalo nas je, če vključitev teh točk v oblaka točk brezpilotnih plovil kaj vpliva na izračun. Trem izbranim interpolacijam, kjer so se izračunane prostornine najbolj približale vrednosti iz TIN (Metoda inverzne razdalje, Navadni zleпки, Metoda naravnih sosedov), smo dodali še klasično posnete detajlne točke in ponovili izračun prostornin. Rezultati so pokazali, da se vrednost prostornine za posamezne interpolacije spremenila in bolj približala prostornini metode TIN. Do večjih absolutnih razlik v prostornini je prišlo na nizu podatkov MP, kjer se je prostornina spremenila tudi do okoli  $1300 \text{ m}^3$ , ali 2,83%. Pri podatkih LGB ni prišlo do večjih sprememb, le pri metodi TIN je prišlo do razlike v prostornini za okoli  $300 \text{ m}^3$ , ali 0,67%. Velike razlike na podatkih MP kažejo, da gre morebiti za neskladnost v vertikalnem datumu med posameznima nizoma podatkov. V ta namen smo naredili prečne profile osnovne ploskve in ploskve deponije za oba niza podatkov. S potekom ploskev skozi prečni profil smo potrdili domnevo, da prihaja do neskladnosti v vertikalnem datumu med posameznima nizoma podatkov. Po analizi prečnih profilov na vrhu deponije smo ugotovili, da vse ploskve, za podatkovni niz LGB ležijo višje od ploskev za podatkovni niz MP. Na prečnem prerezu ploskve LGB dosegajo nadmorske višine od 313,15 m do 313,90 m, ploskve MP pa nadmorske višine od 312,60 m do 313,70 m. Višinska razlika med obema nizoma podatkov znaša do 0,55 m na vrhu deponije. Vzrok za to je lahko tudi v uporabljenih algoritmih za izračun točk s slikovnim ujemanjem. Iz poteka prečnega profila smo dodatno ugotovili, da velikost gridnih celic nima velikega vpliva na potek ploskve. Uporabili smo različne velikosti celic, vendar ni večjih odstopanj med potekom ploskev različnih dimenzij gridnih celic, do velikosti 1 m. Ob tem lahko trdimo, da z dodatnimi točkami, ki jih posnamemo na problematičnih območjih, izboljšamo natančnost oblaka točk. Tako dobimo boljše podatke za nadaljnjo uporabo in zmanjšamo velikost praznih območij v oblaku točk

Program AutoCAD Civil 3D pri izračunu prostornine iz gridnih točk v izračun vključi le cele gridne celice, prizem in kvadrov, ki ostanejo na robovih pa ne. Naredili smo oceno razlike med pravo vrednostjo prostornine, če upoštevamo manjše izpuščene dele in prostornino, ki smo jo izračunali direktno z uporabo funkcije v programu. Velikost gridne celice smo nastavili na 1 cm in izvedli izračun. Prostornine so se na delu obravnavanega območje razlikovale le za  $3,26 \text{ m}^3$ . Rezultat ni popoln, saj na zahodni strani ni bilo dovolj točk za izvedbo interpolacije. S tem smo potrdili, da obstaja razlika v prostorninah zaradi obrobni območij, vendar nimamo zadostnih podatkov, da bi lahko v celoti izračunali dejansko razliko. Vsekakor pa je v našem primeru razlika zanemarljivo majhna.

Na osnovi analize rezultatov smo ugotovili, da so rezultati Metode z inverzno razdaljo in obeh metod radialnih baznih funkcij primerljivi. Multikvadratična metoda se je pri obravnavanem primeru izkazala za učinkovito. Gridna ploskev Metode naravnih sosedov je zelo podobna kot Multikvadratična metoda. Metoda trend je že v teoriji globalna interpolacijska metoda, zato so dobljeni rezultati (največje odstopanje od TIN je  $900 \text{ m}^3$ , od ostalih metod okoli  $500 \text{ m}^3$ ) pričakovani, saj ne spada med točne metode. Ploskve Metode trend so zelo poenostavljene in v primeru izračuna prostornin geometrijskih oblik, kot je obravnavana deponija, niso prava izbira za ponazoritev površja. Empirični Bayesov Kriging je zelo uporabna metoda v smislu, da nam ni treba nastavljanje vrste semivariograma, ki predstavlja prostorsko korelacijo merjenih vzorčnih točk. Opozoriti je potrebno, da metode, kot sta Kriging in Navadni zleпки, kot samostojni metodi, ne delujeta za velike količine podatkov. To se je izkazalo tudi v našem primeru. Za uporabo teh metod bo potrebno še nekaj dela razvijalcev programske opreme, da bodo dosegli hitro in učinkovito obdelavo večjih količin podatkov. Ker se v geodetski stroki vedno v večji meri pojavljajo podatki v obliki oblakov točk, je pomembno, da tudi programska oprema sledi temu trendu.

Zajem z letalniki lahko v nekaterih primerih predstavlja prednost pred klasičnimi metodami geodetske izmere, ker omogoča hiter zajem območij in veliko pokritost s točkami. Klasične geodetske metode pa so nam v pomoč, saj lahko z njimi izboljšamo kakovost podatkov zajema z letalniki.

## VIRI

Aš, V., 2008. Vplivi metod interpolacije in glajenja na geometrično natančnost ploskev iz lidarskih podatkov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Aš): 66 str.

Bitenc, M. 2014. Geodetski vestnik 58/2014: 155-158.

Bobnar, S., Drobne, S., Šumrada, R. 2005. Priročnik za vaje iz prostorskih analiz v GIS-orodju ArcGIS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Chenoweth, M., 2009. A Numerical Study of Generalized Multiquadric Radial Basis Function Interpolation.

<https://www.siam.org/students/siuro/vol2issue2/S01040.pdf> (Pridobljeno 10. 2. 2014.)

Geopedia 2014.

[http://www.geopedia.si/#T105\\_x466376\\_y104136\\_s13\\_b4](http://www.geopedia.si/#T105_x466376_y104136_s13_b4) (Pridobljeno 21. 1. 2014.)

Hartman, J. 2008. Različni pristopi k izdelavi popolnega ortofota. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Hartman): 61 str.

Hrvacki, K. 2013. Terenska izmera 2. letnika magistrskega študija Geodezije in geoinformatike, v okviru vaj pri predmetu Geodezija v inženirstvu 2.

Koler B., Breznikar A. 2009. Inženirska geodezija - gradivo za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke.

Li, Z., Zhu, Q., Gold C. 2005. Digital Terrain Modeling - Principles and Methodology: 36-39, 115-116,

Owen, S. J. 1993. Subsurface Characterization with Three-Dimensional Natural Neighbor Interpolation.

<http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/natneigh/index.html> (Pridobljeno 3. 2. 2014.)

Pajtler, A. 2013. Terenska izmera 2. letnika magistrskega študija Geodezije in geoinformatike, v okviru vaj pri predmetu Geodezija v inženirstvu 2.



Peterman, V., Mesarič, M. 2012. Land survey from unmaned aerial veichle. XXII ISPRS Congress 2012. Melbourne, Australia.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B1/447/2012/isprsarchives-XXXIX-B1-447-2012.pdf> (Pridobljeno 21. 1. 2014.)

Podobnikar, T. 2001. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Podobnikar.)

Program ArcGis 10.2 - help, 2014a. How radial basis functions works.

Program ArcGis 10.2 - help, 2014b. How spline works.

Program ArcGis 10.2 - help, 2014c. How empirical bayesian kriging works.

Ramos, G. A. 2001. Scattered Data Interpolation Using an Alternate Differential Equation Interpolant. <http://www.dgp.toronto.edu/~bonzo/docs/MyThesis.pdf> (Pridobljeno 29. 1. 2014.)

Ridić, M. 2012. Izdelava in ocena kakovosti popolnega ortofota. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Ridić): 69 str.

Schofield, W., Breach, M. 2007. Engineering Surveying.

SenseFly 2014

<https://www.sensefly.com/drones/ebee.html> (Pridobljeno 22. 1. 2014.)

Sukumar, N. 1997. A Note on Natural Neighbor Interpolation and the Natural Element. Method (NEM). [http://dilbert.engr.ucdavis.edu/~suku/nem/nem\\_intro/node3.html](http://dilbert.engr.ucdavis.edu/~suku/nem/nem_intro/node3.html) (Pridobljeno 3. 2. 2014.)

Surveydrawing. 2014.

<http://www.surveydrawing.net/volume-calculation-contour-method-average-prismoidal.html>  
(Pridobljeno 10. 4. 2014.)

Šumrada, R. 2005. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Wikipedija 2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/PLY\\_%28file\\_format%29](http://en.wikipedia.org/wiki/PLY_%28file_format%29) (Pridobljeno 7. 4. 2014.)

## **KAZALO PRILOG:**

### **PRILOGA A: GRAFIKONI VIŠINSKIH RAZLIK**

PRILOGA A.1: Minimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP.

PRILOGA A.2: Maksimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP.

PRILOGA A.3: Minimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.

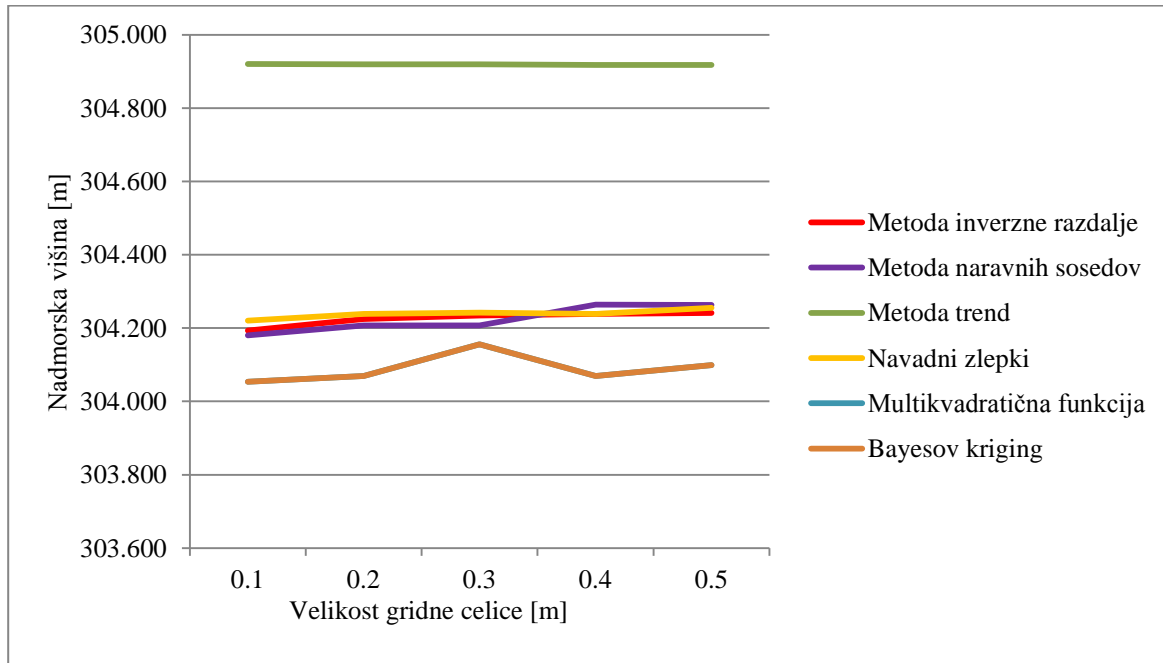
PRILOGA A.4: Maksimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.

PRILOGA A.5: Minimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.

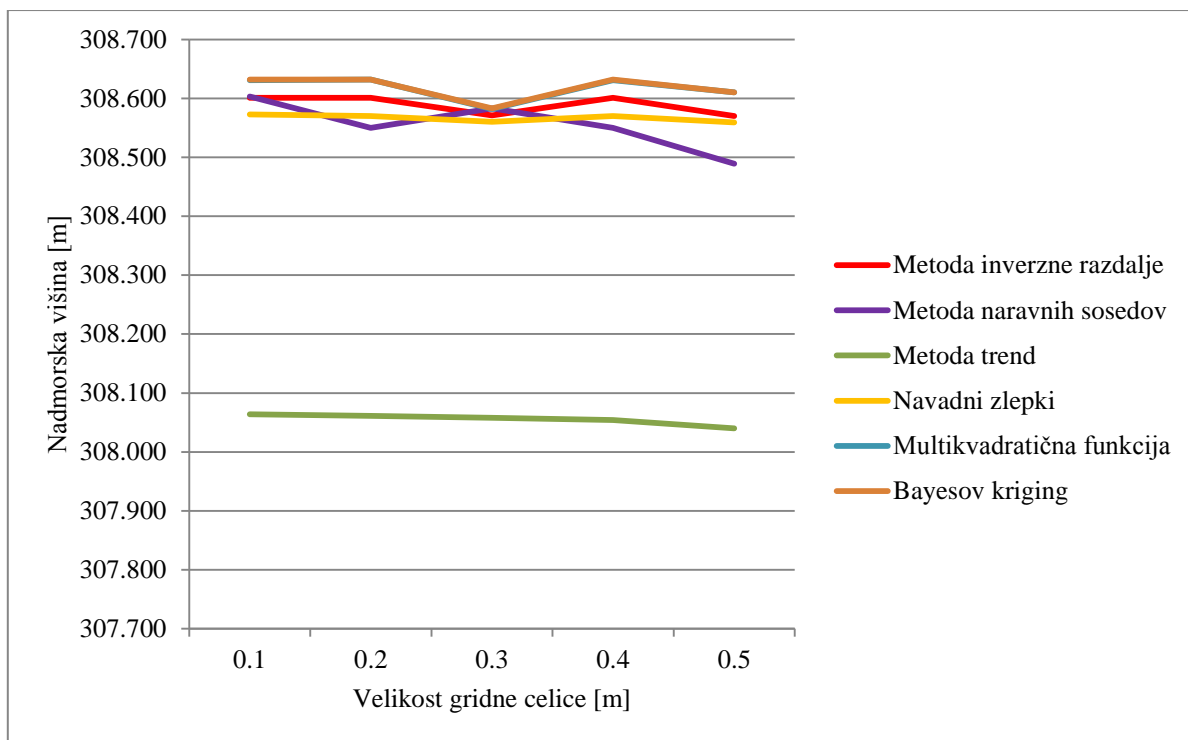
PRILOGA A.6: Maksimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.

## PRILOGA A: GRAFIKONI VIŠINSKIH RAZLIK

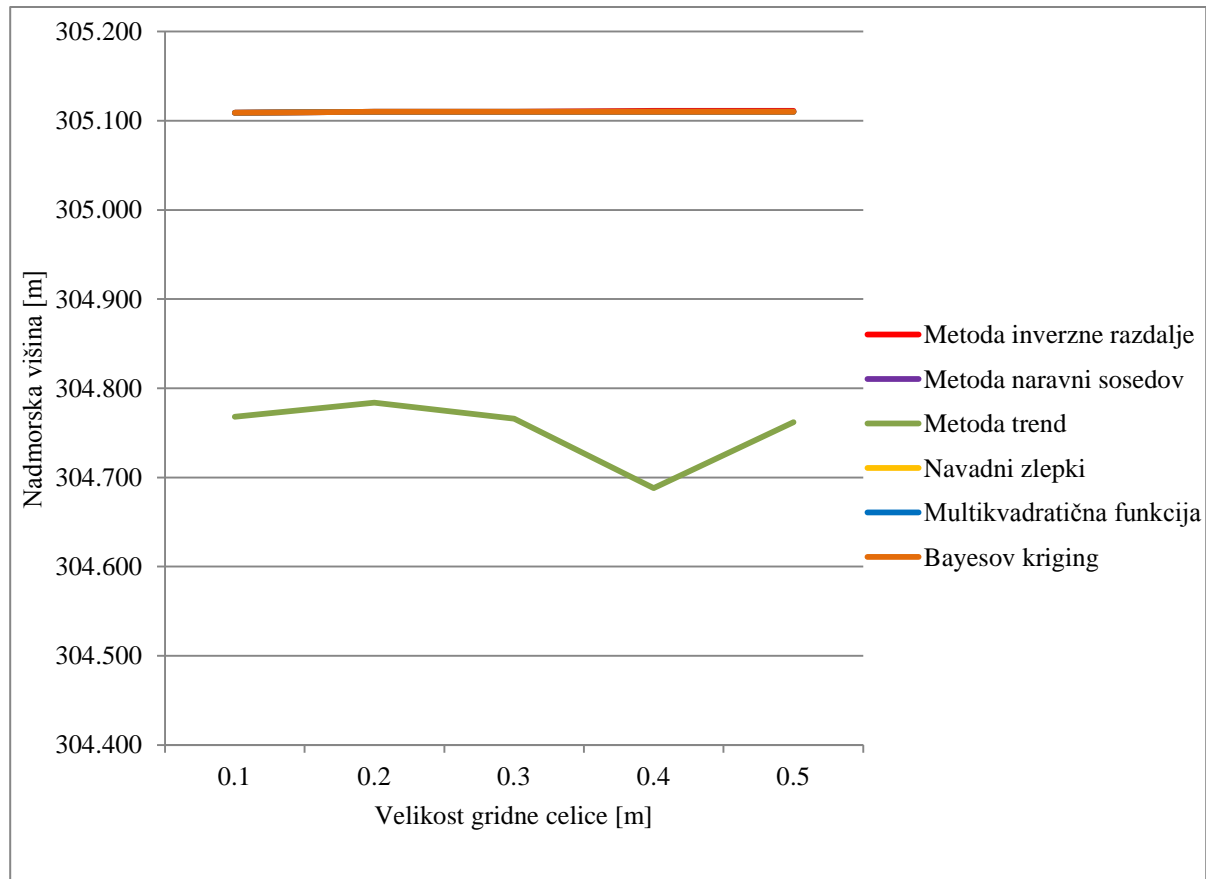
PRILOGA A.1: Minimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP.



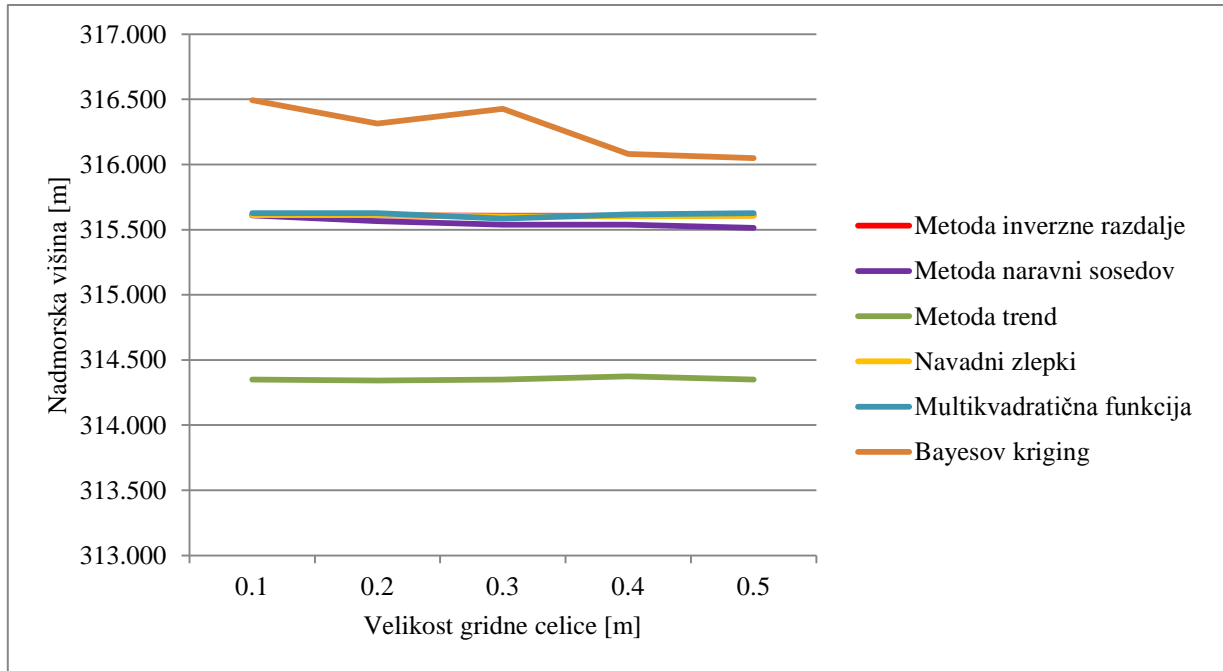
PRILOGA A.2: Maksimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke MP.



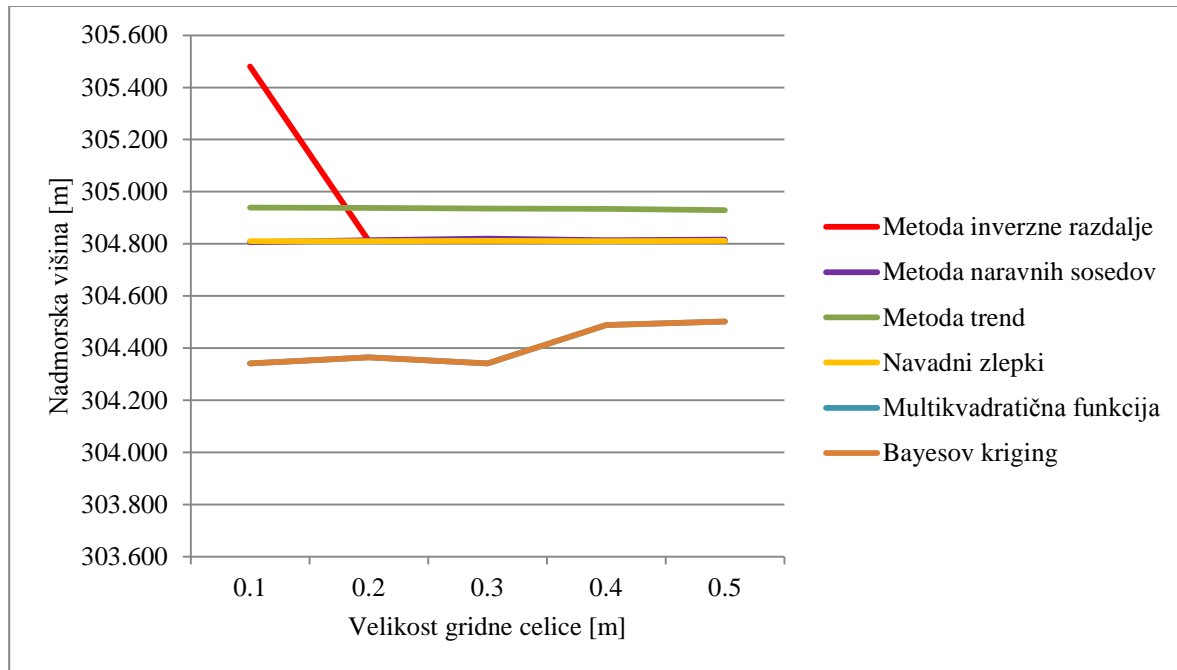
PRILOGA A.3: Minimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.



PRILOGA A.4: Maksimalne vrednosti višin deponije v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.



PRILOGA A.5: Minimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.





PRILOGA A.6: Maksimalne vrednosti višin osnovne ploskve v odvisnosti od velikosti gridne celice za podatke LGB.

