

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Geodezija,  
smer Geodezija

Kandidatka:

**Maja Balon**

# **Analiza uporabnosti tehnologije terestričnega laserskega skeniranja za metrično dokumentacijo zemeljskih plazov**

**Diplomska naloga št.: 726**

**Mentor:**

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Somentor:**

mag. Tomaž Gvozdanovič

Ljubljana, 9. 11. 2007

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **MAJA BALON** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
**»ANALIZA UPORABNOSTI TEHNOLOGIJE TERESTRIČNEGA LASERSKEGA  
SKENIRANJA ZA METRIČNO DOKUMENTIRANJE ZEMELJSKIH PLAZOV«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 1.10.2007

Maja Balon

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

**UDK:** 528.71:632.125(043.2)

**Avtor:** Maja Balon

**Mentor:** doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Somentor:** mag. Tomaž Gvozdanović, univ. dipl. inž. geod.

**Naslov:** Analiza uporabnosti tehnologije terestričnega laserskega skeniranja za metrično dokumentiranje zemeljskih plazov

**Obseg in oprema:** 85 str., 4 pregl., 54 sl., 9 en.

**Ključne besede:** terestrično lasersko skeniranje, tahimetrija, primerjava, zemeljski plazovi, interpolacija ploskev

### **Izvleček:**

Glavna tema diplomske naloge je terestrično lasersko skeniranje, ki se je v Sloveniji šele začelo pojavljati in uporabljati. Tehnologijo obravnavam v povezavi z zemeljskimi plazovi in ugotavljam njeno primernost za uporabo v te namene – predvsem s strani hitrosti terenskega dela, obdelave podatkov in možnih izvedenih podatkov. V začetnem delu naloge je podan splošen opis zemeljskih plazov v nadaljevanju pa značilnosti tehnologije terestričnega laserskega skeniranja. Podan je tudi opis in delovanje laserskega skenerja Riegl LMS Z420i, ki smo ga pri konkretnem skeniranju plazu Slano blato uporabili. Opisan je postopek izmere plazu z laserskim skeniranjem in klasično geodetsko metodo (elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300). Predstavljen je postopek obdelave podatkov z računalniškim programom RiSCAN PRO ter izvedeni rezultati, kot so plastnice, nakloni idr. V zadnjem delu diplomske naloge pa podajam še primerjavo meritev laserskega skeniranja in klasične geodetske metode. Primerjava je izvedena z izračunom višinskih razlik med točkami klasične izmere ter pripadajočimi višinami točk na modelnih ploskvah iz podatkov laserskega skeniranja. Modelne ploskve so rezultat različnih interpolacijskih metod. V konkretnem primeru sem za interpolacije uporabila program Surfer 8 in metode interpolacije: triangulacija z linearno interpolacijo, kriging, metoda naravnih sosedov ter metoda inverznih razdalj na potenco.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

- UDC:** 528.71:632.125(043.2)
- Author:** Maja Balon
- Supervisor:** Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
- Cosupervisor:** M.Sc. Tomaž Gvozdanović, B.Sc.Geod.
- Title:** Analysis of the applicability of terrestrial laser scanning technology for metric documentation of landslides
- Notes:** 85 p., 4 tab., 54 fig., 9 eq.
- Key words:** terrestrial laser scanning, tachymetry, comparison, landslides, interpolation of surfaces

### **Abstract**

The main theme of this thesis is terrestrial laser scanning, which is only being introduced in Slovenia. The technology is discussed in association with landslides and its adequacy for this purpose is established – particularly with respect to the speed of field work, data processing and possible established data. The initial part of the thesis gives a general description of landslides while the following parts discuss the characteristics of terrestrial laser scanning technology. The laser scanner Riegl LMS Z420i, which was used in the case of the scanning of the Slano blato landslide, is also described and its operation presented. The procedure of measuring landslides by means of laser scanning is compared with the classical surveying method (electronic tachymeter Leica TCRP1201 R300). The procedures of data processing using the computer program RiSCAN PRO as well as the processed results such as contour lines and slopes are presented. The final part of the thesis gives a comparison of measurements obtained by laser scanning and by the classical surveying method. The comparison is carried out by calculating the height differences between the points of classical measurement and the corresponding heights of points on the model surfaces ensuing from the laser scanning data. The model surfaces are the result of different interpolation methods. In this case the interpolation was done using the Surfer 8 program and methods of interpolation such as triangulation with linear interpolation, kriging, the method of natural neighbor and the method of inverse distance to a power.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras. Predstavila mi je možnost teme diplomske naloge, ves čas je pozorno spremljala moje pisanje ter si vedno vzela čas za koristne nasvete in popravke.

Zahvaljujem se tudi somentorju mag. Tomažu Gvozdanoviću, univ.dipl.inž.geod.. Pomagal je z mnogimi praktičnimi napotki tekom izvajanja projekta, ki so mi bili v veliko pomoč tudi pri pisanju diplomske naloge.

Hvala podjetju DFG CONSULTING d.o.o., ki mi je omogočilo sodelovati na projektu in s tem spoznati zame do sedaj neznano področje geodezije.

Rada bi se zahvalila tudi Roku, ki mi je predstavil teorijo laserskega skeniranja in mi je vedno, kadar je bilo potrebno, priskočil na pomoč.

Najlepša hvala staršem za vso finančno in moralno podporo. Hvala, da so mi omogočili brezskrbna študentska leta in me bodrili tudi v najtežjih trenutkih.

Hvala tudi vsem prijateljem in sošolcem za razburljiva doživetja in sprostitev.

## **KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SPLOŠNO O PLAZOVIH</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Definicija plazov</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Vzrok nastanka</b>	<b>3</b>
<b>2.3</b>	<b>Opis plazu</b>	<b>5</b>
<b>2.4</b>	<b>Klasifikacije plazov</b>	<b>8</b>
<b>2.5</b>	<b>Spremljanje plazu (monitoring)</b>	<b>14</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Vloga geologije pri monitoringu plazov</b>	<b>16</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Vloga geodezije pri monitoringu plazov</b>	<b>18</b>
<b>2.6</b>	<b>Pojav plazov v Sloveniji</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Oprelitev tehnologije</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Skenerji</b>	<b>26</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Osnovni elementi laserskih skenerjev</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Princip delovanja</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Oblak točk</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Uporabnost v praksi</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>POSNETEK PLAZU</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Plaz Slano blato</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Klasična geodetska metoda</b>	<b>40</b>
<b>4.3</b>	<b>Lasersko skeniranje</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>IZDELKI IN ANALIZA NJIHOVE UPORABNOSTI</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Postopek obdelave in izdelki</b>	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>Uporabnost oblaka točk</b>	<b>62</b>

<b>6</b>	<b>PRIMERJAVA METOD (ELEKTRONSKI TAHIMETER – LASERSKI SKENER)</b>	<b>65</b>
<b>6.1</b>	<b>Modelna ploskev</b>	<b>66</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Triangulacija z linearno interpolacijo</b>	<b>67</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Kriging metoda</b>	<b>68</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Metoda naravnih sosedov</b>	<b>69</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Metoda z inverznimi razdaljami na potenco</b>	<b>70</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Modelne ploskve plazu Slano blato</b>	<b>71</b>
<b>6.2</b>	<b>Izbira primernih podatkov za primerjavo</b>	<b>73</b>
<b>6.3</b>	<b>Postopek primerjave</b>	<b>74</b>
<b>6.4</b>	<b>Rezultati primerjave</b>	<b>75</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Pravilna mreža točk intervala 0.25 m</b>	<b>76</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Pravilna mreža točk intervala 1 m</b>	<b>78</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Pravilna mreža točk intervala 0.25 m – manjša gostota podatkov</b>	<b>80</b>
<b>6.4.4</b>	<b>Primerjava vseh</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>84</b>
	<b>VIRI</b>	<b>86</b>



## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Primerjava višin (mreža intervala 0.25 m)	76
Preglednica 2: Primerjava višin (mreža intervala 1 m)	78
Preglednica 3: Primerjava višin (manjša gostota vhodnih podatkov, mreža intervala 1 m)	80
Preglednica 4: Primerjava višin – vsi obravnavani primeri	82

## KAZALO SLIK

### PRIVZETE SLIKE

Slika 1: Prostorski in časovni dejavniki, ki pogojujejo nastanek plazov .....	5
Slika 2: Zgradba plazov .....	6
Slika 3: Dimenzije plazov.....	7
Slika 4: Osnovna delitev tipov plazov .....	8
Slika 5: Osnovni tipi plazenja glede na način premikanja – padanje, prevračanje, drsenje, tečenje.....	12
Slika 6: Nekatere vrste pobočnih procesov v odvisnosti od vlažnosti in hitrosti premikanja ..	14
Slika 8: Primer tradicionalnega kartiranja plazov .....	17
Slika 9: Karta gostote plazov .....	20
Slika 10: Karta verjetnosti pojavljanja plazov.....	22
Slika 11: Karta potencialne škode zaradi verjetnega pojavljanja plazov .....	23
Slika 13: Način delovanja "ranging" skenerja .....	27
Slika 14: Vidno polje 3D laserskega skenerja .....	30
Slika 15: Resolucija in velikost pike .....	31
Slika 16: Refleksijska cilindrična tarča in prizma za 3D lasersko skeniranje .....	32
Slika 17: Zgradba sistema za terestrično skeniranje.....	33
Slika 18: Načini prikaza oblaka točk.....	35
Slika 21: Elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300 in prizma Leica GPR111 .....	40
Slika 22: Prikaz definicije površja, ki naj bo zajeto .....	42
Slika 24: Inštrumentarij za lasersko skeniranje .....	44
Slika 41: Analiza 3D modela.....	64

Slika 43: Delaunay-jeva triangulacija .....	68
Slika 44: Voronoi-jeva območja in z njimi povezana Delaunay-jeva triangulacija .....	69

## **AVTORSKE SLIKE**

Slika 7: Monitoring plazov .....	15
Slika 12: Način delovanja rotirajočih zrcal .....	25
Slika 19: Geografska lega plazov Slano blato .....	38
Slika 20: Del plazov, ki smo ga skenirali.....	39
Slika 23: Princip polarne izmere detajla. ....	42
Slika 25: Stojišče 1.....	48
Slika 26: Spremljanje poteka skeniranja na prenosnem računalniku.....	49
Slika 27: Prikaz poteka obdelave oblaka točk .....	51
Slika 28: Združen oblak točk v državnem koordinatnem sistemu .....	52
Slika 29: Združen oblak točk z dodanimi RGB vrednostmi .....	52
Slika 30: Filtriranje .....	53
Slika 31: Obarvan model terena.....	55
Slika 32: Mrežni prikaz 3D modela .....	56
Slika 33: Hipsografski prikaz plazov z zvezno barvno lestvico v državnem koordinatnem sistemu.....	56
Slika 34: Hipsografski prikaz plazov z diskretno barvno lestvico.....	57
Slika 35: Plastnice.....	58
Slika 36: Prikaz naklonov terena in legenda, ki prikazuje meje posameznih razredov (enota so kotne stopinje) .....	59
Slika 37: Izris poljubnega profila.....	60

Slika 38: 3D ploskev razlik .....	61
Slika 39: Model plazu Slano blato z lepo vidnimi kanali za odvodnjavanje.....	63
Slika 40: Pogled na 3D model s stojišča 1 .....	64
Slika 42: Prikaz meritev obeh metod.....	65
Slika 45: Modelne ploskve plazu z različnimi metodami interpolacije (mreža intervala 0.25 m).....	72
Slika 46: Modelna ploskev z intervalom mreže 1 m (desno) in modelna ploskev z zmanjšano gostoto vhodnih podatkov z intervalom mreže 0.25 m (levo).....	73
Slika 47: Prikaz položaja grobih napak .....	74
Slika 48: Prikaz odstopanj – mreža intervala 0.25 m .....	76
Slika 49: Histogram in graf normalne porazdelitve – mreža intervala 0.25 m.....	77
Slika 50: Prikaz odstopanj – mreža intervala 1 m .....	78
Slika 51: Histogram in graf normalne porazdelitve – mreža intervala 1m.....	79
Slika 52: Prikaz odstopanj - manjša gostota vhodnih podatkov, mreža intervala 0.25 m.....	80
Slika 53: Histogram in graf normalne porazdelitve – manjša gostota vhodnih podatkov, mreža intervala 0.25 m .....	81
Slika 54: Grafi normalne porazdelitve: levo – mreža 0.25 m, v sredini – mreža 1m, desno – manjša gostota podatkov.....	82

## **KAZALO PRILOG**

**Priloga A: Rezultati primerjave višin: pravilna mreža točk intervala 0.25 m**

**Priloga B: Rezultati primerjave višin: pravilna mreža točk intervala 1 m**

**Priloga C: Rezultati primerjave višin: pravilna mreža točk intervala 0.25 m – manjša  
gostota vhodnih podatkov**

## 1 Uvod

Slovenija je, glede na raziskave zadnjih let, precej ogrožena s plazovi. V okviru projekta "Novelacija in nadgradnja informacijskega sistema o zemeljskih plazovih in vključitev v bazo GIS UJME" (Komac et al., 2005), je bila opravljena tudi analiza pojavljanja (znanih) plazov na območju Slovenije. Ugotovljeno je bilo, da slabih 7% Slovenije pokrivajo območja, kjer je verjetnost pojavljanja plazov zelo velika, 17% države pripada območjem, na katerih je pojavljanje plazov veliko in 10% območjem, kjer je verjetnost pojavljanja plazov srednje velika. Vsa tri območja skupaj predstavljajo dobro tretjino površine Slovenije.

Za preučevanje plazu ter za njegovo pravilno in uspešno sanacijo so potrebni ustrezni podatki. Na njihovi osnovi lahko planiramo in koordiniramo nadaljnje akcije, hkrati pa dobimo oceno o količini plazovine, debelini nanosov itd. Podatke o objektih v prostoru in o samem prostoru pridobimo z najrazličnejšimi geodetskimi tehnikami (klasična geodetska izmera, GPS meritve, fotogrametrična izmera). Ena izmed novejših tehnik je terestrično 3D lasersko skeniranje. Gre za metodo, ki v izjemno kratkem času meritev omogoča pridobitev velikega števila prostorskih koordinat točk, ki predstavljajo natančno površino skeniranega objekta. Poleg hitrosti zajema podatkov, je prednost metode tudi v tem, da običajno niso potrebne dodatne izmere, saj so zajeti vsi objekti v vidnem polju 3D laserskega skenerja. Pridobljene oblake točk lahko uporabimo večkrat in za različne namene. Pomembna pa je tudi varnost ljudi, ki izvajajo terenske meritve. Kadar je gibanje na območju plazu nevarno, lahko stanje na plazu zajamemo z varnega oddaljenega mesta. Pridobljene podatke lahko tudi kombiniramo s slikovnimi podatki posnetimi s fotogrametričnimi kamerami.

V Sloveniji se metoda terestričnega 3D laserskega skeniranja že uporablja za različne namene, v primeru zemeljskih plazov pa, po mojem vedenju, še ni bila temeljito preizkušena. Menim, da bi bilo smiselno preveriti njeno primernost za uporabo v ta namen.

Pri izdelavi diplomske naloge mi je v veliko pomoč sodelovanje s podjetjem DFG CONSULTING d.o.o, s katerim sodelujem pri izvajanju raziskovalno razvojnega projekta CRP "Znanje za varnost in mir 2006-2010" – Mobilna enota za hitri zajem prostorskih podatkov v primeru zemeljskih plazov.

V diplomski nalogi se najprej posvečam fenomenu plazov in poskušam ugotoviti kakšni geodetski podatki o njih ter v kakšni obliki so potrebni drugim strokam za hitro in uspešno sanacijo. V nadaljevanju opisujem tehnologijo terestričnega 3D laserskega skeniranja in rezultate, ki jih omogoča. Praktičen del diplomske naloge predstavlja izmera plazov z dvema metodama: s terestričnim laserskim skeniranjem ter s klasično geodetsko metodo (z elektronskim tahimetrom). Obe metodi nato primerjam z različnih vidikov in ugotavljam kako je terestrično 3D lasersko skeniranje primerno za snemanje zemeljskih plazov. Naj na tem mestu tudi poudarim, da v konkretni nalogi obravnavam uporabnost metode za posnetek stanja plazov, in ne spremljanja, v smislu ugotavljanja premikov. Za to bi bilo potrebno plaz še enkrat skenirati v nekem časovnem zamiku, česar pa mi nismo storili.

Naravne nesreče pogostokrat težko predvidimo in preprečimo. Kadar so poleg samega okolja v nevarnosti tudi človeška življenja in večja materialna škoda, je še toliko bolj pomembno, da vse ekspertne skupine, ki sodelujejo pri sanaciji plazov, vedo kako morajo ukrepati. Vloga geodetske stroke pri tem je, da čim hitreje zagotovi kvalitetne prostorske podatke o sproženem plazov. Gre za samo lokacijo plazov, njegov obseg, smer premikanja, volumen in maso plazovine ter izvedene podatke kot so vertikalni profili, izohipsne karte itd. Vsi ti podatki so namreč osnova za časovne, kadrovske in finančne izračune sanacije ter hkrati tudi tehnične podlage za izvedbo potrebnih ukrepov. Predvsem je v takih trenutkih ključna hitrost. S hitro in organizirano akcijo lahko preprečimo še hujše posledice.

V Sloveniji je lokacij, ki jim grozijo plazovi, ogromno. Zakaj bi čakali, da se zgodi najhujše. Tudi preventivna večkratna snemanja in opazovanja premikov na posameznem plazov so lahko bistvenega pomena za napovedovanje prostorskega in časovnega razvoja plazov.

Ob predpostavki, da se metoda terestričnega 3D laserskega skeniranja izkaže za primerno, bi zaradi vseh svojih že naštetih prednosti predstavljala dobro tehnično pomoč pristojnim inštitucijam (npr. Ministrstvu za okolje in prostor, civilni zaščiti, lokalni oblasti...) pri izdelavi posnetkov stanja ter za določitev premikov na plazovih.

## **2 SPLOŠNO O PLAZOVIH**

Za ustrezno metrično dokumentiranje stanja plazov moramo najprej vedeti nekaj osnovnih lastnosti pojava, zato so v tem poglavju opisane definicije, zgradba, osnovne karakteristike, pojav plazov v Sloveniji ter spremljanje (monitoring), ki se vzpostavi v primeru večjih in bolj ogrožujočih plazov.

### **2.1 Definicija plazov**

"Plazenje je gibanje zemljinskih ali hribinskih mas po pobočju (pod vplivom gravitacije)" (Ribičič, 2002a). Po starejših definicijah v plazenje uvrščamo samo površinske zemeljske mase (zemljine ali hribine), novejšje definicije pa sem uvrščajo tudi pojave, kot so padanje kamenja na eni strani in blatne tokove na drugi strani.

### **2.2 Vzrok nastanka**

Pri pojavu plazov sodeluje veliko različnih procesov. Najpogosteje se razlogi za nastanek plazov skrivajo v geoloških, topografskih in klimatskih razmerah, ki so značilne za večja območja. Do zdrsra pride, kadar teža dela kamnine (zemljine ali hribine) prekorači strižno trdnost na kritični ploskvi. Za pojave plazenja sta torej pomembna dva faktorja, ki delujeta eden proti drugemu:

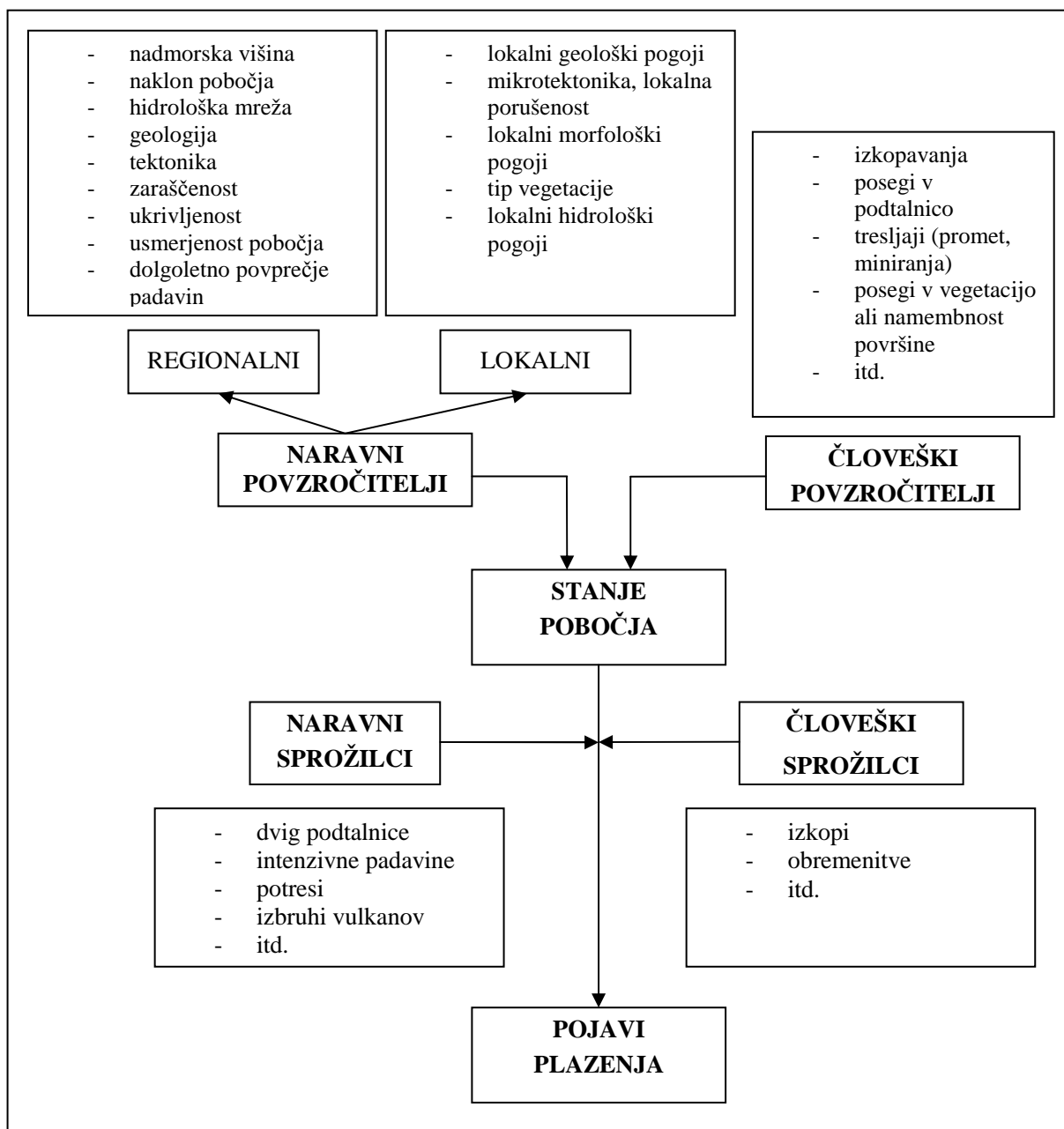
- gravitacija oz. zunanje sile (teži k premiku višje ležečih kamnin navzdol)
- notranja trdnost kamnine (preprečuje premik).

Dolgotrajno delovanje eksogenih sil spreminja obliko terena ter zmanjšuje trdnost kamnine. Ko gravitacijske sile prekoračijo strižno trdnost na najbolj šibki ploskvi znotraj kamnine, pride do zdrsra. Pogosto pa k splazitvi pripomore tudi človek s svojimi posegi v teren.



Procesi (faktorji), ki strižno silo povečujejo so:

- odstranitev stranske podpore (erozija, pretekli plazovi, spodkopavanja zaradi gradbenih del)
- preobremenitev (teža dežja, snega, akumulacija splazelega materiala, vegetacija, teža zgradb, teža vode iz cevi, ki puščajo ali iz kanalizacije – neurejeno odvodnjavanje,...)
- tresenje tal (potres, vibracije)
- odstranitev spodaj ležeče podpore (spodkopavanje brežine, preperevanje, erozija zaradi raztapljanja materiala, rudarjenje,...)
- stranski pritisk (voda v razpokah, zmrzovanje vode v razpokah, hidratacija gline oz. vezanje vode v strukturo gline, mobilizacija rezidualnih napetosti oz. sprostitev preostalih napetosti).



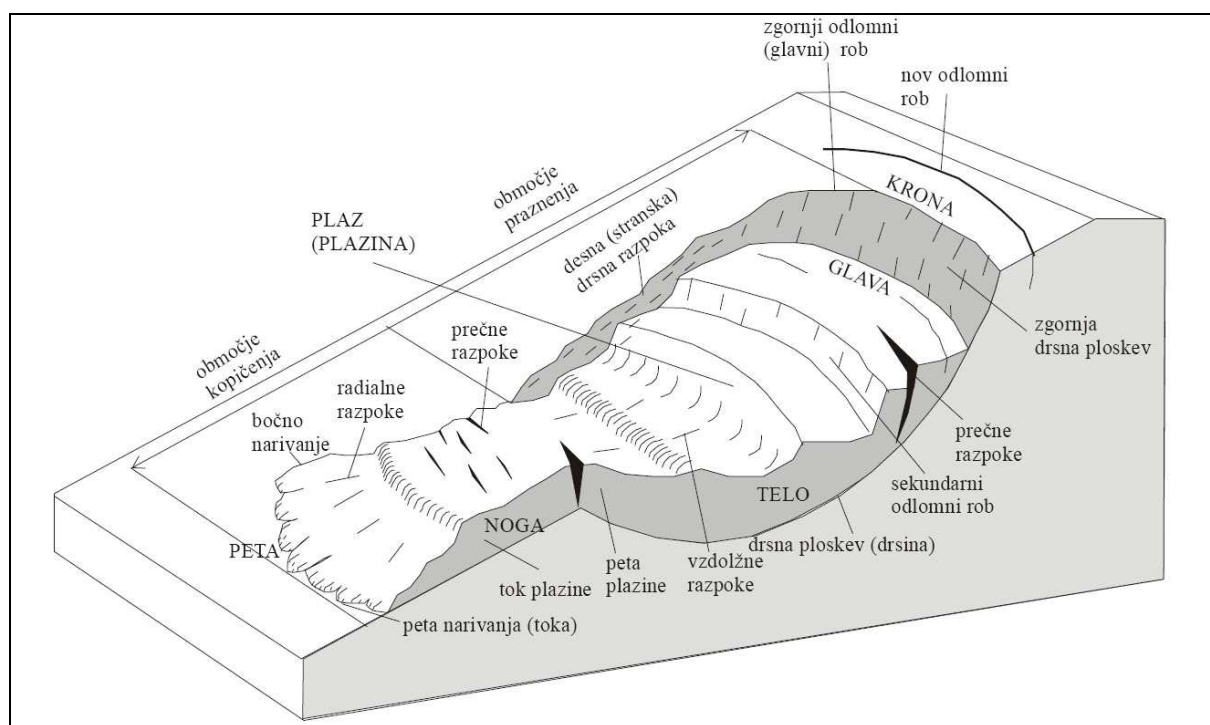
Slika 1: Prostorski in časovni dejavniki, ki pogojujejo nastanek plazov (Komac, 2005)

## 2.3 Opis plazu

Plazišče je del pobočja, kjer se nahajajo plazovi ter labilna in porušena področja. Vplivno območje plazišča je del površine, na kateri se odražajo vplivi plazišča.

Splošno se plaz deli na tri glavne dele:

- glavo: vrhnji del plazu, ki ga navzgor omejuje zgornji odlomni rob,
- telo: osrednji del plazu ter
- nogo: kjer se splazeli material odloži.



Slika 2: Zgradba plazu (Ribičič, 2002a)

Glava plazu se formira na zgornjem delu plazu. Tu se nahajajo odlomni robovi, usedki, grude in razpoke. Opisana je z obliko razpok, obliko glave, globino odlomnega roba, s premikom in ostalimi značilnostmi.

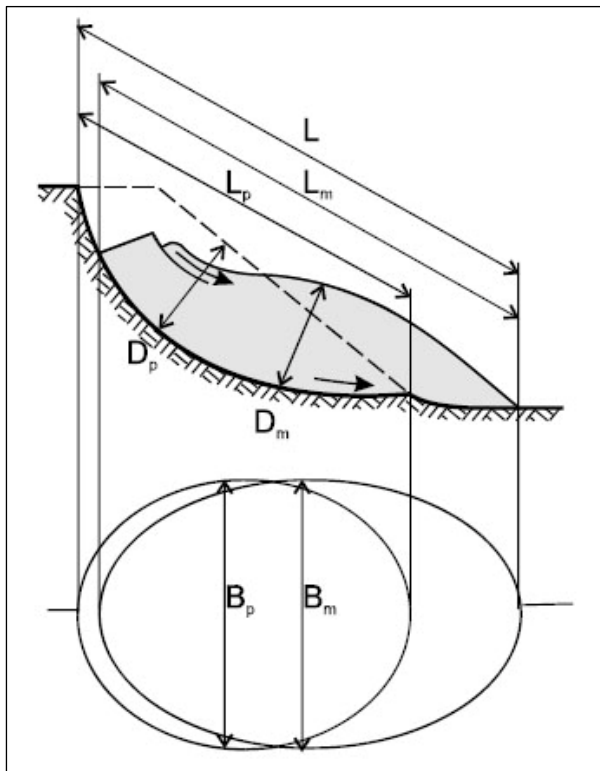
Telo plazu je nestabilna masa, ki je odtrgana od prvotnega mesta in se premika navzdol. Omejujeta ga bočna odlomna robova. Znotraj telesa pa se nahajajo izbokline in kotanje, izviri, mlake, zamočvirjenosti, odlomi, narivi ipd. Njihov obseg je odvisen od vrste in velikosti plazu.

Peta plazu je območje izrivnega roba plazu. Nastane lahko narivni rob ali pa se masa, ki plazi valovito razlije po podlagi ali jo celo izrine. Če se narivni material v peti plazu sčasoma dovolj namoči, v njej nastane sekundarni plaz.

O čelu plazu govorimo, kadar plaz prodira naprej. Teme ali krona je najvišje območje, kjer je prišlo do odloma.

Plaz se začne z zgornjim odlomnim robom, ki je večinoma strm in se pogosto kaže kot odlomna razpoka. Zgornji odlomni rob je najvišji del drsne ploskve. Nad zgornjim odlomnim robom se pogosto pojavijo sekundarne odlomne razpoke različnih oblik. Deli tal, ki mejijo na te razpoke, se odlomijo in tako se odlomni rob lahko širi v območje navzgor. Pri tem nastanejo grude. Kadar plaz opisujemo, je pomembna tudi višina odlomnega roba oziroma vertikalni premik.

Slika 3 prikazuje definicije dimezij plazu.



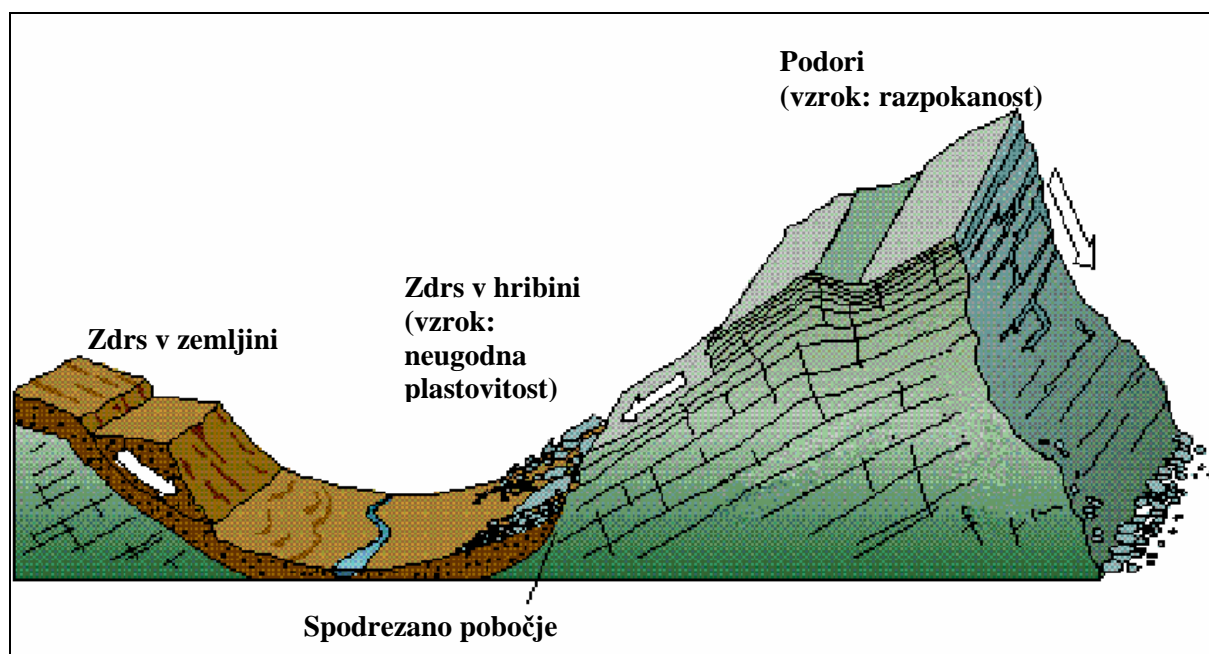
- Bm – širina splazele mase – največja širina pravokotno na Lm
- Bp – širina drsne ploskve – največja oddaljenost med boki plazu, pravokotno na Lm
- L – skupna dolžina – največja razdalja med temenom in dnom plazu
- Lm – dolžina splazele mase – največja dolžina med vrhom in dnom plazu
- Lp – dolžina drsne ploskve – najmanjša razdalja od temena do konca drsne ploskve
- Dm – globina splazele mase
- Dp – globina drsne ploskve

Slika 3: Dimenzije plazu (Komac et al., 2005)

Plazenje razdelimo v več faz. Najprej se pojavi lezenje oziroma deformacija z lokalnimi nastanki strižnih razpok. Hitrost premikov v tej fazi je zelo majhna. Sledi predplazenje, kjer se nastale deformacije združijo v drsno ploskev. Nato nastopi pravo plazenje s premiki vzdolž drsne ploskve. V tej fazi so hitrosti največje. Zadnja faza je faza stabilizacije.

## 2.4 Klasifikacije plazov

Klasifikacij plazov je veliko. Ribičič (2002b) v prvi vrsti deli plazove na hribinske, zemljinske plazove in tokove.



Slika 4: Osnovna delitev tipov plazov (Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Landslides in BC – spletna stran, 25.01.2007)

### Osnovni pojavi naravne porušitve v hribinah

Hribinski zdrs po šibki ploskvi diskontinuitete v hribini (ploskovni in klinasti):

- so težko napovedljivi,
- od majhnih do velikih dimenzij,

- najpogosteje nastane nenaden hiter zdrs, pri čemer celotna hribinska masa zdrsne naenkrat,
- redkeje nastopajo zdrsi po valoviti ploskvi v več zaporednih časovnih intervalih z vmesnimi premori,
- zdrsi nastopajo ponavadi v hribovitem nenaseljenem svetu ali pa na visokih umetnih usekih v hribini, ki lahko neposredno ogrožajo človeka,
- pogostost nastanka hribinskih zdrsov je sorazmerno velika, toda pada z velikostjo pojava.

Sanacija hribinskih zdrsov se zaradi nepredvidljivosti pojava najpogosteje omeji na odpravo posledic porušitve, obstajajo pa tudi možnosti sanacije s pritrditvijo labilnih hribinskih blokov s sidri.

Hribinski (kamninski) podori ob subvertikalnih stenah iz trdne kamnine:

- težko napovedljivi, posebno čas, ko naj bi podor nastal,
- od pojavov ogromnih razsežnosti do majhnih pojavov,
- hitrost gibanja je zaradi navpičnega padanja blokov, skal in kamnov blizu hitrosti prostega pada,
- zgodijo se lahko visoko v alpskih stenah nad dolino ali ob strmih brežinah, kjer se reke prebijajo skozi hribovja,
- pogosto jih sprožijo potresi,
- ponavadi nastanejo v manj naseljenem hribovitem svetu.
- so nenadni in zato zelo ogrožajoči, vendar večinoma nastopajo v nenaseljenih območjih.

Za podore velja, da jih je le redko možno sanirati, zato v poštev pride predvsem njihovo umetno sprožanje in odstranitev ali zaščita ogroženih objektov pod njimi.

Drsenje, prevračanje, kotaljenje in padanje posameznih blokov, skal in kamnov ter zdrsi grušča prek strmih hribinskih brežin:

- praktično nenapovedljivi pojavi glede časa sproženja,
- možna prostorska opredelitev nevarnosti,
- pogostejši manjši dogodki, kot je padanje kamnov, čim večje so gmote bolj redko je njihovo padanje,
- hitrost padanja pri navpičnih stenah primerljiva s prostim padom, na nagnjenih brežinah, glede na njihov naklon ustrezno manjša,
- poleg padanja nastopa še drsenje, kotaljenje ali odbijanje,
- dogodki so pogosti po deževju in ob potresih v hribovitem in alpskem svetu,
- najbolj so ogrožene prometnice in hiše pod strmimi stenami v alpskem svetu.

Obstajajo številni ukrepi za zmanjšanje nevarnosti padanja kamninskih blokov in kosov, od mrež, sidranja, lovilnih zaslonov in jarkov.

### **Osnovni pojavi porušitve v zemljinah**

Plazenje po pogojenih conah (ali ploskvah) v zemljini ali na stiku zemljine s podložno hribino:

- številne vrste plazenja površinskega zemljinskega pokrova na trši podlagi ali porušitve v homogeni zemljini so ob dobrih raziskavah napovedljive,
- počasni procesi od nekaj mm do največ nekaj m na dan,
- največkrat se zgodijo v gričevnati in hriboviti krajini, zgrajeni iz pretežno klastičnih kamnin, ali pa kot zdrsi pobočnih nanosov v deževnih obdobjih,
- pogosti so tudi na naseljenih območjih.

Uporabljamo številne sanacijske ukrepe, ki so vezani na odvodnjavanje, pregrupacijo zemeljskih mas in podporne ukrepe.

Polzenje zemljinskih mas, ki iz izvora plazanja polzijo po pobočju gravitacijsko navzdol:

- možna napoved po nastanku zemljinskega plazju, katerega plazina se lahko ob povečanju vsebnosti vode spremeni v počasni viskozni blatni tok ali podoben pojav,
- proces je srednje hiter, (napreduje lahko tudi več deset m na dan) in ogroža predvsem objekte, medtem ko življenja niso ogrožena (zelo redko, kadar se pojav zgodi ponoči),
- pogosto ogroža naseljena območja, ker lahko polzenje zemljinskih mas deluje daleč stran od izvora, in seže tudi na ravninski poseljeni svet.

Najpomembnejši sanacijski ukrep je osuševanje plazečega telesa z globokimi drenažami in drenažnimi rebri.

### **Osnovni pojavi masnih zemeljskih tokov**

Masni zemljinski tokovi, ki se obnašajo kot tekočine:

- včasih je možna napoved po pregledu plazju, iz katerega lahko izhaja drobirski tok,
- pogosto je njihova sprožitev neposredno povezana na količino padavin,
- tok je zelo hiter (ponavadi s hitrostjo nekaj deset km na uro),
- tokovi se pogosto razlijejo po gosto naseljenem ravninskem svetu in lahko povzročijo hudo katastrofo.
- Učinke drobirskih tokov zmanjšujemo z ureditvijo območja izvora toka, preusmeritvijo toka, ustavljanja toka s pregradami, predvsem pa z ukrepi izogibanja človeških posegov na ogroženih območjih.



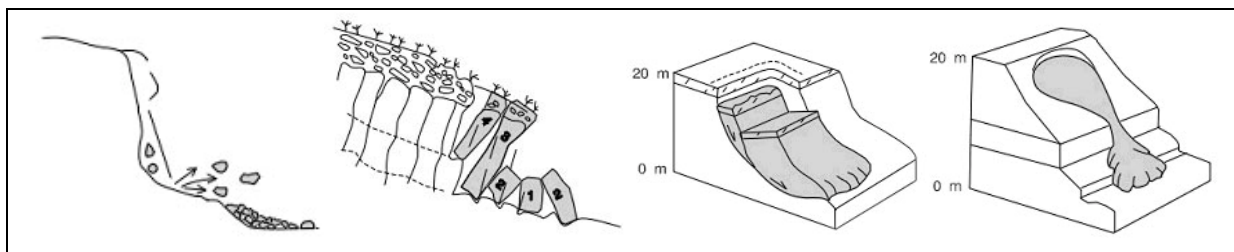
Ribičič (2002a) dalje navaja klasifikacije glede na različne lastnosti plazenj. Tukaj so opisane le najosnovnejše delitve.

1.) Klasifikacija tipov plazenja glede na hitrosti in možnosti reakcije :

Kategorija	Hitrost	Človeška reakcija	Primer vrste plazenja
<b>Izjemno hiter</b>	do 200 km/h	ni možna	hribinski podor
<b>Zelo hiter</b>	5 m/s	ni možna	drobirski tok
<b>Hiter</b>	3 m/min	evakuacija	usad
<b>Srednje hiter</b>	1.8 m/uro	evakuacija	preperinski plaz
<b>Počasen</b>	13 m/mesec	sanacija	gruščnat plaz
<b>Zelo počasen</b>	1.6 m/leto	sanacija	glinast plaz
<b>Izjemno počasen</b>	16 mm/leto	ni možna	globok plaz

2.) Klasifikacija glede na vrste premikanja:

- padanje,
- kotaljenje,
- drsenje,
- razlivanje,
- tečenje.



Slika 5: Osnovni tipi plazenja glede na način premikanja – padanje, prevračanje, drsenje, tečenje (Komac et al., 2005)

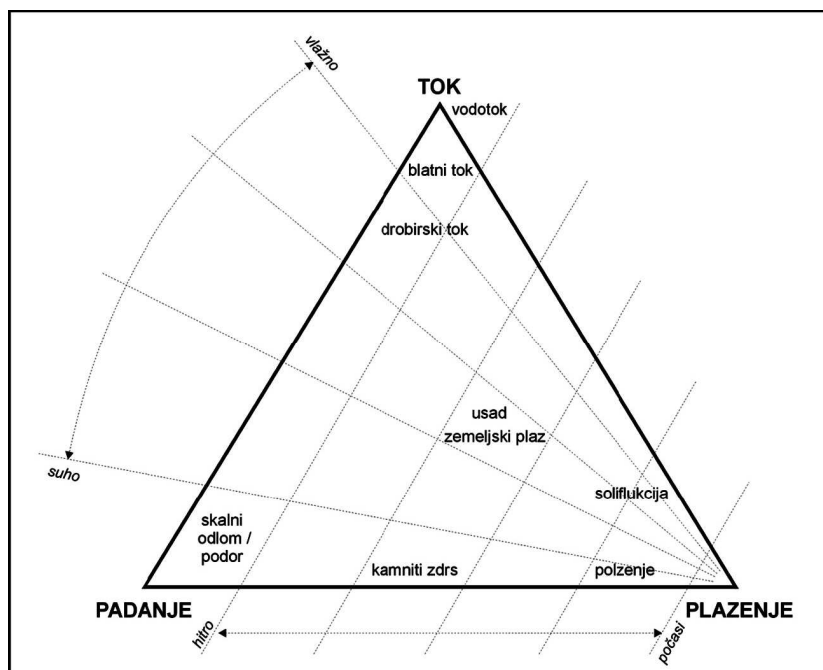
3.) Klasifikacija glede na oddaljenosti plazenja od odložitve materiala :

- plaz se ne razširja iz svojega obsega,
- plaz se nekoliko podaljša v spodnjem delu,
- plaz se znatno podaljša v spodnjem delu, vendar sta plaz in tok, ki izhaja iz njega še združena,
- odložitev je več 100 m od izvora,
- odložitev je več km od izvora.

4.) Klasifikacija glede na stanje plazu (dinamiko premikov):

- Aktivni plaz je še v fazi premikanja. Lahko se premika neprestano (leze) ali pa se giba s prekinitvami (le ob večjih in dolgotrajnejših deževjih).
- Umirjeni plaz ne kaže več znakov premikanja. Najpogostejši primer umirjenega plazu je saniran plaz.
- Fossilni plaz je starejši plaz, katerega v glavnem vidimo le po morfologiji (nagubano in grbinasto pobočje). Na fosilnem plazu so pogosti manjši lokalni površinski zdrsi.
- Potencialni plaz je del pobočja, kjer je glede na geološko sestavo, hidrološke, inženirskogeološke (preperevanje in erozija) in morfološke razmere možno plazenje.

Slika 6 prikazuje nekatere vrste pobočnih procesov v odvisnosti od vlažnosti in hitrosti premikanja.



Slika 6: Nekateri vrste pobočnih procesov v odvisnosti od vlažnosti in hitrosti premikanja  
(Komac, Zorn, 2002 )

## 2.5 Spremljanje plazu (monitoring)

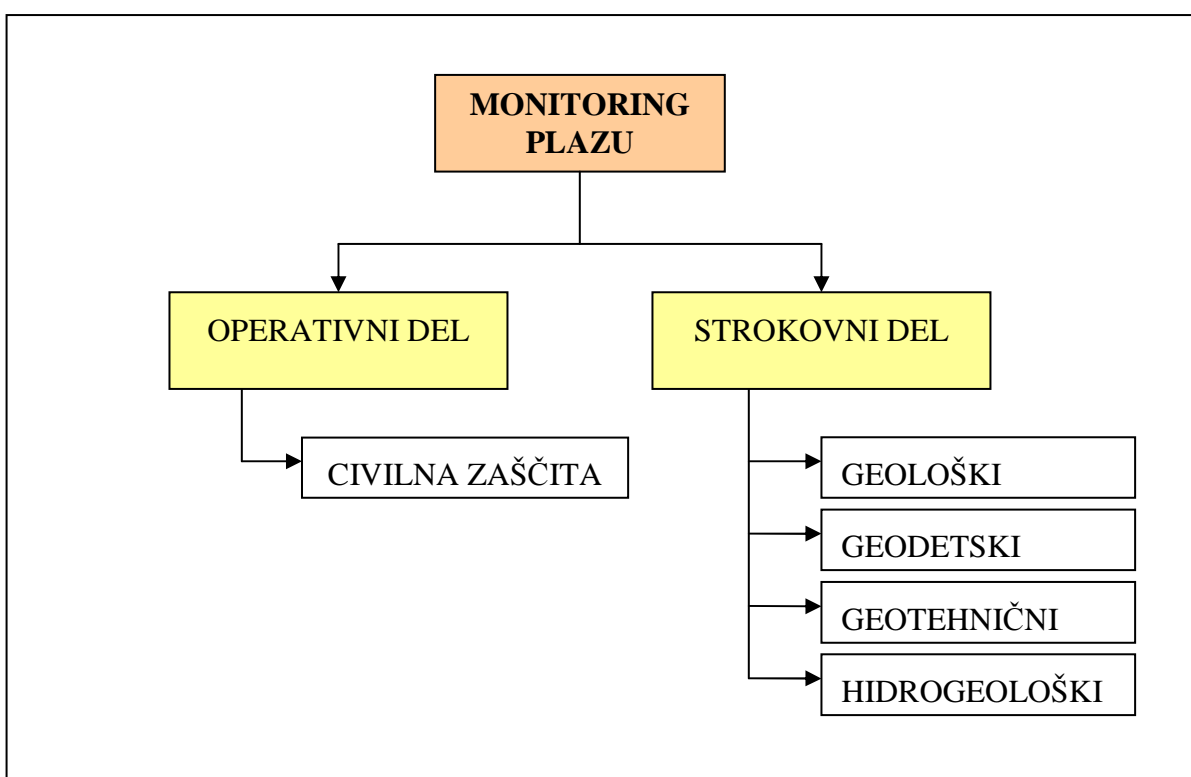
Ob pojavu plazu odločitve o nujnih ukrepih sprejema poveljnik Civilne zaščite občine, v kateri se plaz pojavlja. V primeru katastrofalnih plazov odloča poveljnik Civilne zaščite regije ali države. Strokovno pomoč nudijo strokovnjaki drugih strok (geolog, hidrotehnik, geomehanik itd.). V začetni fazi je pomembno ugotoviti predvsem nadaljnje gibanje plazu in predlagati nujne zaščitne ukrepe (Ribičič, 2002a). Predvsem je pomembna pridobitev prostorskih podatkov takoj po sproženem plazu.

Ob izvajanju prvih ukrepov na plazu se vzpostavi monitoring plazu. Monitoring se deli na operativni in strokovni del. Operativni del izvajajo člani Civilne zaščite. Opazujejo:

- širjenje razpok na plazu,
- širjenje plazu,

- pogostost pojavov padanja kamenja ali rušenja,
- intenziteto in pogostost padavin,
- pojavljanje in trajanje drobirskih tokov, povezanih s pojavi plazenja tal itd..

Strokovni del monitoringa opravljajo strokovnjaki z ustrežno opremo. Izvede se geološki, geodetski, geotehnični in hidrogeološki monitoring.



Slika 7: Monitoring plazov

Geološki monitoring obsega inženirsko-geološko opazovanje plazov, njegovega gibanja in značilnosti. Sem spada morebitno napredovanje plazov na zgornjem odlomnem robu, naraščanje razpok, širjenje pete plazov, obnašanje ob deževjih itd. Namen je napovedovanje nadaljnjega plazenja.

Geodetski monitoring je do sedaj obsegal občasne meritve pomikov na plazu in sicer meritve v prečnih merskih prerezih preko plazu ali meritve pomikov stabiliziranih točk na plazu in referenčnih točk v njegovem stabilnem zaledju.

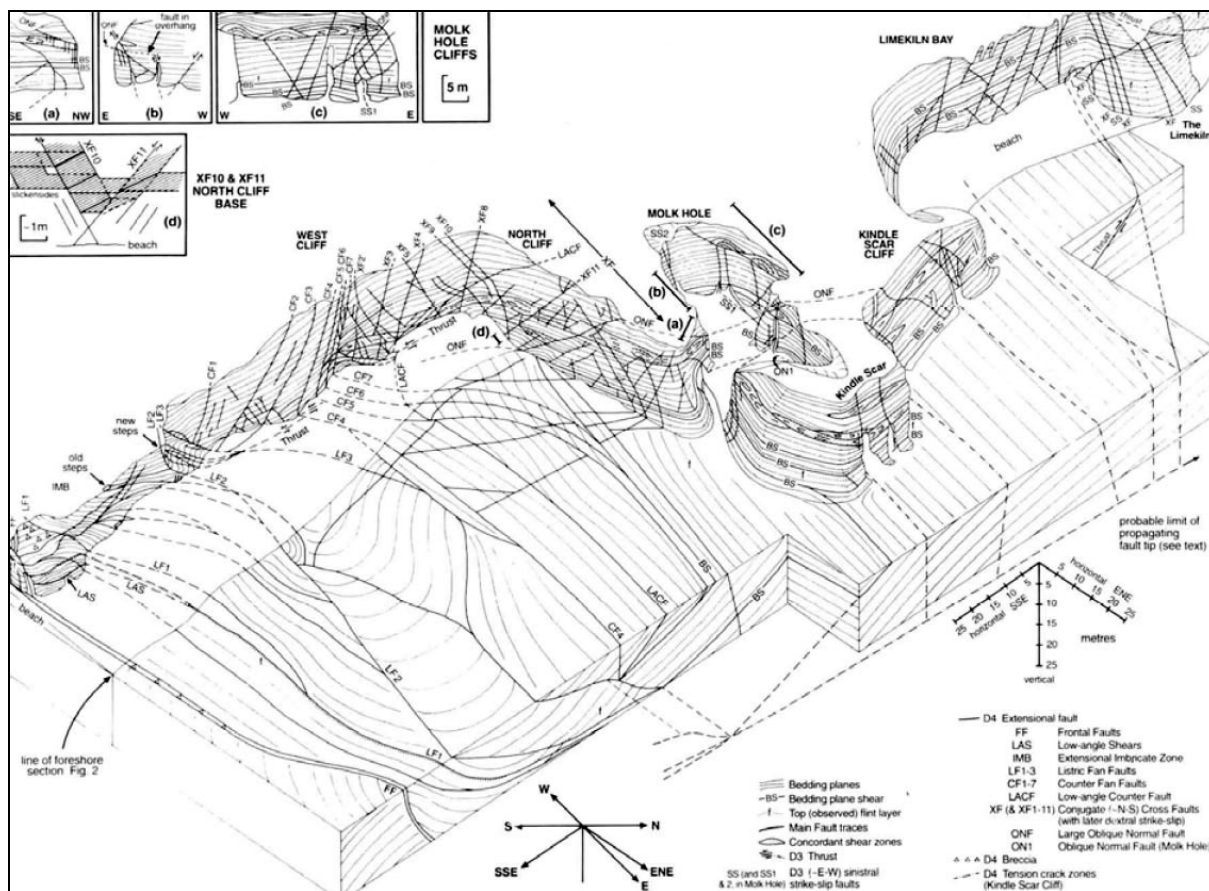
Geotehnični monitoring v morebitno izvedenih vrtinah na plazu in njegovem vplivnem ombmočju ugotavlja premike plazine po globini in meri nivo podzemnih voda.

Hidrogeološki monitoring obsega občasne meritve pretokov površinskih in izvirnih voda. Meritve se lahko nadgradijo z lokalnimi meritvami padavin – uporaba dežemera ali boljše vremenske postaje, ki poleg intenzitete in količine dežja omogoča tudi meritve hitrosti in smeri vetra, temperature zraka in energije sončnega sevanja.

### **2.5.1 Vloga geologije pri monitoringu plazov**

Terensko inženirsko-geološko snemanje plazu pomeni izdelavo načrta plazu z vsemi njegovimi pojavi na za ta namen pripravljeni geodetski podlagi.

Tradicionalne metode kartiranja in analiziranja geoloških podatkov so zelo dolgotrajne, poleg tega pa je končni rezultat še vedno večinoma omejen na dvo-dimenzionalni prikaz ali prikaze v različnih projekcijah. Na tak način je ustrezna vizualizacija in analiza prostorskih in časovnih podatkov otežena in zahteva od geologov, da razvijejo 3D ter pogosto tudi 4D (časovno) sliko v domišljiji ter jo nato prikažejo v obliki reprezentativnega modela, kot je blok diagram ali animacija. Ta način je subjektiven in temelji na spretnosti in sposobnosti posameznika (geoznanstvenika), da si predstavlja opazovane podatke in jih predstavi v obliki razumljivi ostalim.



Slika 8: Primer tradicionalnega kartiranja plazov (Waggott, Clegg, Jones, 2005)

Vedno pogosteje pa tudi geologi izkoriščajo prednosti tehnologije digitalnega kartiranja in prikaza ter analiz v geografskih informacijskih sistemih. Nove tehnologije omogočajo hitro in natančno pridobitev podatkov in zagotavljajo dodatno pomembno prostorsko informacijo z omogočenim prikazom različnih tipov podatkov istočasno. Podatki pa so še vedno v splošnem analizirani in prikazani v 2D orodju. Idealno za geologe bi bilo orodje za interpretacijo 3D topografije in prostorske geometrije v digitalnem formatu, ki je lahko prikazan in interpretiran kot resnični, v treh dimenzijah na računalniški delovni postaji ali prenosnem računalniku z dodatno prednostjo visoko razvitega procesiranja podatkov in vizualizacijskih algoritmov.

### 2.5.2 Vloga geodezije pri monitoringu plazov

Geodetska stroka ima pri monitoringu plazov vsaj dve pomembni nalogi:

- detajlni posnetek plazov
- opazovanje premikov.

V primeru posnetka stanja gre za pridobitev podatkov o lokaciji plazov, njegovem obsegu, smeri premikanja, volumnih in masi plazovine ter izvedenih podatkih kot so vertikalni in prečni profili, izohipsne karte, nakloni in podobno. Hitre in kvalitetne geodetske obdelave podatkov v veliki meri vplivajo na uspešnost prvih nujnih ukrepov na plazov.

Geodetske metode, primerne za metrično dokumentiranje plazov, so:

- geodetske metode, ki jih uporabljamo za določevanje koordinat manjšega števila posameznih točk (velika natančnost določitve koordinat):
  - klasične geodetske meritve (tahimetrične meritve)
  - GPS meritve
- geodetske brezkontaktne metode za masovne zajeme (v kratkem času lahko izmerimo veliko število točk):
  - fotogrametrične metode
  - lasersko skeniranje
- druge geodetske metode:
  - satelitska snemanja.

Vsaka izmed teh metod ima svoje prednosti in slabosti. Najbolj pogosto uporabljene metode pri nas so zaenkrat:

- klasične geodetske meritve (tahimetrija) in
- fotogrametrične metode.

Klasičen izdelek je detajlni načrt plazju. Izdelajo se prečni in vzdolžni profili, ki segajo čez peto in čez zgornji odlomni rob plazju, da je razvidna celotna situacija pobočja.

Postopek:

- Na plazju se označijo značilne točke s količki (zabitimi ali zabetoniranimi v plazino). Količke postavimo enakomerno po celotni plazini in ob značilnih pojavih (razpoke). Postavimo jih tudi v neposredno okolico plazju.
- Nasproti plazju ali ob robovih izberemo stojišča in jih stabiliziramo. Pomembno je, da te točke niso na območju plazenja.
- Izvedba meritev.
- Analiza meritev – površina, izohipse, vektorski premiki točk površine.
- Ponovitev meritev v časovno enakomernih presledkih.

Postopek je v primeru klasičnih in fotogrametričnih meritev podoben. Pomembna razlika je v tem, da je v primeru klasičnih meritev z geodetskimi inštrumenti ob uporabi tarč na merilnih mestih, gibanje na območju plazju lahko zelo nevarno ali v primeru razmočenih in aktivnih zemeljskih plazov, celo nemogoče.

Za analizo in napoved napredovanja plazenja je izredno pomembno, da poznamo spremembe na plazju v odvisnosti od časa. Opazujejo se predvsem naslednje spremembe:

- vektorsko gibanje plazine navzdol z opazovanjem številnih površinskih točk na telesu plazju
- nastanek razpok
- zgornji odlomni rob, novi odlomni robovi
- napredovanje masivnega roba
- spreminjanje vlažnosti površine.

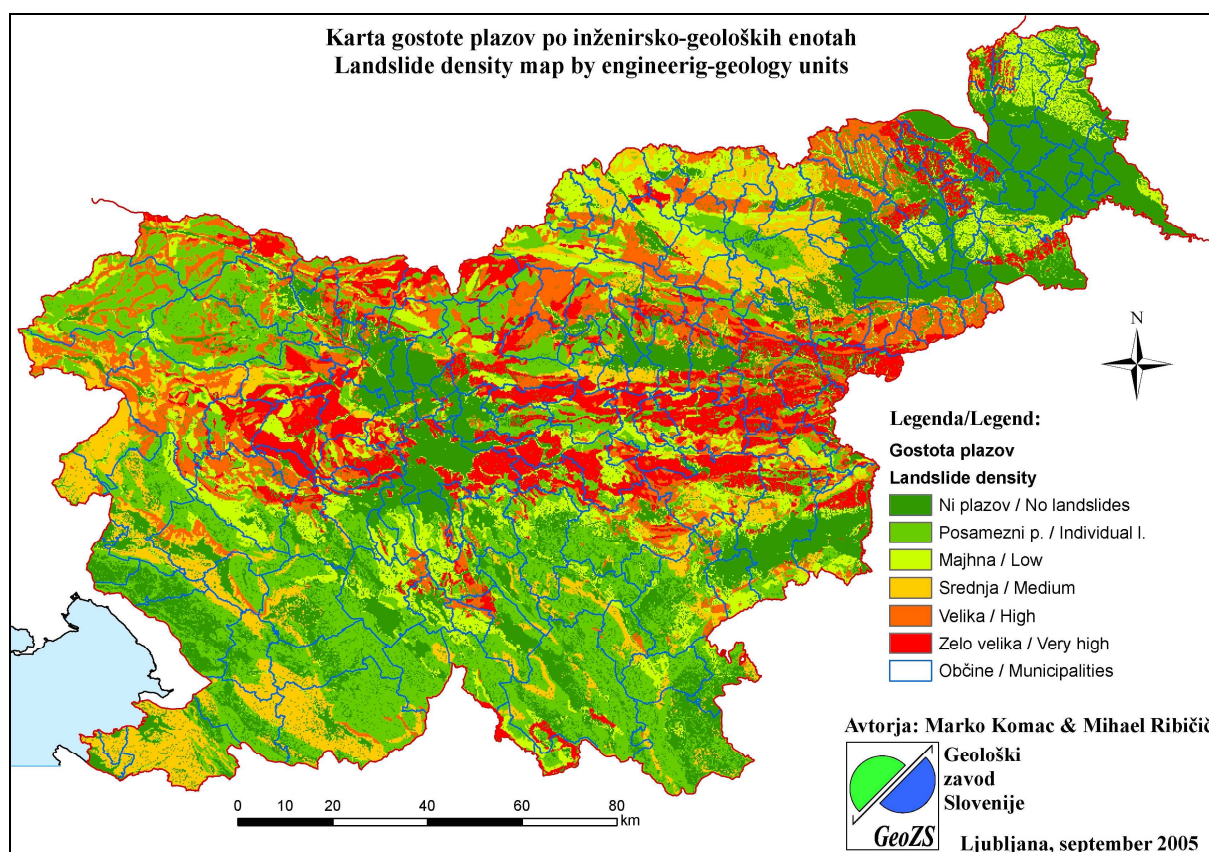


Analize izdelujemo na osnovi v času enakomernih ponovitev opazovanja plazov. Pogostost ponovitev je odvisna od želene natančnosti meritev in hitrosti plazenja.

V okviru te diplomske naloge je poudarek predvsem na posnetku stanja. Za analizo primernosti uporabe terestričnega laserskega skeniranja za opazovanje premikov bi bilo potrebno novo skeniranje istega območja plazov v kasnejšem času.

## 2.6 Pojav plazov v Sloveniji

V Sloveniji je pojav plazov precej pogost. To dejstvo najlažje in najbolj očitno prikažemo na kartah. Slika 9 prikazuje karto gostote plazov pridobljeno z analizo števila plazov glede na posamezne inženirsko-geološke enote v Sloveniji (Komac et al., 2005).



Slika 9: Karta gostote plazov (Komac et al., 2005)

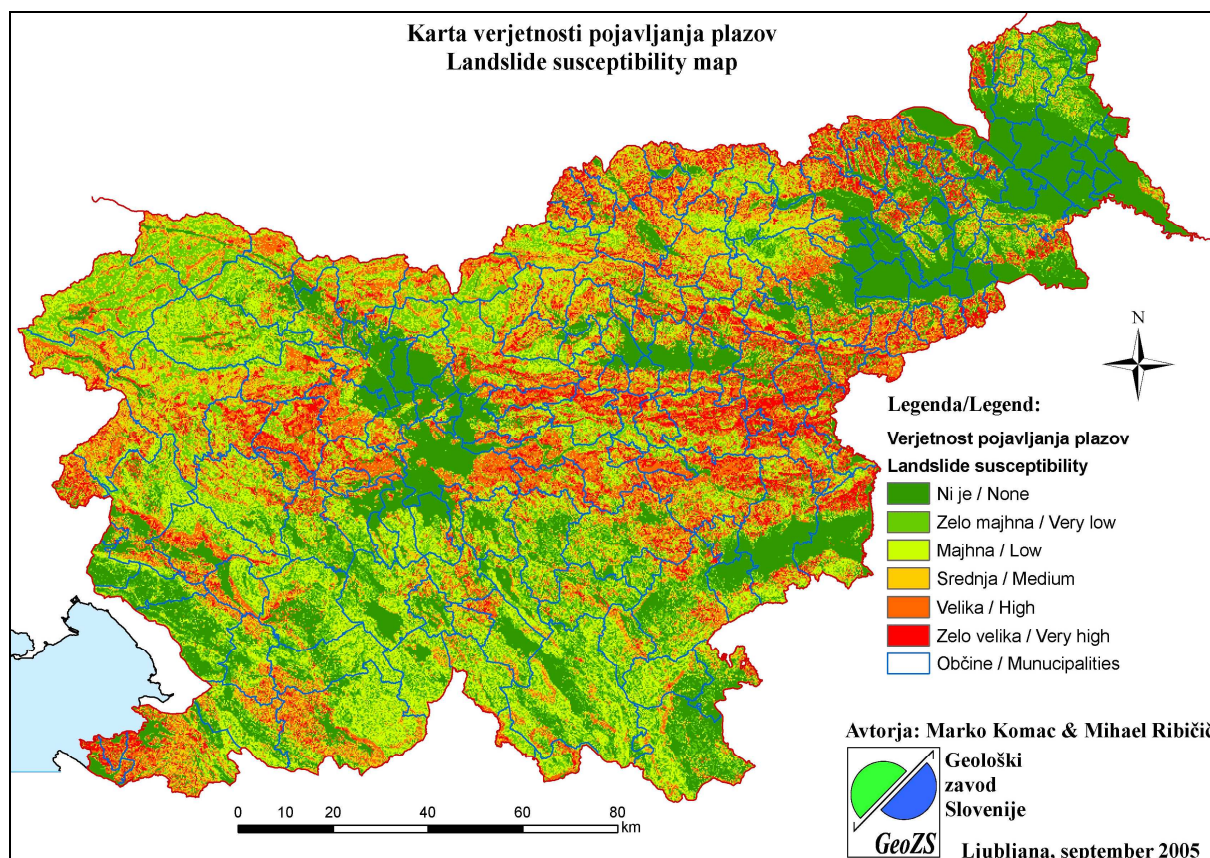
Slika 10, prikazuje karto verjetnosti pojavljanja plazov v Sloveniji. V projektu CRP - "Novelacija in nadgradnja informacijskega sistema o zemeljskih plazovih in vključitev v bazo GIS\_UJME" (Komac et al., 2005) je bilo ugotovljeno, da:

- Območja, kjer je verjetnost pojavljanja plazov zelo velika pokrivajo slabih 7% Slovenije.
- 17% države pripada območjem, na katerih je pojavljanje plazov veliko in
- 10% območjem, kjer je verjetnost pojavljanja plazov srednje velika.

Vsa tri območja skupaj predstavljajo dobro tretjino površine Slovenije, kjer je pričakovati pogostejše pojavljanje plazov kot drugje.

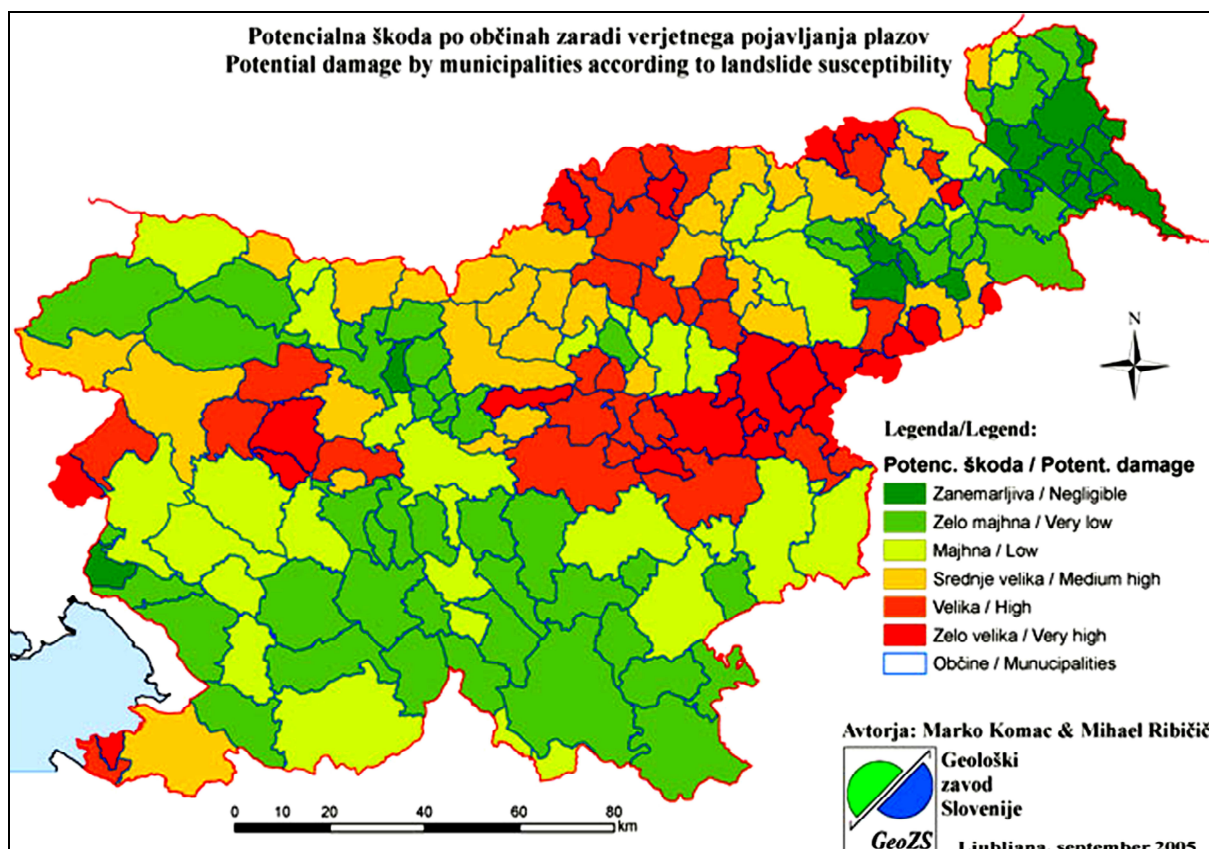
- 28% Slovenije pripada "ravnim" območjem oz. območjem z naklonom pod 5°. Na teh območjih se zaradi velikega merila vhodnih podatkov (1 : 250.000) pojavlja dobrih 5% plazov, ki so bili pri analizah obravnavani kot napaka. Pri manjših merilih analiz bi se verjetno območja nastanka teh plazov izkazala za potencialno plazovita.
- 21% Slovenije pripada območjem z majhno verjetnostjo plazov in
- 17% območjem z zelo majhno verjetnostjo plazov.

Porazdelitev prebivalstva po razredih verjetnosti pojavljanja plazov nakazuje na zanemarjanje naravnih pogojev pri izbiri življenjskega okolja.



Slika 10: Karta verjetnosti pojavljanja plazov (Komac et al., 2005)

Plazovi povzročajo veliko škode: zasipavajo, poškodujejo in odnašajo cestišča, hiše in kmetijska poslopja, spreminjajo vodne struge ter nenazadnje ugašajo tudi življenja. Grobo oceno stopnje potencialne škode po občinah prikazuje slika 11.



Slika 11: Karta potencialne škode zaradi verjetnega pojavljanja plazov (Komac et al., 2005)

Glede na to, kako pogost je pojav plazov v Sloveniji in koliko škode lahko povzroči, sta vsaka pozornost temu pojavu in poskušanje izboljšanja stanja dobrodošla.

### **3 TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE**

V Sloveniji so za snemanje plazovitih območij uporabili že marsikatero geodetsko metodo izmere. Terestrično lasersko skeniranje pa po mojem vedenju še ni bilo temeljito preizkušeno. Njegovi največji prednosti, ki že na daleč kažeta na uporabnost za takšne in podobne primere, je hitrost izvedbe in zmožnost skeniranja iz razdalje brez uporabe reflektorjev. To odstrani pomemben vpliv nevarnosti, ki so ji izpostavljeni strokovnjaki pri gibanju po plazovitem terenu.

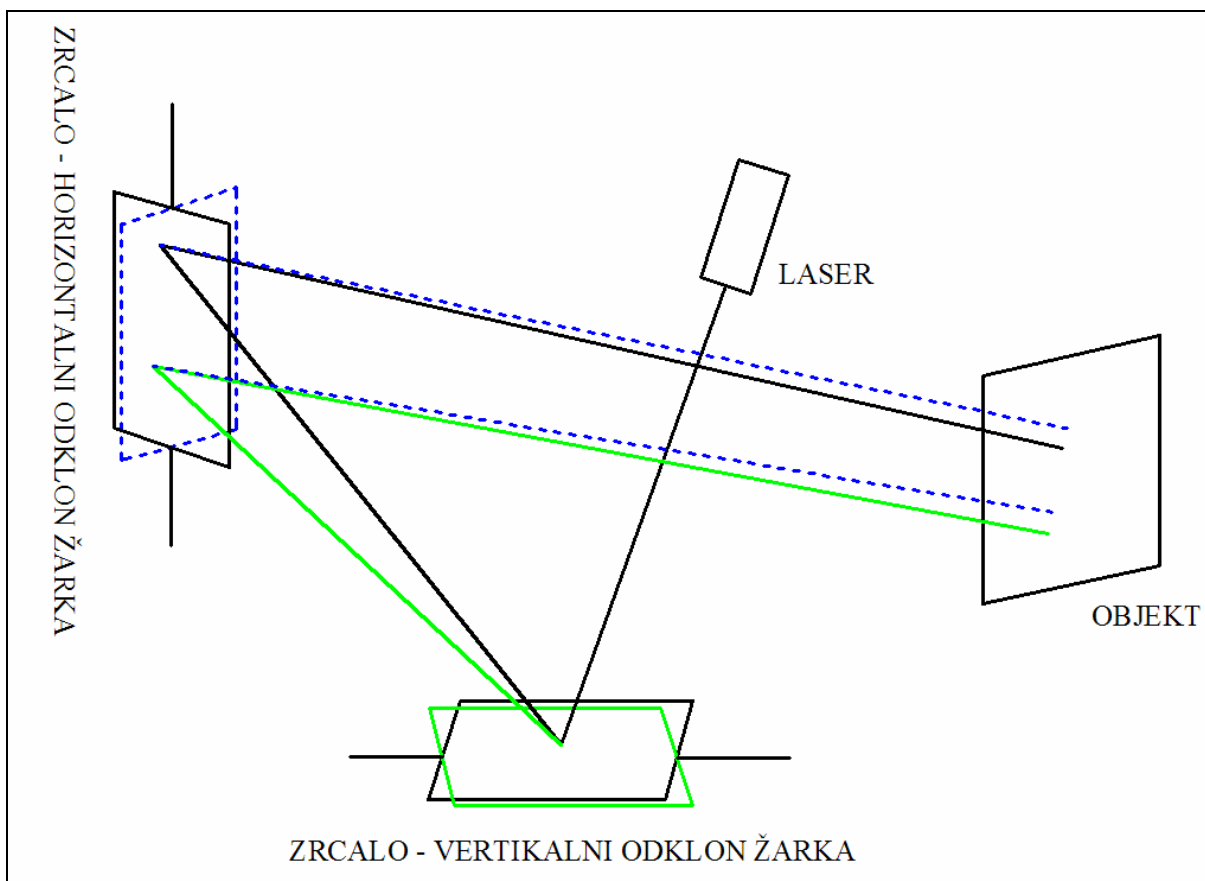
V tem poglavju je opisana tehnologija terestričnega laserskega skeniranja, inštrumentarij, ki ga pri tem potrebujemo, način izvedbe terenskega zajema ter prednosti in slabosti, ki jih tehnologija prinaša.

#### **3.1 Opredelitev tehnologije**

Terestrično lasersko skeniranje zagotavlja celovito zajemanje prostorskih podatkov. Deluje na principu laserskega žarka, s pomočjo katerega določimo obliko, velikost in položaj objektov v prostoru. Oddani laserski impulzi potujejo po celotnem obravnavanem objektu ter se od njega odbijajo nazaj k instrumentu. Razdalja med sprejemnikom in obravnavano točko se izračuna na osnovi časovnega intervala potovanja signala od oddajnika do sprejemnika ali meritve faznih razlik ali trikotniške mreže. Skeniranje je izvedeno z enim ali dvema gibljivima zrcaloma, ki omogočata zelo majhne spremembe v odklonskem kotu laserskega žarka, projeciranega na površino objekta. Na prenosnem računalniku se beleži odklonski kot zrcal in poševna razdalja med 3D laserskim skenerjem in skeniranim objektom. Delovanje rotirajočih zrcal prikazuje slika 12.

Za uspešno skeniranje mora biti izpolnjen osnovni pogoj, da skenirana površina odbija lasersko svetlobo. Odbojne lastnosti posameznih objektov so poleg valovne dolžine laserskega žarka odvisne tudi od vrste materiala in hrapavosti površine. Tako bo recimo bel papir, les, sneg ter apnenec v veliki meri (od 75% do 100%) odbil lasersko svetlobo, asfalt s kremenjakom, lava, črn neopren pa veliko manj (od 5% do 17%). Na območjih, kjer so

površine, ki slabo odbijajo lasersko svetlobo nastajajo območja brez točk, t.i. »črne luknje«. Ob skeniranju se laserska svetloba odbija tudi od okoliških objektov in ne le od skeniranega objekta, zato dobimo t.i. »odvečne točke« v oblaku točk, ki jih odstranimo s posebnimi programi ali ročno.



Slika 12: Način delovanja rotirajočih zrcal

Rezultat skeniranja je množica prostorskih točk. Z oblakom točk zagotovimo visoko stopnjo geometrične popolnosti in detajla terena oz. objekta in zmanjšamo stroške ponovnih vračanj na teren in dodatnih izmer. Vse točke v oblaku točk imajo pripadajoče 3D koordinate (x, y, z) v skenerjevem koordinatnem sistemu z izhodiščem v skenerjevem centru. Večje objekte, kot so npr. kamnolomi, deponije, plazovi..., je potrebno skenirati po delih, z več stojišč. Rezultat laserskega skeniranja je več skenogramov, ki jih je potrebno v fazi obdelave združiti v eno celoto – en 3D model.

## 3.2 Skenerji

3D laserski skener je naprava, ki na osnovi opravljenih meritev omogoča izračun prostorskih koordinat točk skeniranega objekta:

- samodejno in v sistematičnem vzorcu,
- z veliko hitrostjo delovanja (100 do nekaj 100 000 točk na sekundo),
- skoraj v stvarnem času (angl. real – time).

Obstaja veliko vrst terestričnih laserskih skenerjev. Nekateri so bolj primerni za uporabo v zaprtih prostorih za srednje razdalje (maksimalno do 100 m) drugi pa za odprte prostore in daljše razdalje. Razlikujejo se po natančnosti, dosegu merjenja in hitrosti pridobivanja podatkov. Univerzalni skener, ki bi ga lahko uporabili v vseh mogočih aplikacijah, ne obstaja. Glede na namen skeniranja se odločimo za tip skenerja.

Glede na način merjenja razdalje delimo terestrične 3D laserske skenerje na:

- skenerje z neposrednim merjenjem razdalj (angl. long range scanners),
- triangulacijske skenerje (angl. close and mid range scanners).

### Skenerji z neposrednim merjenjem razdalj ("ranging" skenerji)

- Impulzni skenerji:

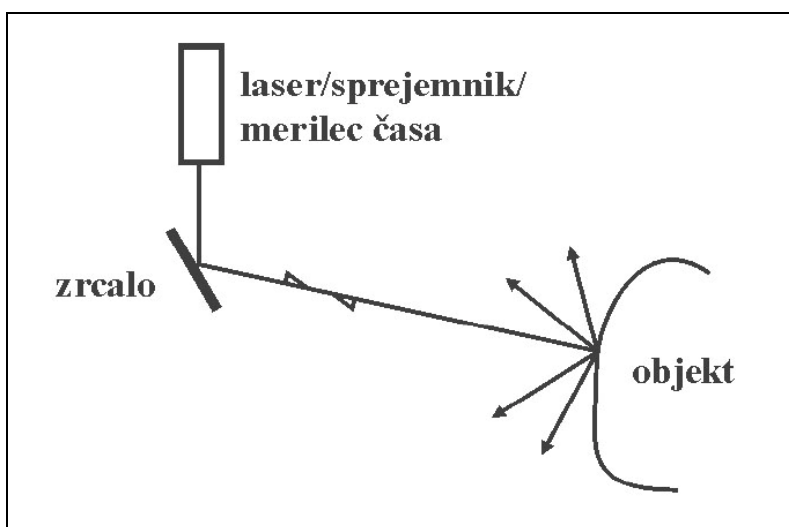
Večina laserskih skenerjev deluje po principu TOF (time of flight) – na osnovi metode časovnega intervala potovanja elektromagnetnega valovanja med začetno in končno točko. Skenerji uporabljajo majhne rotirajoče naprave za kotno odklanjanje žarka (eno ali dve zrcali). Za izračun razdalje uporabljajo preproste algoritme, kar lahko vodi do slabše natančnosti (približno 1 cm). Ta tehnika dovoljuje merjenje razdalj do nekaj 100 m. Celo razdalje do km so dosegljive (Mensi, Riegl).

- Fazni skenerji:

Drugo, prav tako pogosto tehniko, predstavljajo laserski skenerji, ki delujejo na osnovi metode primerjave faze oddanega in sprejetega moduliranega signala. Zaradi podrobnejše analize signala so rezultati določitve razdalje natančnejši (do nekaj mm). Zaradi zahtevane

jakosti odbitega valovanja se lahko zgodi, da imajo takšni skenerji zmanjšan doseg delovanja. Razdalja je omejena do 80 m (Zoller+Froehlich, IQSun).

S skenerji z neposrednim merjenjem razdalj lahko delamo na večji oddaljenosti od objekta, kot s skenerji, ki delujejo na osnovi triangulacije. To je tudi glavni razlog, da se uporabljajo v primeru snemanja plazov.



Slika 13: Način delovanja "ranging" skenerja (Mozetič, 2004)

### Triangulacijski skenerji

Obstajajo tudi laserski skenerji, ki merijo razdalje do nekaj m, vendar so bolj primerni za uporabo v industriji. Svetlobni žarek, ki ga odda laserski izvor, se projecira na površino objekta. Položaj točke na objektu se registrira s CCD kamero. Osnovni način delovanja je zelo preprost. Laserski žarek je proti objektu usmerjen pod določenim kotom, medtem ko je dolžina baze znana iz kalibriranja 3D laserskega skenerja. Razdalja od instrumenta do objekta je izračunana iz kota in dolžine baze. Obstajata tehnični rešitvi z eno ali dvema CCD kamerama. Skenerji triangulacijskega tipa dosežejo natančnost določevanja prostorskega položaja točke okrog mm pri razdaljah krajših od 2 m. Natančnost je lahko tudi mnogo boljša. Odvisna je od dolžine baze skenerja in oddaljenosti skeniranega objekta.



### 3.2.1 Osnovni elementi laserskih skenerjev

#### Natančnost laserskih skenerjev

Natančnost ni vedno najpomembnejša zahteva pri odločitvi, kateri skener je optimalen za določeno nalogo. Natančnost določitve prostorskih koordinat skenirane točke je odvisna od natančnosti določitve razdalje in natančnosti kotnih meritev.

Skenerji glede na doseg	Natančnost določitve položaja točke
Skenerji za kratke razdalje <b>do 10 m</b> triangulacijski skenerji	$\pm 0.1$ mm ali več (pri razdaljah pod 1 m); $\pm 0.5$ mm (pri 2 m)
Skenerji za srednje razdalje <b>od 10 do 100 m</b> triangulacijski skenerji	$\pm 2$ mm pri 10 m
Skenerji za večje razdalje <b>100 m in več</b> impulzni in fazni skenerji – TOF skenerji	nekaj mm do nekaj cm

#### Hitrost skeniranja

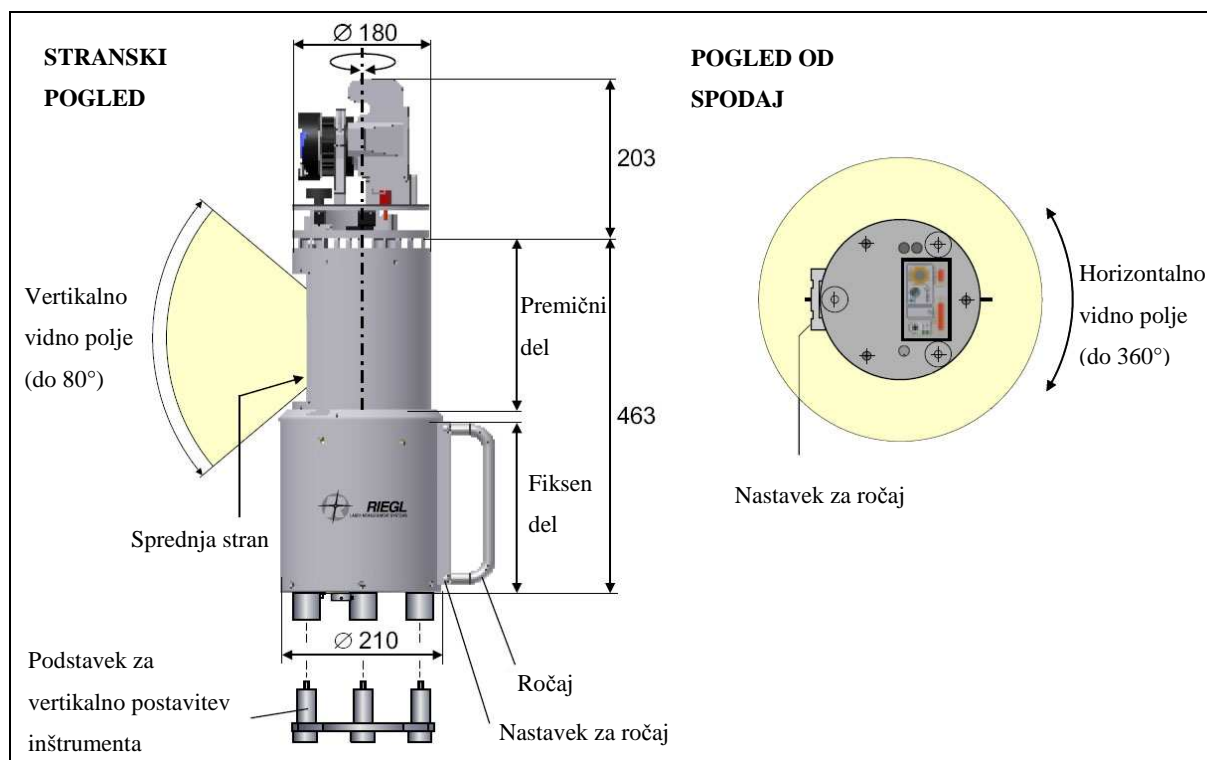
Kljub veliki hitrosti zajemanja podatkov lahko terestrično lasersko skeniranje postane časovno potraten postopek, kadar je potrebna velika gostota točk za doseganje visoke ločljivosti zajetega objekta. Hitrost zajemanja 100 točk na sekundo lahko še vedno obravnavamo kot počasno skeniranje. Hitrost 10 000 točk na sekundo je zadovoljiva v večini primerov. Čas skeniranja je odvisen od gostote skeniranja in območja zajema. Stolpci so izmerjeni hitreje kot vrstice, zato je območje zajema, ki je bolj visoko kot široko, hitreje izmerjeno kot območje, ki je bolj široko kot visoko. Iz tega pa ne smemo sklepati, da bomo za izvedbo projekta potrebovali 10-krat manj časa, saj večino časa, ki ga porabimo za ostale operacije (prevoz, priprava opreme, meritve kontrolnih točk, premikanje s stojišča na stojišče...), ne moremo skrajšati.

## **Doseg**

Podatki iz prospektov proizvajalcev o dosegu skenerja niso vedno zanesljivi. Doseg 3D laserskih skenerjev je namreč zelo odvisen od odbojne površine skeniranega objekta, čistosti atmosferskega zraka, difuzne svetlobe (odbita sončna svetloba ali svetloba iz drugih virov) in motečih virov v bližini objekta. Na splošno so impulzni skenerji z neposrednim merjenjem razdalje, ki delujejo na osnovi merjenja časovnega intervala, manj občutljivi kot fazni in triangulacijski skenerji, ki zahtevajo meritve v temi.

## **Vidno polje**

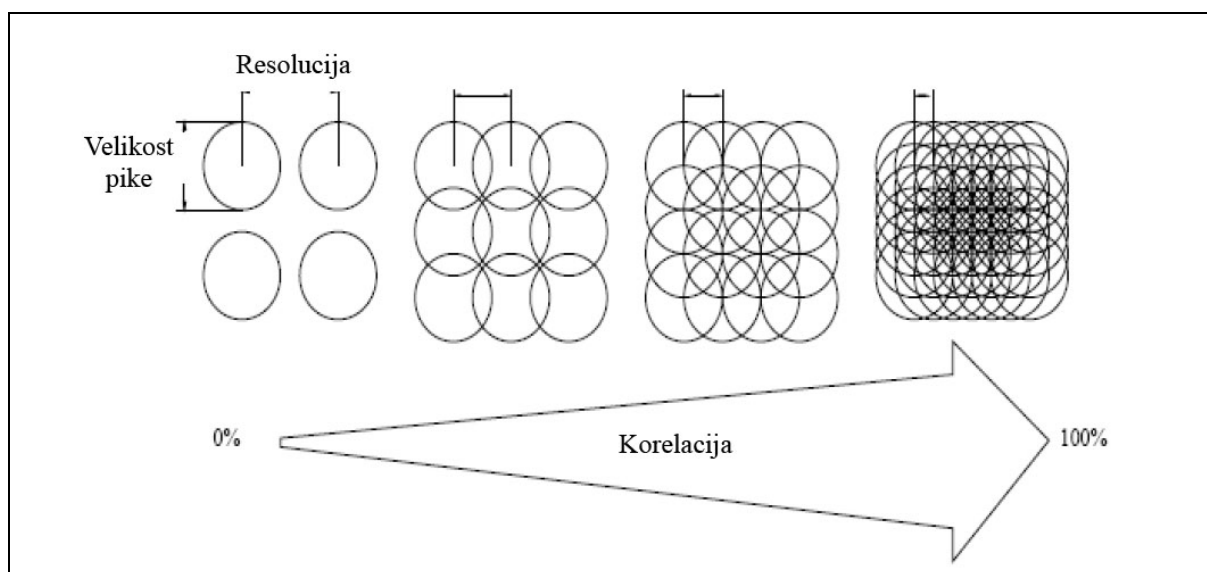
Velikost vidnega polja, ki ga razdelimo na vodoravno in navpično sestavino, je odvisna od izvedbe 3D laserskega skenerja. Fiksni 3D laserski skenerji, ki nimajo možnosti samodejne rotacije okrog osi med skeniranjem, imajo zato manjše vidno polje, saj je omejeno z zgradbo snemalne glave. Običajno lahko skenirajo vidno polje  $40^\circ \times 40^\circ$  (Cyrax 2500). 3D laserski skenerji z eno rotacijsko osjo pokrijejo območje  $46^\circ \times 320^\circ$  (Mensi S25), medtem ko skenerji z dvema rotacijskima osema pokrijejo območje  $360^\circ \times 180^\circ$  (Callidus PS 3200), kar pomeni, da je vidno polje omejeno le v stožcu  $30^\circ$  okrog nadirja. Velikost vidnega polja je pomembna pri skeniranju v zaprtih prostorih, kjer lahko iz enega samega stojišča brez posredovanja operaterja skeniramo ves prostor. Panoramski skenerji se obračajo okrog vertikalne osi inštrumenta in zajemajo točke v vertikalnih profilih.



Slika 14: Vidno polje 3D laserskega skenerja (Riegl laser measurement system– spletna stran, 20.04.2007)

### Gostota skeniranja in velikost pike

Gostota točk na objektu je teoretično funkcija velikosti kotnega zasuka zrcala, ki usmerja laserski žarek. V praktični uporabi je ločljivost odvisna od divergence laserskega žarka, saj velikost laserske pike na objektu omejuje lokalno gostoto točk. Če je potrebna velika gostota točk, je potrebno preveriti, kako dobro je izostren žarek in če postopek samodejnega ostrenja deluje za različne oddaljenosti. Gostota skeniranja 3D laserskih skenerjev z enim zrcalom (Callidus) je odvisna od kotnega zasuka zrcala, ki omogoča navpično odklanjanje laserskega žarka in od kotnega zasuka merilne glave, ki omogoča vodoravne premike laserskega žarka. Pri 3D laserskih skenerjih z dvema zrcaloma je gostota skeniranja odvisna le od kotnega zasuka zrcal. Velikost laserske svetlobne pike je odvisna od natančnosti fokusiranja.



Slika 15: Rezolucija in velikost pike (Pflipsen, 2006)

### Registracija podatkov in tarče

V primeru obsežnejših objektov je nujno skeniranje iz več stojišč. Z vsakega stojišča dobimo oblak točk, ki ima svojo orientacijo, koordinatni sistem (skenerjev lastni koordinatni sistem) itd. S t.i. registracijo združimo skenograme (oblake točk) z različnih stojišč v en sam, skupen koordinatni sistem (projektni koordinatni sistem). Izvedena je lahko z istimi točkami na različnih skenogramih. Pri tem se uporabljajo posebne tarče, ki jih skenerjeva programska oprema bolj ali manj samodejno zazna. Te tarče imajo lastnost visoke odbojnosti in jih zato na skenih (oblakih točk) z lahkoto zaznamo. Tarče pa uporabimo prav tako za georeferenciranje - transformacijo 3D modela v državni koordinatni sistem. Položaj tarč zato določimo tudi s klasično geodetsko metodo (s pomočjo elektronskega tahimetra) ali z GPS meritvami.



Slika 16: Refleksijska cilindrična tarča in prizma za 3D lasersko skeniranje (Riegl measurement systems – spletna stran, 15.01.2007)

### 3.2.2 Princip delovanja

Sistem za terestrično lasersko skeniranje, ki smo ga v konkretnem primeru uporabili, sestavlja:

- visoko zmogljiv 3D laserski skener dolgega dosega,
- pripadajoči operacijski in procesni računalniški program ter
- kalibriran visokoločljivi digitalni fotoaparata.

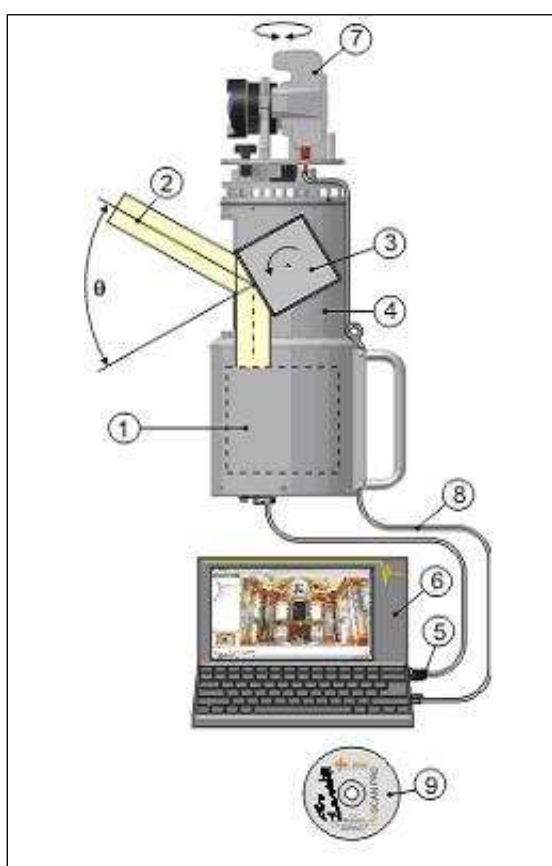
Laserski skener je robusten, prenosljiv senzor, oblikovan posebej za hitro pridobivanje visoko kakovostnih, trirazsežnih podatkov, tudi v najzahtevnejših pogojih.

Prenosni računalnik z ustrezno programsko opremo omogoča uporabniku takojšnje pridobivanje 3D podatkov na terenu.

S kombinacijo visoko zmogljivega laserskega senzorja in visokoločljivega digitalnega fotoaparata izkoristimo kombinacijo prednosti laserskega skeniranja in digitalne fotogrametrije. Fotoaparata se pričvrsti na vrh instrumenta in z njim lahko posnamemo celotno

območje, ki ga pokriva tudi laserski senzor. Ker sta pozicija in orientacija fotoaparata glede na skenerjev koordinatni sistem dobro definirana, vsaka slika predstavlja kalibriran in registriran posnetek. Posnetke uporabimo za določitev barvne vrednosti vsaki skenirani točki ali pa jih uporabimo kot visoko ločljive teksture na trianguliranih površinah izdelanih iz skenov.

Slika 17 prikazuje zgradbo sistema za terestrično skeniranje. Tak sistem smo v našem projektu uporabili za skeniranje plazu, zato je v nadaljevanju podrobneje opisan.



1. elektronika za iskanje oddaljenosti
2. vertikalni odklon laserskega žarka
3. poligon z refleksijskimi površinami
4. optična glava (horizontalni odklon)
5. vmesnik za prenos skeniranih podatkov v prenosni računalnik
6. prenosni računalnik
7. fotoaparata
8. vmesnik za prenos podatkov fotoaparata

Slika 17: Zgradba sistema za terestrično skeniranje (Riegl laser measurement systems – spletna stran, 5.10.2006)

Opis posameznih delov skenerja na sliki 17: Elektronika za iskanje oddaljenosti (1) 3D skenerja je optimizirana tako, da skener zagotavlja visoko hitrost skeniranja. To pomeni hitro ponavljajoče se lasersko oddajanje, hitro procesiranje signala in hiter podatkovni vmesnik.

Vertikalni odklon laserskega žarka (2) pri linijskem skeniranju je realiziran s poligonom (3) s številnimi refleksijskimi površinami. Za visoke hitrosti skeniranja in / ali za vertikalni kot skeniranja od  $0^\circ$  do  $80^\circ$ , poligonalno ogledalo zvezno rotira z ustrezno hitrostjo. Pri počasnem skeniranju in / ali pri majhnih kotih skeniranja pa ogledalo linearno niha navzgor in navzdol. Horizontalno skeniranje je zagotovljeno z rotacijo celotne optične glave (4) za  $360^\circ$ .

Skenirani podatki: dolžina, kot in amplituda signala, se prenesejo v računalnik (6) preko TCP/IP Ethernet vmesnika (5). Podatki fotoaparata (7) pa se prenašajo preko USB/fireware vmesnika (8).

RiSCAN PRO software (9) omogoča operaterju izvajanje velikega števila operacij vključno s konfiguracijo senzorja, zajem podatkov, vizualizacijo podatkov, manipuliranje s podatki in njihovo arhiviranje. Deluje na operacijskih sistemih WINDOWS XP, 2000 SP2 ali NT SP4.

### **3.3 Oblak točk**

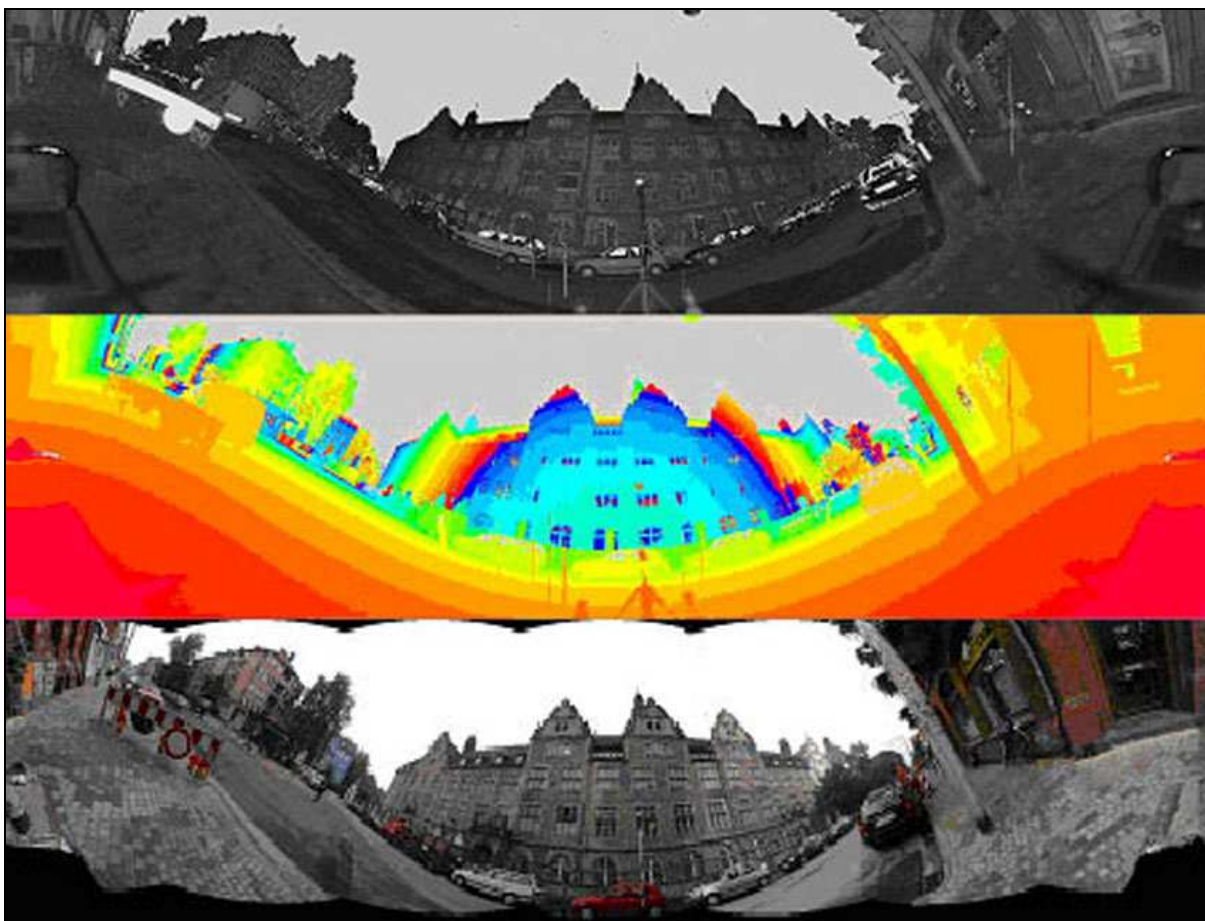
S skenerji, ki so namenjeni pokrivanju velikih območij, pridobimo štiri meritve za vsak impulz:

- dva kota,
- razdaljo in
- intenziteto odbitega impulza.

Pridobimo torej prostorski oblak točk skeniranega objekta, ki ga uporabnik z različno programsko opremo obdeluje za svoje namene. Vse točke imajo pripadajoče 3D koordinate (x, y, z) v skenerjevem koordinatnem sistemu z izhodiščem v skenerjevem centru. Več različnih oblakov točk združimo na osnovi najmanj treh identičnih veznih točk, označenih s posebnimi tarčami. Če želimo, da imajo točke v prostorskem oblaku točk podane koordinate v državnem koordinatnem sistemu, uporabimo oslonilne točke, ki imajo določene skenerjeve in državne koordinate, ki jih določimo z geodetskimi metodami.

Oblak točk je lahko obarvan glede na stopnjo odbojnosti, glede na oddaljenost točk ali pa kot RGB vrednosti. Na sliki 18 so lepo razvidni vsi trije prikazi.

Različni možni prikazi meritev olajšajo obdelavo točk ter pripomorejo tudi k bolj resničnemu pogledu na model.



Slika 18: Načini prikaza oblaka točk (Institute of cartography and geoinformatics – spletna stran, 20.02.2007)

### 3.4 Uporabnost v praksi

Možnosti uporabe oblaka točk so ogromne:

- oblake točk lahko poljubno obdelujemo in sicer izdelamo geodetske posnetke terena, trikotniške mreže ter izrišemo 2D prereze objektov,
- izračunamo lahko volumnne in površine,



- oblak točk lahko med skeniranjem obračamo in gledamo z različnih perspektiv in oddaljenosti,
- točke, ki smo jih zajeli na motečih objektih, lahko enostavno odstranimo,
- med različnimi točkami v oblaku lahko izvajamo meritve.

Prednosti 3D laserskega skeniranja kot tehnike za zajem podatkov so številne, tako za geodete, kot tudi za uporabnike:

- hiter zajem podatkov – velika hitrost delovanja (100 ali nekaj 100 000 točk/s),
- cenejši zajem podatkov o objektih in topografiji glede na ostale metode,
- zajem podatkov brez kontakta (primerno za skeniranje nevarnih objektov),
- pridobitev koordinat poteka samodejno in v sistematičnem vzorcu,
- koordinate skeniranega objekta pridobimo skoraj v realnem času,
- domeritve niso potrebne, saj so vsi objekti v vidnem polju 3D laserskega skenerja,
- oblake točk lahko uporabimo večkrat in za različne namene,
- večja varnost pri zajemu podatkov,
- upravljanje skenerja možno preko enega samega operaterja,
- enostavnost povezovanja z obstoječimi geodetskimi informacijami,
- visoko natančni digitalni modeli terena,
- produkcija "barvnih" oblakov točk,
- kvaliteto zajema je mogoče preveriti že na terenu.

Slabosti 3D laserskega skeniranja:

- razmerje med porabljenim časom za skeniranje in pisarniško obdelavo 1:3 do 1:5, (lahko znaša tudi več, celo do 1:30, odvisno od naloge, zahtevnosti skeniranja, velikosti in celovitosti objekta ter želenega končnega rezultata)
- kakovostna programska oprema,
- skenirana površina vedno ne zagotavlja zadostnega odboja laserske svetlobe,
- skenogram vključuje šume, zaradi odboja od drugih objektov.

Naketere slabosti uspešno odpravlja fotogrametrija, zato sta ti dve tehniki zajema prostorskih podatkov med seboj komplementarni.

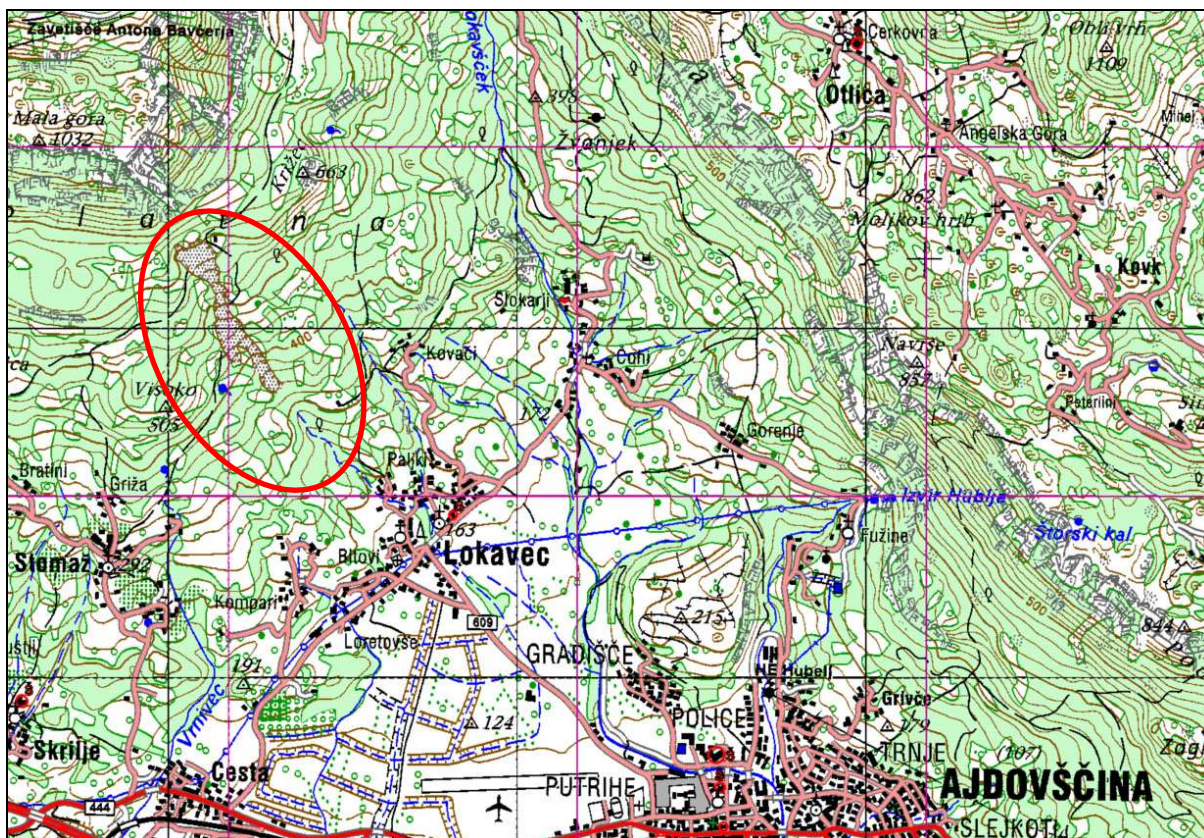
## **4 POSNETEK PLAZU**

Za konkreten primer preizkusa je bil izbran plaz na območju občine Ajdovščina – plaz Slano blato. Zaradi obsežnosti območja smo se omejili samo na njegov zgornji del. S terestričnim laserskim skenerjem smo skenirali celoten zgornji del plazu. Del plazu pa smo posneli tudi s klasičnim geodetskim inštrumentom - elektronskim tahimetrom, z namenom primerjave rezultatov.

V tem poglavju je na kratko opisan potek dela na terenu za obe metodi, ki sta bili uporabljeni za metrično dokumentiranje plazu. Opisana je tudi primerjava metod in analiza rezultatov, pridobljenih s terestričnim laserskim skenerjem.

### **4.1 Plaz Slano blato**

Plaz Slano Blato je plaz, ki so ga registrirali že pred 200 leti. Nahaja se nad vasjo Lokavec pri Ajdovščini, pod Čavnom in Malo goro, na pobočju, ki ga režejo številni potoki in hudourniške grape. Premika se po potoku Grajšek proti naselju Lokavec. Plaz Slano Blato je plaz izrednih dimenzij, dolg okoli 1300 m in širok med 250 in 70 m (Ribičič, 2002c). Slika 19 prikazuje geografsko lego plazu Slano blato.



Slika 19: Geografska lega plazu Slano blato

Na plaz lahko gledamo z različnih vidikov. Lahko ga obravnavamo kot:

- posamezen plaz izrednih dimenzij, sestavljen iz plazu na zgornjem delu in viskoznega blatnega toka
- večje število sekundarnih posameznih plazov ali viskoznih blatnih tokov, ki lokalno nastajajo iz "razlite" plazine na celotnem območju grape Grajšček
- potencialno akumulacijo za nastanek hitrih tekočih blatnih tokov.

#### Osnovne lastnosti plazu Slano Blato:

- Stanje: fosilni, aktivni
- Sprožitev: november 2000
- Vrsta: viskozni blatni tok

- Vzrok: padavine, zamakanje na stiku apnenec – fliš
- Velikost: 20 ha, dolžina = 1300 m
- Hitrost premikanja: srednje hiter – nekaj 10 m/dan (do 90 m/dan)
- Vrsta premikanja: tečenje



Slika 20: Del plazov, ki smo ga skenirali

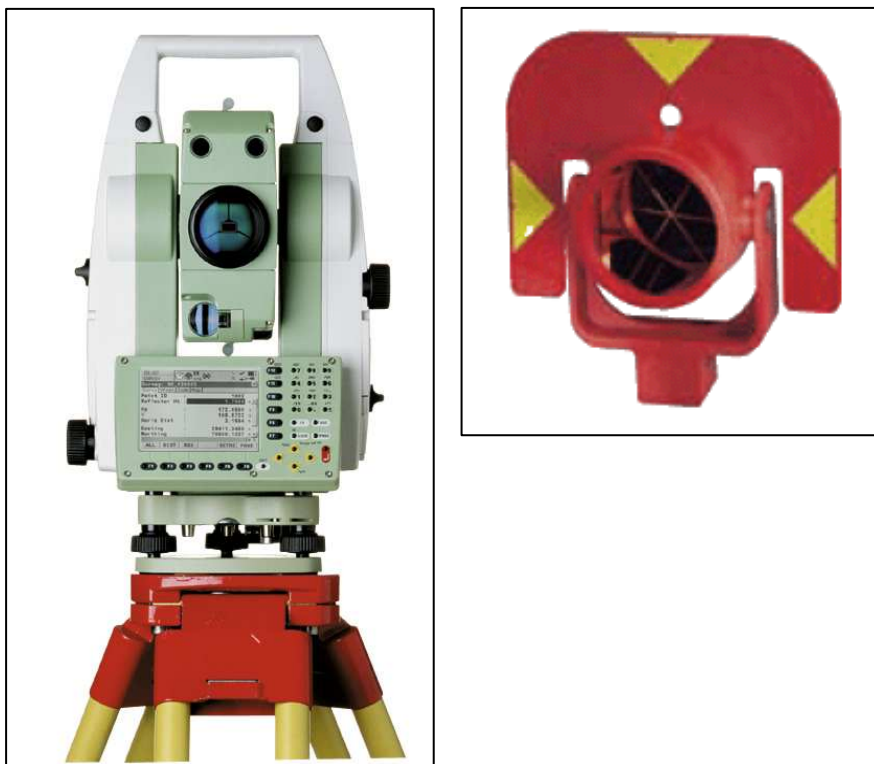
## 4.2 Klasična geodetska metoda

Kot je bilo že v uvodu tega poglavja povedano, smo, z namenom primerjave natančnosti, del plazov posneli s klasično geodetsko metodo. Klasičen elektronski tahimeter je v geodetski stroki pogosto uporabljen, zato osnovne podrobnosti tukaj ne bodo opisane. Posebnost elektronskega tahimetra, ki smo ga uporabili, pa je zmožnost, da podatke izmerimo brez uporabe reflektorja, kar je podobno laserskemu skeniranju.

### Terenska oprema:

- elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300 (slika 21, levo)
- prizma Leica GPR111 (slika 21, desno)

*Opomba: stativ ni bil potreben, saj je bil inštrument v času snemanj nameščen na betonski steber (prisilno centriranje)*



Slika 21: Elektronski tahimeter Leica TCRP1201 R300 in prizma Leica GPR111 (Leica geosystems – spletna stran, 20.02.2007)

Pri merjenju dolžin inštrument uporablja vidni rdeči laser (class 3R) s koaksialno optiko.

### **Tehnične značilnosti inštrumenta Leica TCRP1201 R300**

- Standardna deviacija za merjene Hz in V kote znaša 1" (ISO 17123-3).
- Standardna deviacija merjene dolžine brez uporabe reflektorja znaša:  
Za dolžine od 0 – 500 m = 3 mm + 2 ppm, čas merjenja posamezne točke = 3 - 6 s  
Za dolžine > 500 m = 5 mm + 2 ppm, čas merjenja posamezne točke = 3 - 6 s

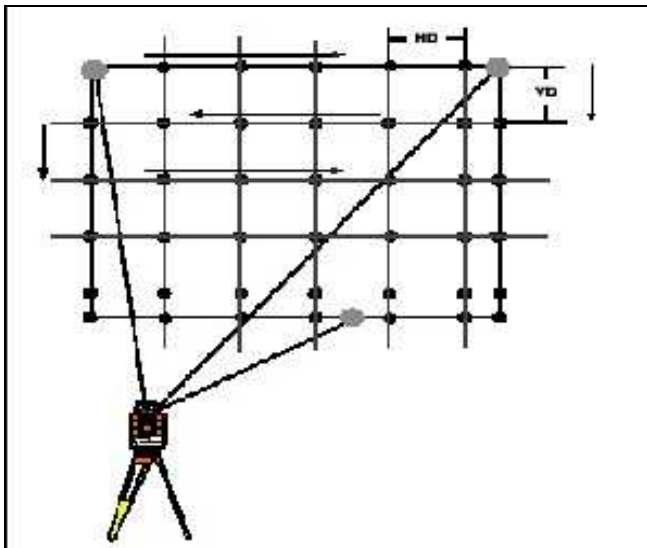
### **Opis metode in poteka merjenja:**

Pri konkretni nalogi klasične izmere površine terena na plazu Slano blato je šlo za tahimetrično snemanje detajlnih točk terena. Uporabljena je bila polarna metoda določitve prostorskih koordinat posamezne detajlne točke v državnem koordinatnem sistemu. Polarna metoda detajlne izmere pomeni izračun koordinat detajlnih točk na osnovi direktno merjenih relativnih prostorskih polarnih koordinat detajlnih točk. Koordinatni sistem določata stojišče inštrumenta (steber pri vходу na gradbišče, prisilno centriranje inštrumenta) in ena ali več orientacijskih smeri oz. v konkretnem primeru smer na dano točko (steber na nasprotni strani, prisilno centriranje reflektorja). Za orientacijsko smer smo vizirali na orientacijsko točko v obeh krožnih legah inštrumenta, s čimer smo odpravili vpliv kolimacijskega pogreška.

Položaj detajlne točke je določen na podlagi istočasnega merjenja horizontalnega kota, zenitne razdalje in poševne dolžine do detajlne točke.

Z možnostjo direktnega merjenja dolžin in uporabo programskega modula ("Face Scan") vgrajene programske opreme lahko dejansko skeniramo izbrano površino terena. Inštrument ima možnost avtomatične izmere površja znotraj vnaprej določenega okna, definiranega s tremi točkami, kot to prikazuje slika 22. Glede na oddaljenost izbrane površine od inštrumenta ter reflektivnih lastnosti površine je predviden čas izmere posamezne točke 3 – 6 s. To

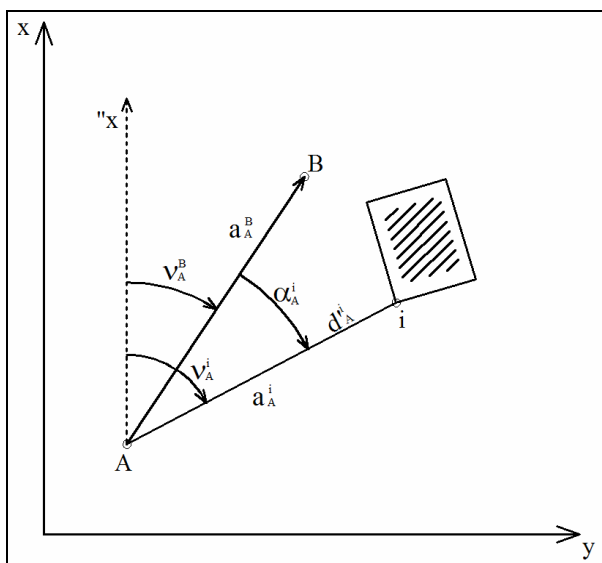
pomeni, da lahko v eni uri zajamemo cca. 1000 detajlnih točk terena. Reflektivnost površine terena na plazu Slano blato ni bila najboljša, zato smo v eni uri dejansko izmerili manj točk.



Slika 22: Prikaz definicije površja, ki naj bo zajeto (Lambrou, Pantazis, 2006)

Poleg detajlnih točk so bile izmerjene tudi nekatere tarče, ki so bile uporabljene pri laserskem skeniranju. Izmerjene so bile klasično z viziranjem v sredino valja. Kasneje pri izračunu pa je bil merjeni dolžini prištet radij valja, tako da je bil določen položaj sredine tarče.

Polarna metoda izmere:



Legenda k sliki:

A – stojiščna točka,

B – orientacijska točka

i – detajlna točka,

$d_A^i$  - izmerjena poševna dolžina med stojiščem in detajlno točko,

$v_A^i$  - izmerjena zenitna distanca do detajlne točke,

$a_A^i, a_A^B$  - izmerjene smeri.

Slika 23: Princip polarne izmere detajla.

### **Izračun:**

Izračun horizontalne dolžine:

$$d_A^i = d_A^i \cdot \sin z_A^i$$

Izračun smernega kota:

$$\nu_A^i = \nu_A^B + (a_A^i - a_A^B)$$

$$\alpha_A^i = (a_A^i - a_A^B)$$

Izračun ravninskih koordinat detajlne točke:

$$y_i = y_A + d_A^i \cdot \sin \nu_A^i$$

$$x_i = x_A + d_A^i \cdot \cos \nu_A^i$$

Izračun višine detajlne točke:

$$H_i = H_A + d_A^i \cdot \cos z_A^i + i - l$$



### 4.3 Lasersko skeniranje

V tretjem poglavju je o tehnologiji laserskega skeniranja že veliko napisanega. Opisane so tudi osnovne značilnosti laserskih skenerjev ter princip delovanja inštrumenta, ki smo ga uporabili v primeru skeniranja plazu Slano blato. To je razlog, da so v tem poglavju opisane zgolj tehnične značilnosti ter metoda in potek merjenja na terenu.

#### Terenska oprema:

- laserski skener Riegl LMS Z420i in akumulator (slika 24, levo)
- prenosni računalnik in dodatna baterija
- digitalni fotoaparati Nikon D200 (slika 24, desno)
- stativi
- tarče na stojalu (slika 24, sredina).



Slika 24: Inštrumentarij za lasersko skeniranje (Riegl laser measurement systems – spletna stran, 20.02.2007)

## **Tehnične podatki inštrumenta Riegl LMS (Laser Measurement Systems) Z420i:**

### **Podatki o razdaljemeru**

Zaščitni razred za oči po IEC60825-1:2001 razred 1

Meritveni doseg:

Za naravne tarče,  $\rho \geq 80\%$  do 1000 m

Za naravne tarče,  $\rho \geq 10\%$  do 350 m

Minimalni doseg 2 m

Natančnost meritev  $\pm 10$  mm (ena meritev)

$\pm 5$  mm (povprečno)

Ločljivost  $\pm 5$  mm

Hitrost meritev do 12000 točk/s – nižja natančnost

do 8000 točk/s – višja natančnost

Valovna dolžina laserja blizu infra rdeče

Divergenca žarka 0.25 mrad

### **Podatki o skenerju**

*Vertikalno snemanje*

Območje skeniranja 0° do 80°

Mehanizem skeniranja oscilirajoče/rotirajoče ogledalo

Hitrost skeniranja 1 sken/s do 20 skenov/s pri 80°

Minimalni kotni hod 0.008°

Kotna natančnost 0.002°

Inklinacijski senzor opcijsko

Interni sinhronizacijski časovni merilnik za

sinhronizacijo z zunanjim GPS/INS

sistemom

opsijsko

### *Horizontalno snemanje*

Območje skeniranja

0° do 360°

Mehanizem skeniranja

rotirajoča optična glava

Hitrost skeniranja

0.01°/s do 15°/s

Minimalni kotni hod

0.01°

Kotna natančnost

0.0025°

### **Splošni tehnični podatki**

Vmesnik:

- za konfiguracijo in izhod podatkov Ethernet TCP/IP, 10/100 Mbit/sec
- za konfiguracijo RS232, 19.2 kBd
- za izhod podatkov ECP standard, paralelni

Napajanje

12 – 28 V DC

Poraba energije

78 W max. 94 W

Poraba toka:

- pri 12 V DC 6.5 A max. 7.8 A
- pri 24 V DC 3.25 A max. 3.9 A

Dimenzije

463 mm x 210 mm

Teža

16 kg

Temperaturno območje

0°C do +40°C (operativno)

-10°C do +50°C (hranjenje)

Zaščitni razred

IP64, odporen proti prahu in pljuskom vode

Vse ostale karakteristike inštrumenta so dostopne na:

[http://www.riegl.com/terrestrial\\_scanners/lms-z420i\\_/420i\\_all.htm](http://www.riegl.com/terrestrial_scanners/lms-z420i_/420i_all.htm)

### **Opis metode in poteka merjenja:**

**1. Določitev stojišč** - pomembno je, da stojišča zagotavljajo vidnost po možnosti celotnega območja, ki ga želimo zajeti. Odločili smo se za štiri stojišča, kar naj bi zadoščalo za zgornji del plazu. Tehnologija laserskega skeniranja omogoča združitve oblakov točk z različnih stojišč že na terenu, kar pomeni, da lahko v realnem času ugotovimo ali smo zajeli celotno zeleno območje oz. ali so kje še manjkajoči podatki.

**2. Postavitev tarč.** Tarče potrebujemo za:

- združitve oblakov točk (meritev) iz posameznih stojišč v en sam oblak točk (model),
- ter za umestitev meritev v globalni koordinatni sistem.

Tarče razporedimo čimbolj enakomerno po terenu. Da so boljše vidne, jih postavimo na količke ali kakšna druga stojala. Da oblak točk lahko umestimo v globalni koordinatni sistem (državni Gauss-Kruegerjev koordinatni sistem), potrebujemo koordinate tarč ne samo v skenerjevem ampak tudi v globalnem koordinatnem sistemu. Potrebna je torej še dodatna geodetska metoda, s katero določimo lokacijo tarč. To je lahko klasična geodetska metoda (elektronski tahimeter) ali GPS izmera. V primeru klasičnih geodetskih meritev je potrebno zagotoviti izhodiščno in navezovalno točko za zagotovitev absolutne pozicije. Za ta namen uporabimo obstoječo državno mrežo. V primeru, da na območju ni obstoječih geodetskih točk, ki bi jih lahko uporabili za navezavo, si mrežo vzpostavimo s poligonom ali z GPS meritvami. Pri nas je bila na območju plazu mreža že razvita, saj za spremljanje premikov plazovine že izvajajo redne geodetske meritve. Tarče smo izmerili z elektronskim tahimetrom.

Osnova vsake meritve, ki jo laserski skener zabeleži, je polarna metoda, ki je tudi ena od metod klasičnih geodetskih meritev. Ta metoda temelji na izračunu prostorskega položaja

točke iz dveh merjenih prostorskih kotov (horizontalni in vertikalni kot) ter merjene dolžine med inštrumentom in točko.



Slika 25: Stojišče 1

Najprej smo izvedli **predogled celotnega oblaka točk (skena) z nizko resolucijo**. V tem koraku skener poskuša avtomatsko zaznati in izmeriti lokacije tarč. V konkretnem primeru smo ugotovili, da dolge vizure od skenerja do tarč (pri vizurah nad 50 m so tarče zaradi majhne površine zelo nerazpoznavne) otežujejo avtomatsko določitev njihove lokacije. Poleg tega lahko visoko reflektivni deli terena (npr. sneg) onemogočijo ločitev tarč od ostale okolice. Tarče se dobesedno "zlijejo" s terenom.

Temu koraku sledi **fino skeniranje terena**. Skenerju določimo območje skeniranja (definiramo zgornji desni in spodnji levi vogal) in horizontalno ter vertikalno ločljivost oblaka točk, ki ga nameravamo posneti. Od teh nastavitvev je odvisen čas finega skeniranja, pri čemer je zgornja meja okrog 15 min.

Zadnji korak, ki ga na vsakem stojišču izvedemo, je **fotografiranje**. Z visoko ločljivim fotoaparatom, ki je nameščen na vrhu skenerja, smo posneli serijo fotografij, ki pokrivajo območje pogleda skeniranih podatkov.

Po končanih meritvah lahko na vsakem stojišču na prenosnem računalniku takoj še preverimo kvaliteto snemanja.

Slika 26 prikazuje prenosni računalnik med spremljanjem poteka skeniranja. Z rdečo barvo je označeno že skenirano območje, črni prostor zraven pa prikazuje del, ki šele bo skeniran.



Slika 26: Spremljanje poteka skeniranja na prenosnem računalniku

Ko je postopek skeniranja na enem stojišču končan, se prestavimo na drugega in postopek ponovimo.

Časovni potek meritev, dne 01.02.2007, na plazu Slano blato:

	začetek meritev	konec meritev
1. stojišče	8:30	9:45
2. stojišče	10:05	10:30
3. stojišče	10:45	11:15
4. stojišče	11:45	12:15

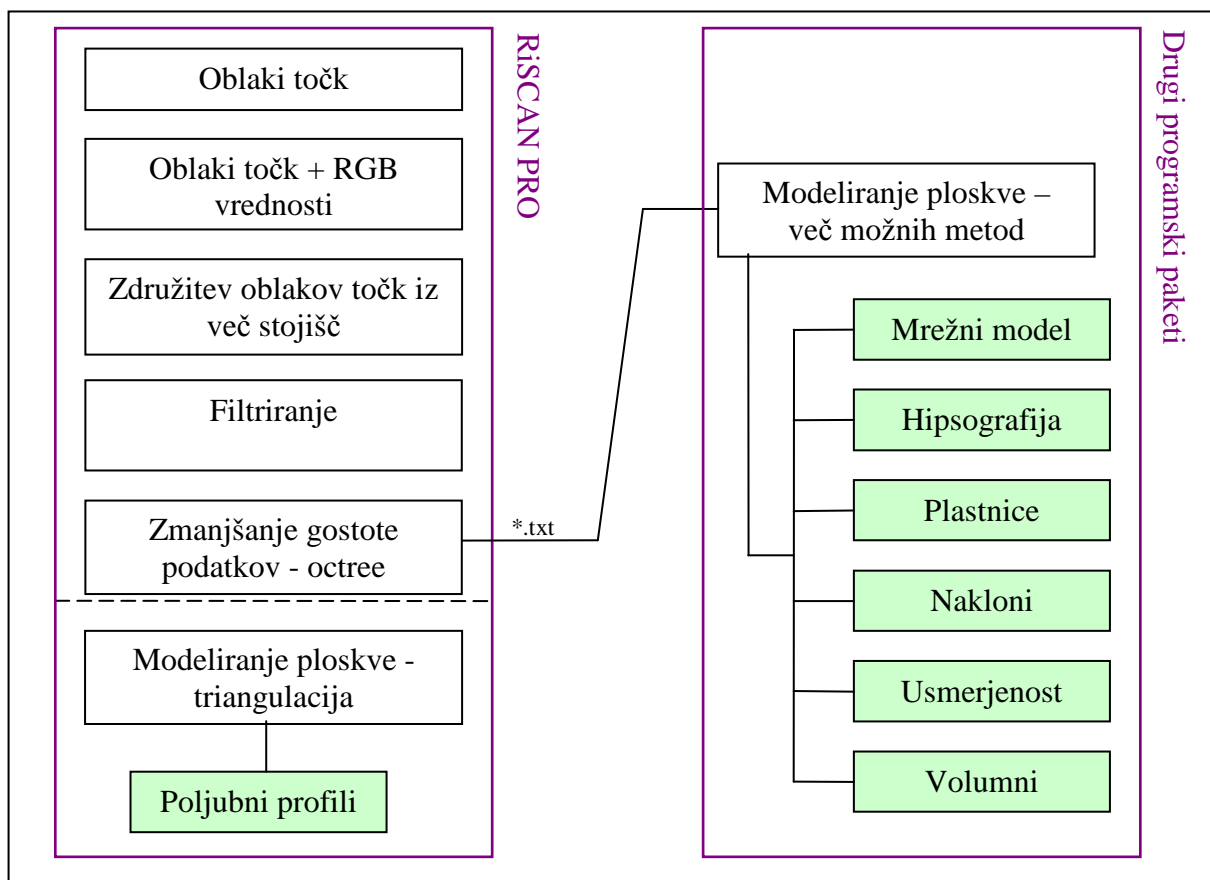
Za izmero zgornjega dela plazu Slano blato smo porabili okoli 5 ur. Na začetku je delo oteževala zelo gosta megla, tako da smo skenirati lahko začeli šele, ko se je megla nekoliko dvignila.

## 5 IZDELKI IN ANALIZA NJIHOVE UPORABNOSTI

Delu na terenu sledi obdelava podatkov. Manj zahtevne in obsežne primere bi bilo možno obdelati tudi na terenu, vendar v večini primerov obdelavo oblaka točk izvedemo v pisarni. V tem poglavju so na kratko opisani koraki obdelave. Prikazani in opisani pa so tudi nekateri rezultati, ki jih lahko iz oblaka točk izvedemo.

### 5.1 Postopek obdelave in izdelki

Postopek obdelave je v začetnem delu, do kreiranja ploskve terena, vedno enak. Pri tem smo uporabili programski paket RiSCAN PRO, ki je sestavni del sistema opreme Riegl. Nadaljno obdelavo 3D modela lahko izvajamo v več različnih programskih paketih, odvisno od tega kakšne rezultate želimo in kateri programi so nam bolj domači. Postopek obdelave je nazorno prikazan v shemi na sliki 27.

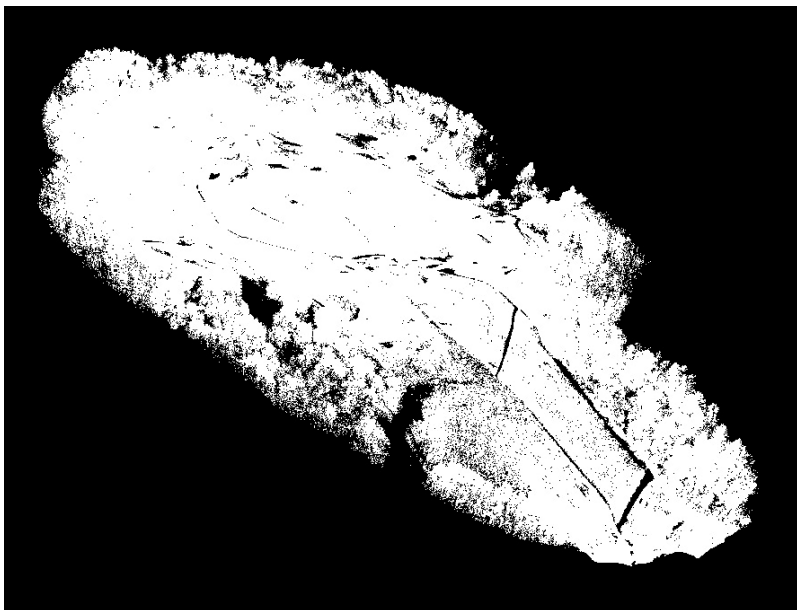


Slika 27: Prikaz poteka obdelave oblaka točk

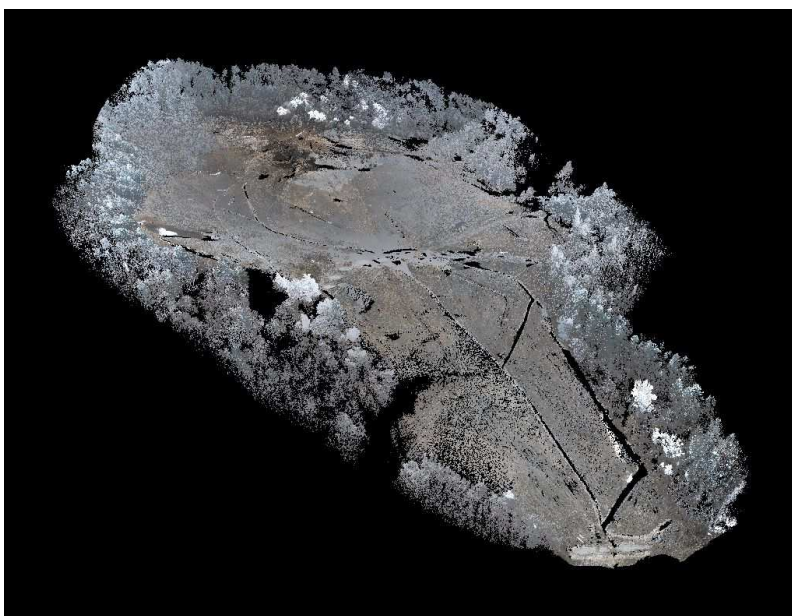


Rezultat skeniranja je oblak točk. Za vsako stojišče dobimo svoj oblak točk v skenerjevem koordinatnem sistemu. Skeno iz posameznih stojišč na osnovi tarč nato transformiramo v državni koordinatni sistem in jih združimo, da dobimo enega samega.

Slika 28 prikazuje oblak točk združen z vseh stojišč na območju plazu Slano blato. Oblak točk na sliki 29 ima dodane barvne vrednosti.



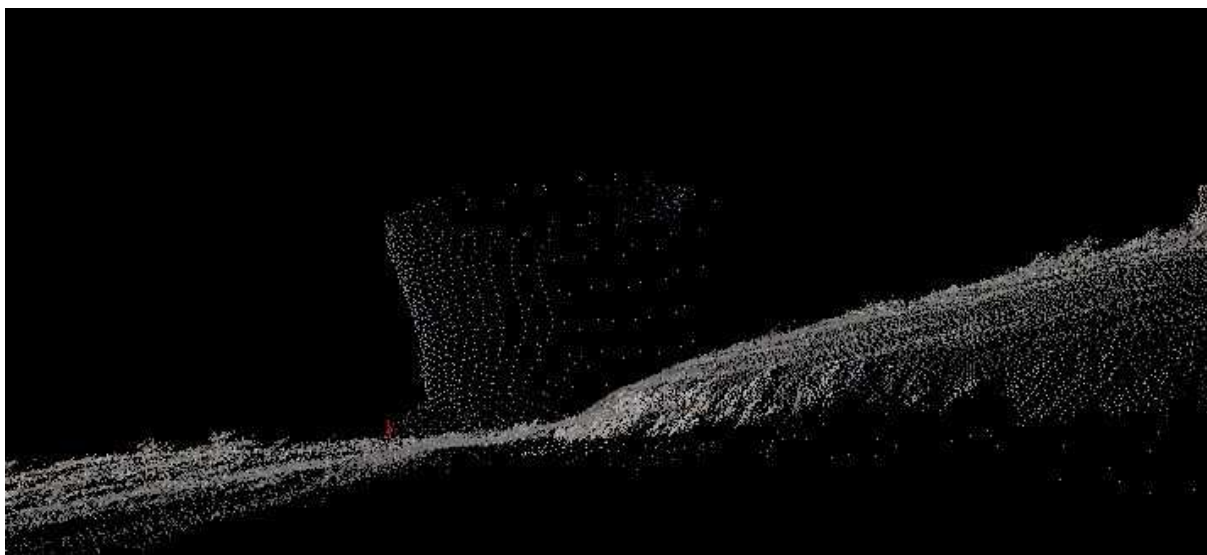
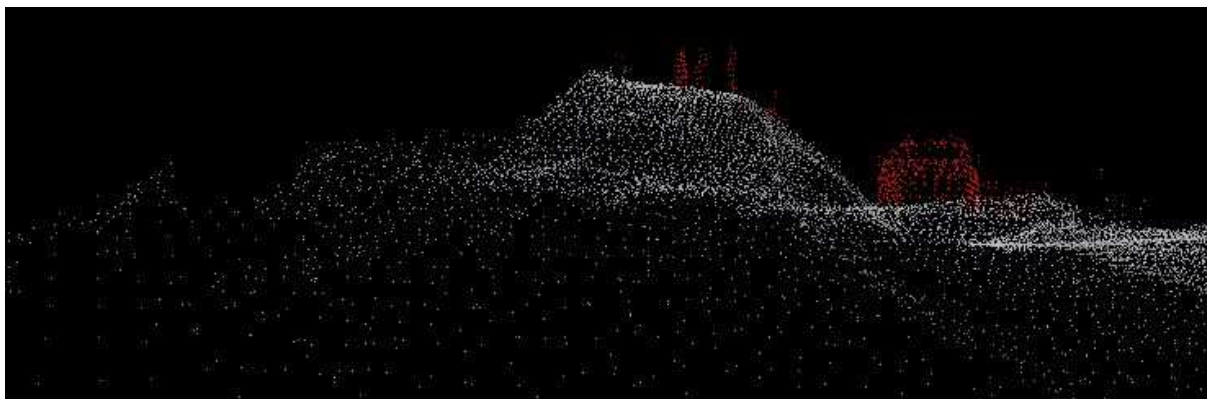
Slika 28: Združen oblak točk v državnem koordinatnem sistemu



Slika 29: Združen oblak točk z dodanimi RGB vrednostmi

Oblak točk si lahko ogledamo že na terenu, s programskim modulom RiSCAN PRO. Omogočeni so tudi pogledi z različnih zornih kotov ter približevanje in oddaljevanje, kar pri uporabi drugih merskih tehnik ni mogoče. Pomembno je, da lahko geologi uporabijo skenirane podatke neposredno kot osnovo za geološke interpretacije in analize.

Sledi filtriranje odvečnih podatkov. Laserski skener namreč zajame celotno površino terena, vključno z nepotrebnimi objekti, kot so vegetacija (drevje, grmičevje, trava), grajeni objekti (jaški stavbe), prevozna sredstva (avtomobili, gradbena mehanizacija) in vse ostalo kar je v trenutku snemanja na območju (sliki 30). Rezultat filtriranja je oblak točk brez nepotrebnih vsebin.



Slika 30: Filtriranje

Fazi filtriranja odvečnih podatkov sledi zmanjšanje gostote podatkov. Večina programskih paketov, v katerih nadaljujemo obdelavo, namreč še ni prirejena za tako velik obseg podatkov in je zato delo zelo počasno ali pa celo nemogoče. Programski paket Riscan PRO ima posebno vgrajeno funkcijo - filter octree prav za ta namen. Filter deluje po metodi oktalnega drevesa. Določimo mu dolžino stranice kocke, znotraj katere izračuna točko, ki predstavlja težišče vseh točk v eni kocki, ostale točke znotraj kocke pa odstrani. Kot rezultat dobimo torej veliko manjšo množico točk, ki so poleg tega tudi enakomerno razpršene po površini modela.

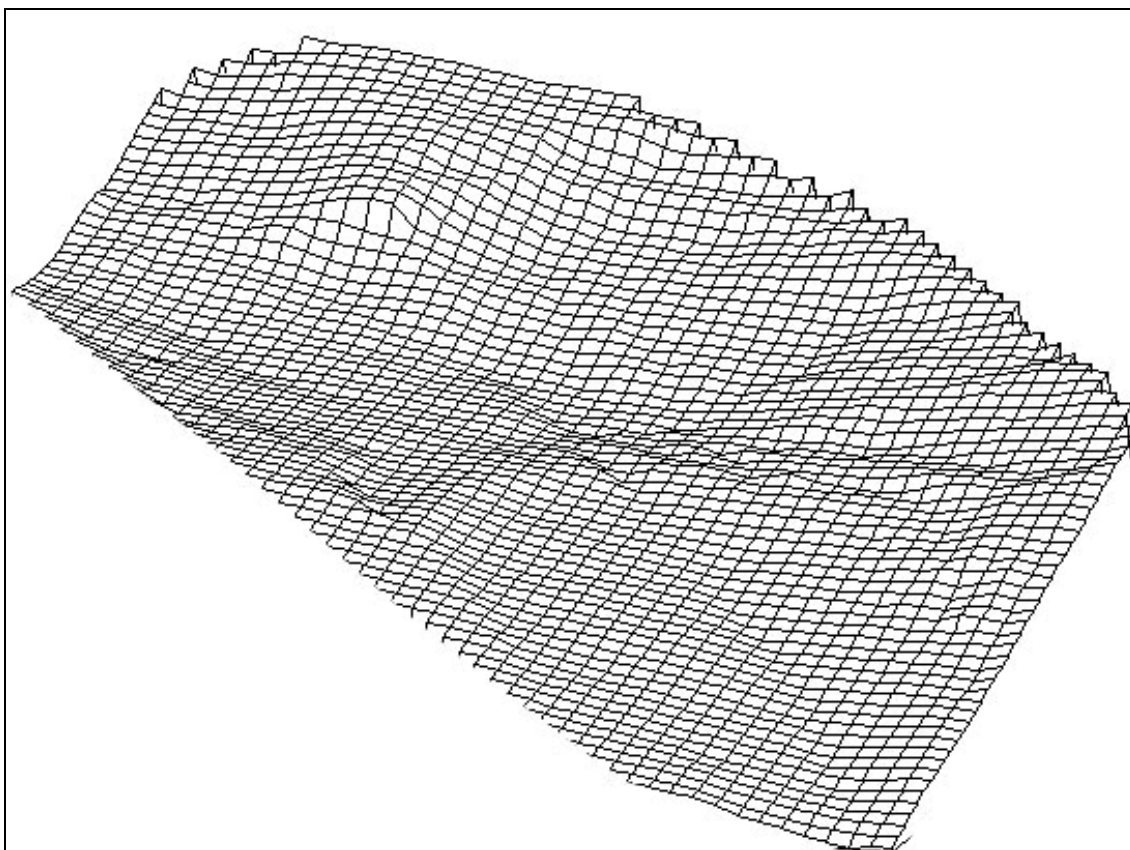
Naslednji korak obdelave je triangulacija. Tukaj povežemo točke terena v trikotniško mrežo ter s tem ponazorimo ploskev terena. Program izvede triangulacijo po Delaunay-jevi metodi, ki je algoritem za povezavo točk s koordinatami v dvorazsežnem prostoru, ki jih izračuna glede na položaj modela prikazan na ekranu. Točke poveže med seboj tako, da tvorijo, kolikor je mogoče enakostranične trikotnike. Slika 31 prikazuje 3D model plazu, pri čemer so trikotniki obarvani z RGB vrednostmi točk. Učinek je podoben kot bi ga dosegli, če bi mrežni model prekrili s teksturo iz fotografij.



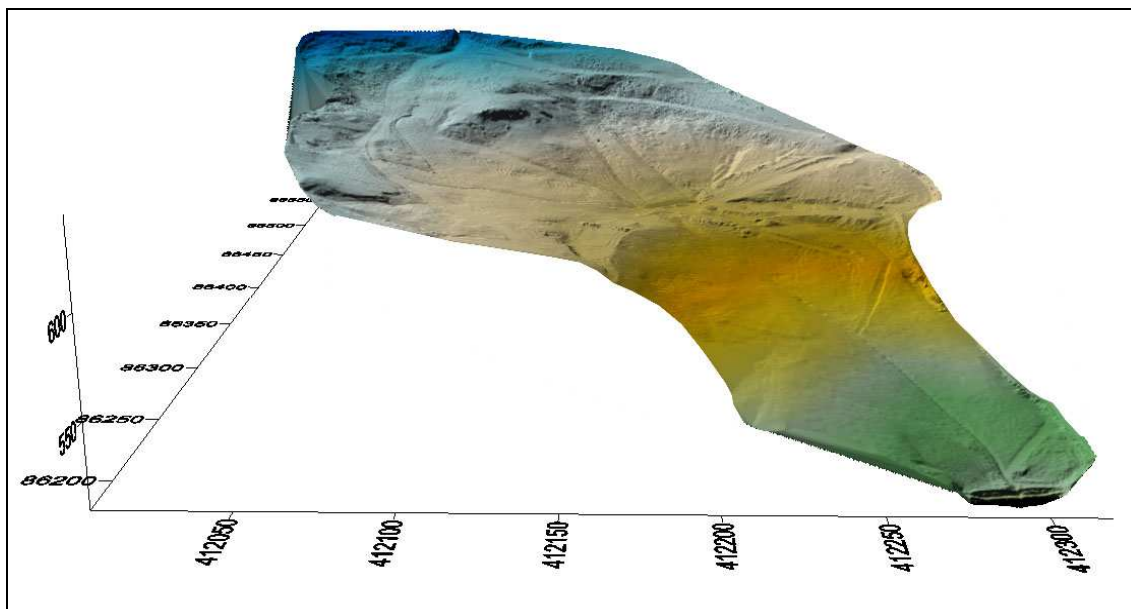
Slika 31: Obarvan model terena

3D modeli odpirajo popolnoma nove perspektive k pristopu in interpretaciji podatkov. Iz njih je možno izvesti celo množico rezultatov, ki so lahko primerni za uporabnike, ki sodelujejo pri sanaciji plazov. Nekateri rezultati so takšni, kot so jih strokovnjaki že navajeni, drugi pa šele odpirajo nove možnosti, ki bi jih bilo smiselno v prihodnje nadgraditi. Predvsem pa je pomembno, da tukaj sodelujejo vse stroke, ki so zajete v sanacijo.

Iz oblaka točk, v katerem so točke poljubno razporejene, naredimo mrežo pravilno razporejenih točk, ki jih povežemo s tri ali štirikotniki ter tako pridobimo površino terena. Iz te osnovne oblike 3D modela je zelo lepo razviden 3D potek terena.

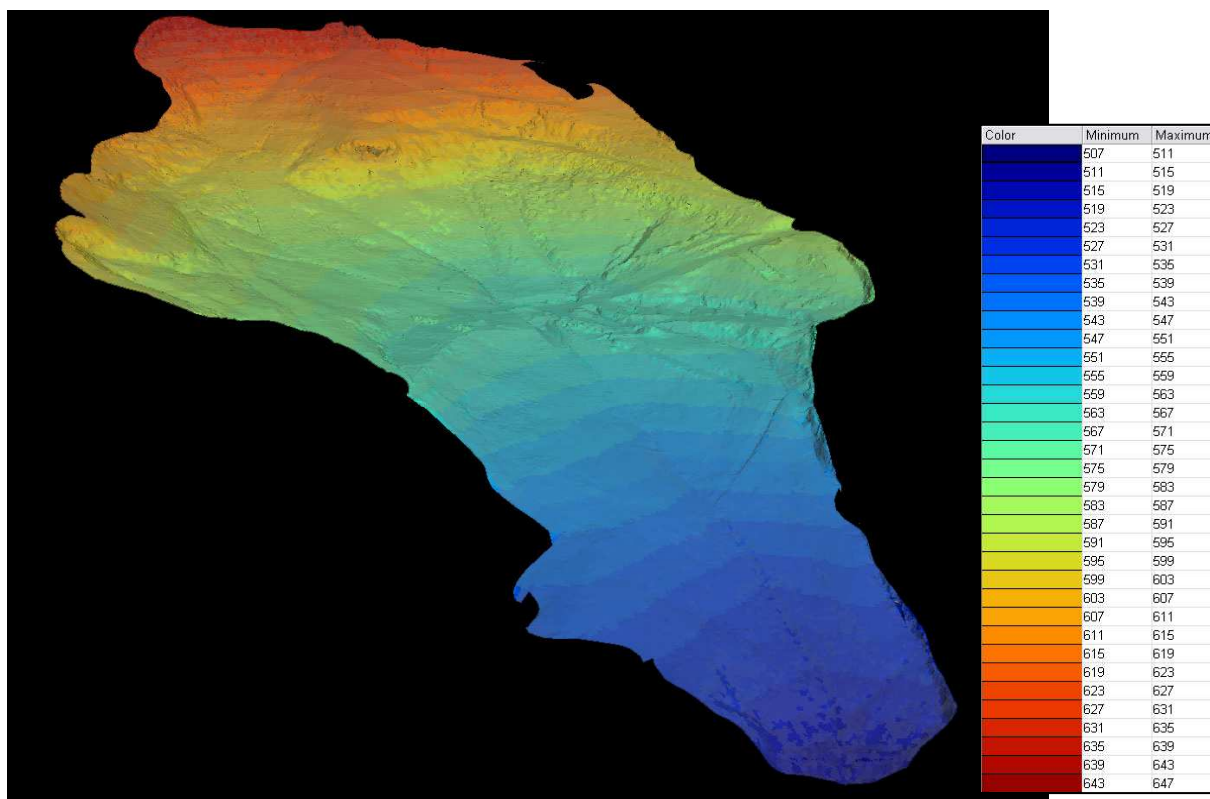


Slika 32: Mrežni prikaz 3D modela



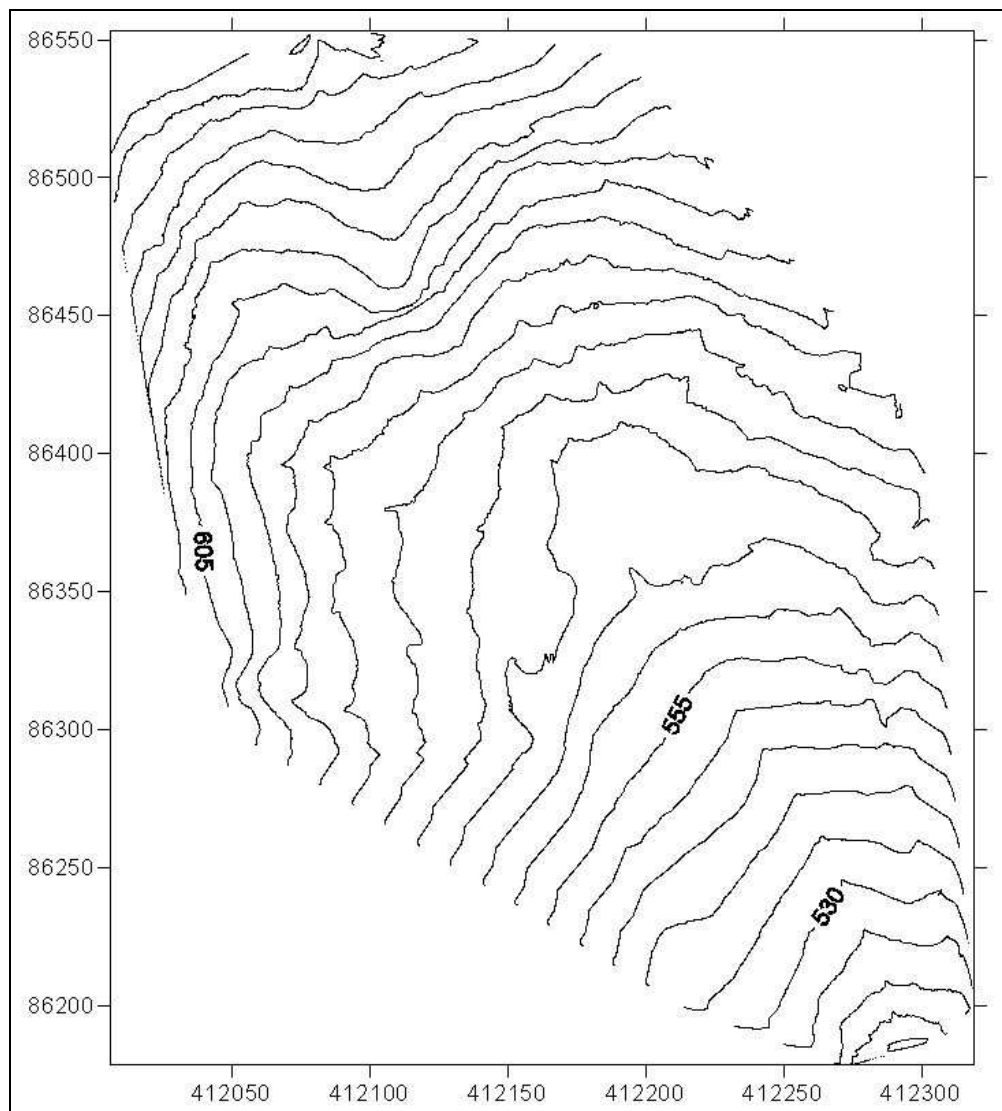
Slika 33: Hipsografski prikaz plazov z zvezno barvno lestvico v državnem koordinatnem sistemu

Na sliki 34 pa lahko vidimo še hipsografski prikaz plazu Slano blato z diskretnimi vrednostmi barvne lestvice, ki določajo višinske razrede posameznih pasov območja.



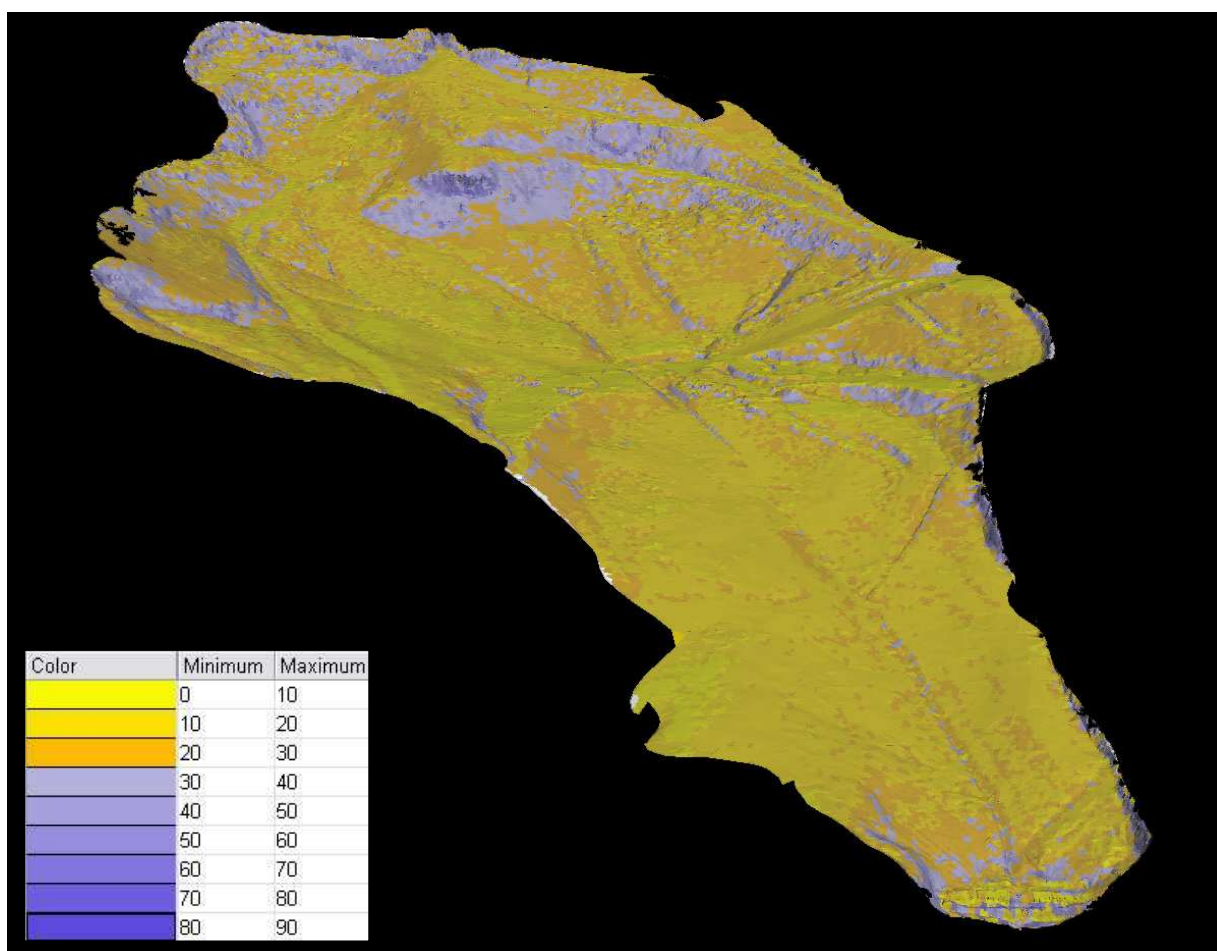
Slika 34: Hipsografski prikaz plazu z diskretno barvno lestvico

Če model plazov razrežemo z vzporednimi horizontalnimi ravninami (ekvidistanca ravnin je v tem primeru 5 m), lahko izrišemo plastnice na območju, ki smo ga posneli.



Slika 35: Plastnice

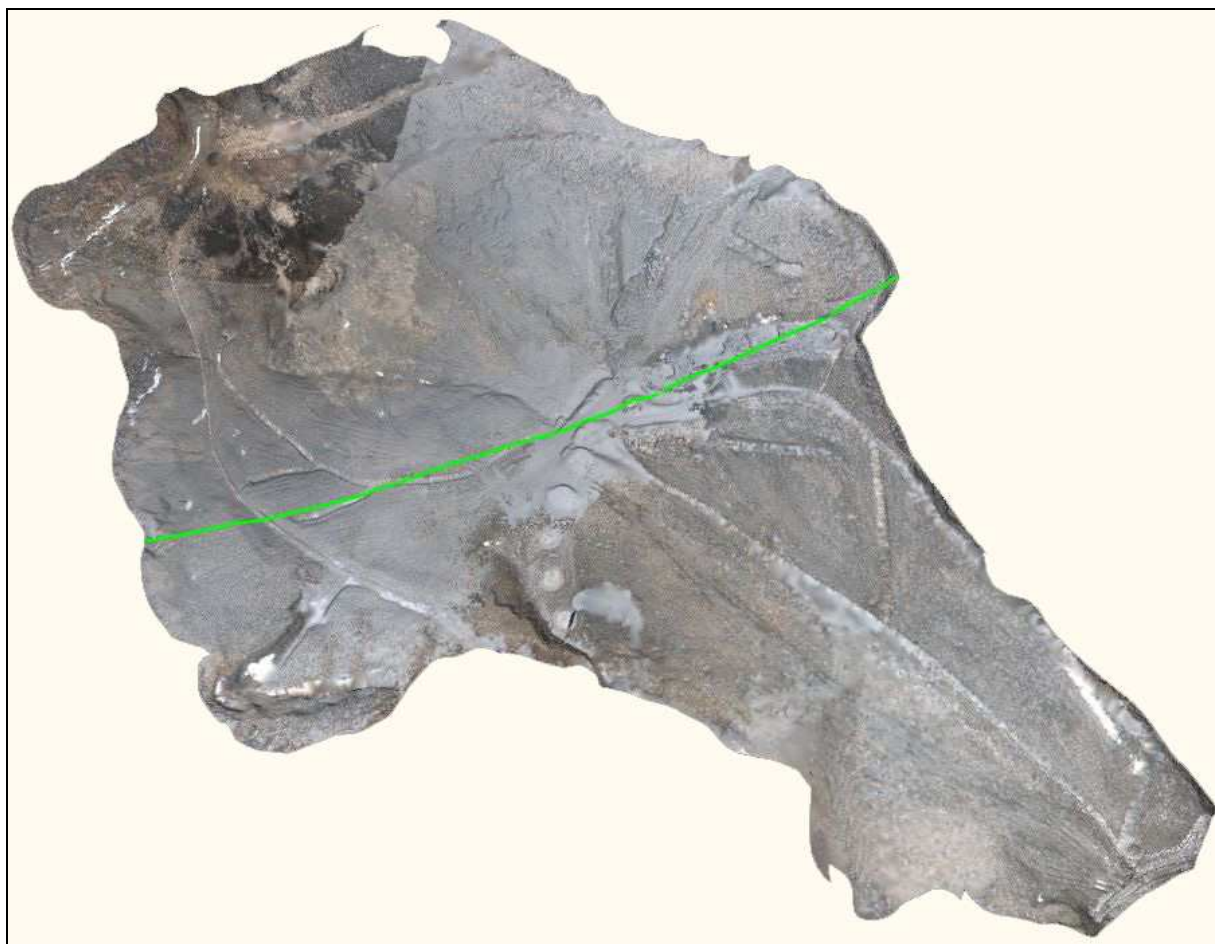
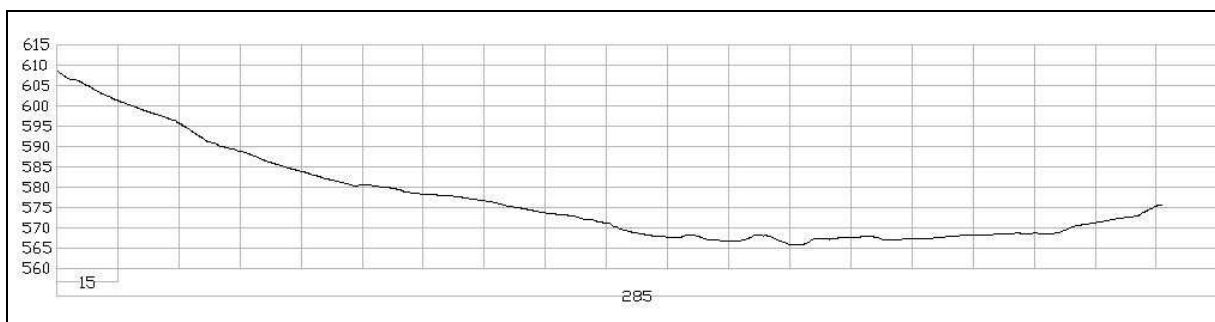
Slika 36 prikazuje karto naklonov območja skeniranja na plazu Slano blato. Naklon predstavlja višinski kot med horizontalno ravnino in normalnim vektorjem v posamezni točki modela terena. Izražen je v stopinjah in zavzema vrednosti od  $0^\circ$  (horizontalno) do  $90^\circ$  (vertikalno). Na območjih z večjim naklonom je verjetnost pojava dinamike večja. Na podlagi takšnega prikaza lahko sklepamo, katera območja so bolj izpostavljena premikom in odlomom. Na tej karti se zelo dobro vidijo tudi prelomi oziroma lomne linije, kjer se potek terena spremeni. Karta se je v konkretnem primeru izkazala za zelo primerno. Območja z naklonom večjim od  $15^\circ$  so namreč že potencialno plazovita območja. Iz karte se zelo dobro vidi katerim delom plazu je potrebno dodatno zmanjšanje naklona (vijolična in temno rumena barva na sliki 36).



Slika 36: Prikaz naklonov terena in legenda, ki prikazuje meje posameznih razredov (enota so kotne stopinje)

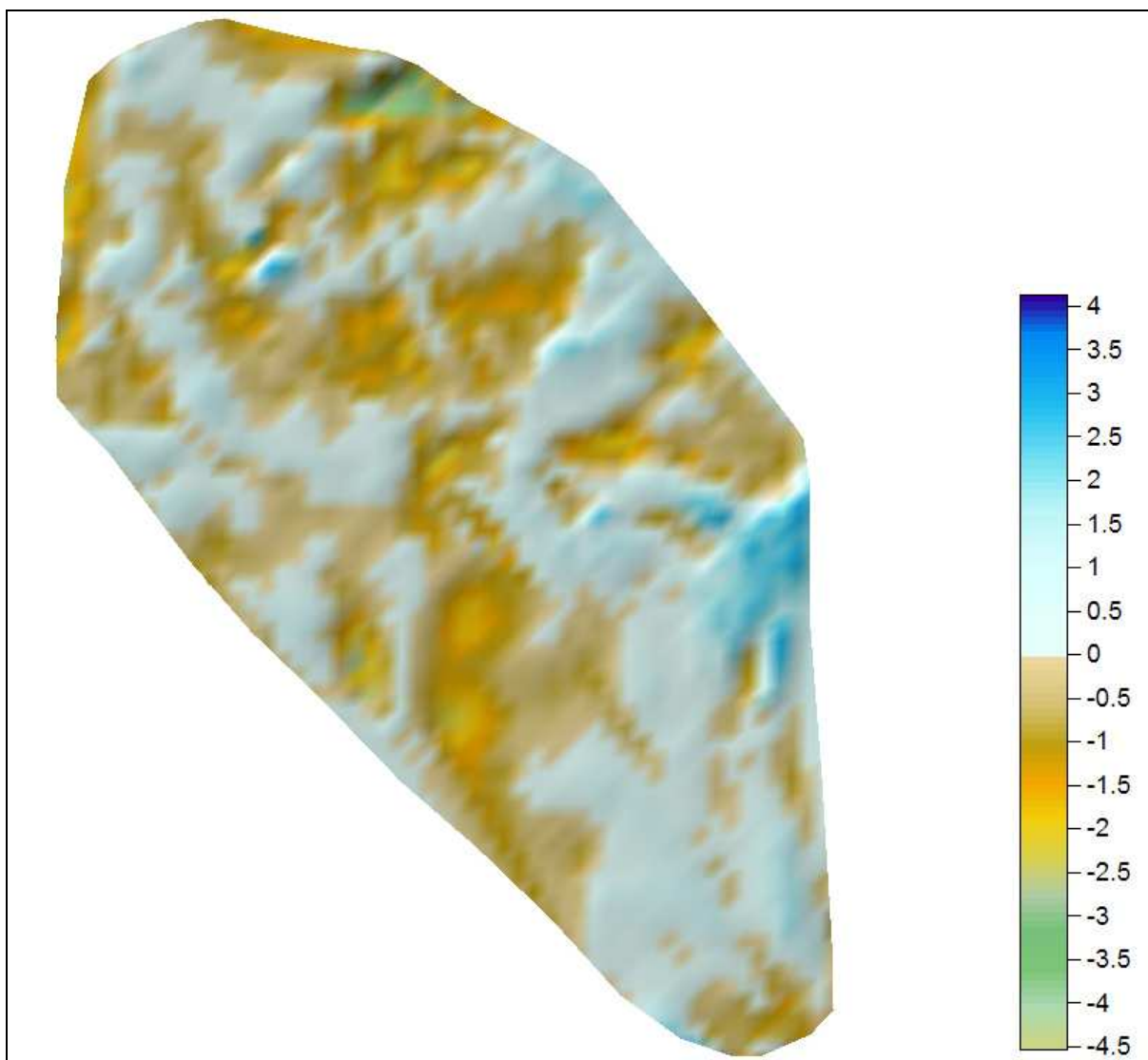


V postopku sanacije plazov so za izvajalce uporabni tudi profili območja. Zaradi ogromne množice meritev omogoča metoda laserskega skeniranja določitev zelo detajlne oblike ploskve terena. To pomeni, da so profili zelo natančno definirani, hkrati pa je potrebno poudariti, da lahko na podlagi izdelanega modela izrisujemo poljubno število profilov v poljubnih smereh (poleg vzdolžnih in prečnih tudi poševne). Na sliki 37 je z zeleno barvo prikazan potek profila na modelu in v prerezu.



Slika 37: Izris poljubnega profila

Podatke o stanju terena pred sproženim plazom lahko dobimo iz obstoječih geodetskih evidenc. Do sedaj se je najpogosteje uporabljal digitalni model reliefa s celico velikosti 25 m x 25 m (DMR 25). Danes se aerosnemanje Slovenije izvaja z novo digitalno kamero. To nam omogoča, da kot podatek stanja pred sprožitvijo plaz, uporabimo digitalni model reliefa s celico velikosti 5 m x 5 m (DMR 5). Ta podatek je veliko manj podroben kot ga pridobimo s terestričnim laserskim skeniranjem, vendar za prvo oceno o količini splazele mase zadostuje.



Slika 38: 3D ploskev razlik

Slika 38 prikazuje razliko 3D ploskev, pri čemer je ploskev stanja na dan laserskega skeniranja, zgornja ploskev in ploskev pridobljena iz DMR 5, ki predstavlja stanje na

območju plazu leta 2006, spodnja ploskev. Iz slike je razvidno od kod je masa zemljine spolzela in kam se je nalagala. Modra barva na sliki prikazuje območja, kjer je ploskev pridobljena z laserskim skenerjem nad ploskvijo pridobljeno iz DMR 5, ostale barve pa prikazujejo območja, ki so nižja kot so bila leta 2006.

## **5.2 Uporabnost oblaka točk**

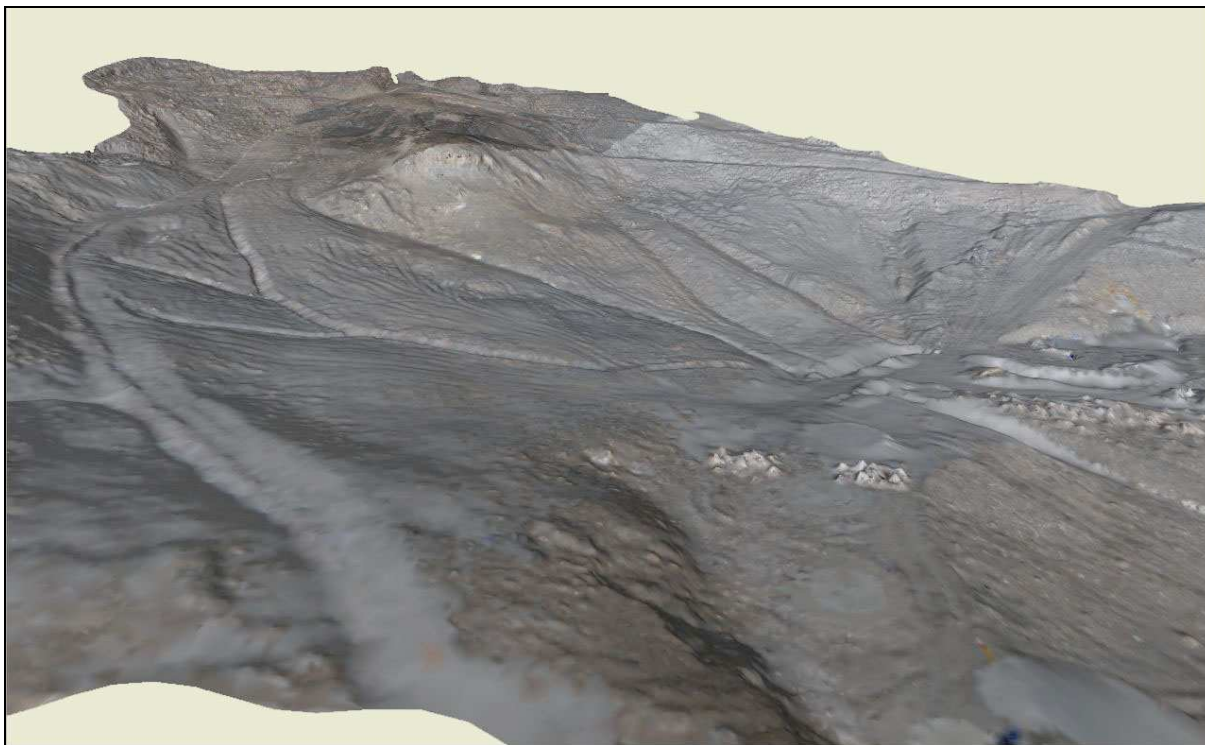
Do sedaj so bili predstavljeni rezultati, ki so jih stroke, ki sodelujejo pri sanaciji in opazovanju plazov, navajene. Oblak točk pa je lahko uporaben tudi samostojno. Digitalni 3D model pridobljen z laserskim skeniranjem se lahko uporabi tudi neposredno za geološko analizo.

3D modeli pridobljeni s tehnologijo terestričnega laserskega skeniranja so detajlne digitalne kopije resničnega terena. Geologom zagotavljajo veliko prednosti ter zaobidejo veliko problemov povezanih s tradicionalnim kartiranjem na papirju in strukturnimi analizami.

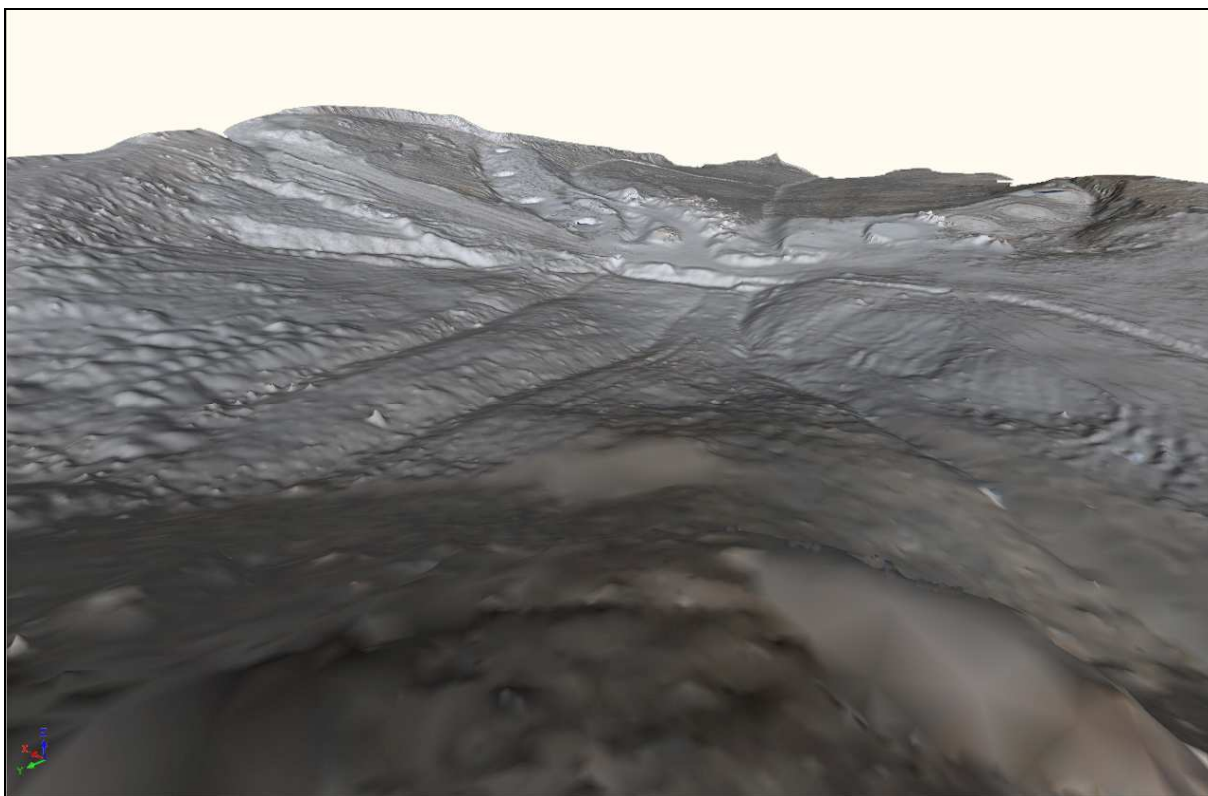
Glavne prednosti so:

- Omogočajo preučevanje vseh delov vidnega terena, v nasprotju z opazovanji/meritvami, ki so omejena na regije, ki so varno dostopne za terenske znanstvenike.
- Omogočajo geo-znanstvenikom izvajanje ključnih detajlnih analiz in interpretacij vstan od terena.
- Generira geološki set podatkov in modelov, ki so georeferencirani, v nasprotju s prejšnjo nezanesljivo stopnjo natančnosti.
- Modele se lahko dopolni tudi s podatki drugih strok (npr. geofizikalni pod-površinski podatki) ter s tem še izboljša možnost različnih analiz.

Sliki 39 in 40 prikazujeta stopnjo detajla modela plazu Slano blato, ki ga lahko določimo na osnovi metode laserskega skeniranja. 3D lastnost modela je bolj vidna, če objekt premikamo, ga približujemo ali oddaljujemo. Ugotovljeno pa je bilo tudi dejstvo, da so določene lastnosti terena lahko bolj jasno vidne s perspektivnega pogleda in od daleč kot pa na terenu.

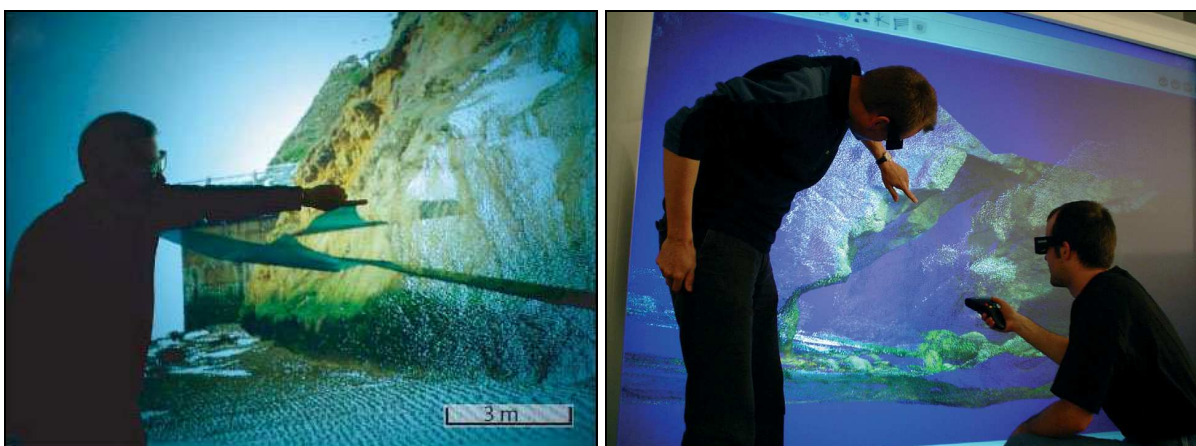


Slika 39: Model plazu Slano blato z lepo vidnimi kanali za odvodnjavanje



Slika 40: Pogled na 3D model s stojišča 1

V kombinaciji z vizualizacijo, kot je stereoskopski zaslon v velikosti stene in barvni avto-stereoskopski 3D monitorji, so ti visoko detajlni, prostorsko in geometrično pravilni modeli idealni za interpretacije, analize, učenje študentov in znanstvenikov ter tudi za predstavitve in razumevanje geo-znanosti širše publike.

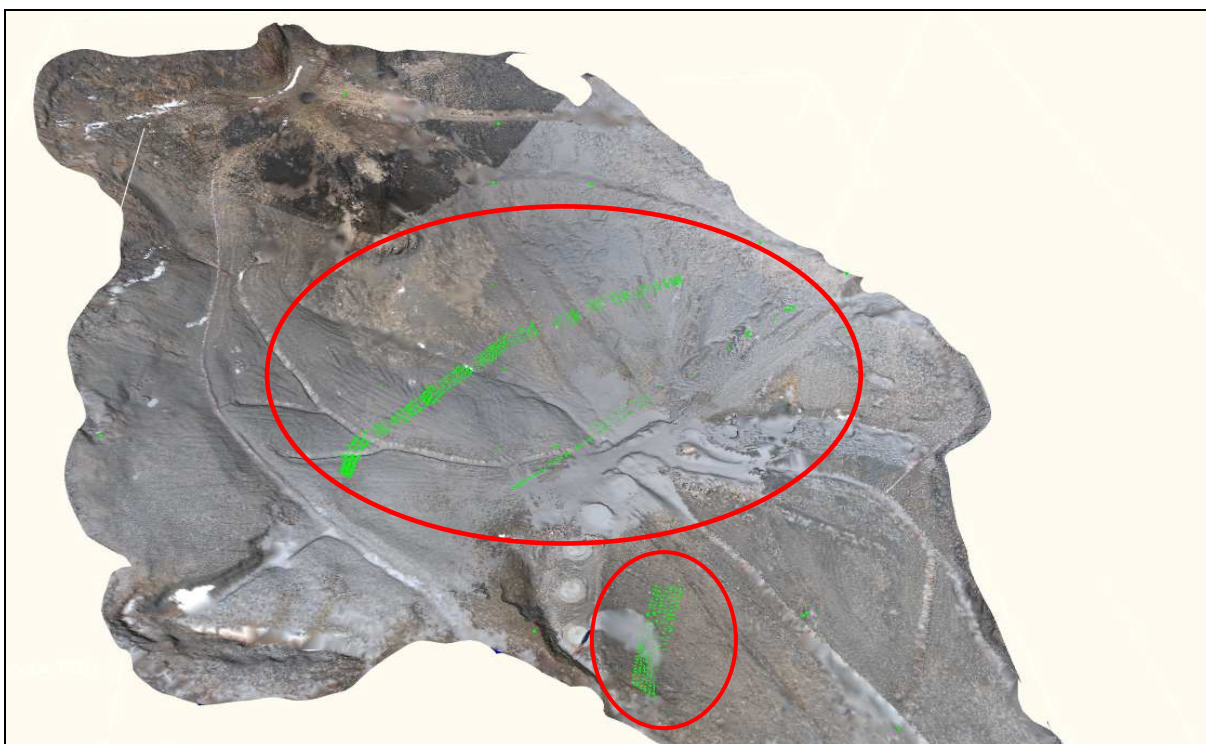


Slika 41: Analiza 3D modela (Trinks, 2005)

## 6 PRIMERJAVA METOD (ELEKTRONSKI TAHIMETER – LASERSKI SKENER)

Na plazu Slano blato smo za snemanje površine terena uporabili dva različna merska inštrumenta. To nam omogoča primerjavo merskih vrednosti in ugotovitev koliko se terestrično lasersko skeniranje v danem primeru sklada z meritvami elektronskega tahimetra. Natančnost, ki jo dosega elektronski tahimeter, znaša  $3 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$  za razdalje do 500 m in  $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$  za razdalje daljše od 500 m. Laserski skener Riegl LMS Z420i dosega natančnost  $\pm 10 \text{ mm}$  za posamezno meritev ter  $\pm 5 \text{ mm}$  v primeru povprečja več meritev.

Položajev točk izmerjenih z obema metodama ne moremo neposredno primerjati. Obe metodi merita točke površine terena brez uporabe reflektorjev po določenem vzorcu. Točke na terenu so tako bolj ali manj naključno razporejene in niso eksaktno določene oziroma stabilizirane. To je tudi razlog, da primerjava z vidika klasične obravnave odstopanj med dvema setoma podatkov, ni mogoča. Slika 42 prikazuje meritve elektronskega tahimetra (zeleno točke) na modelu plazu.



Slika 42: Prikaz meritev obeh metod

Primerjava meritev je zato izvedena posredno preko modelne ploskve laserskih meritev. Računamo višinske razlike med posameznimi geodetsko zajetimi točkami in ploskvijo modela. Višina točk na modelni ploskvi je pri tem odvisna od natančnosti laserskega skeniranja, metode interpolacije, intervala pravilne mreže točk ter od gostote vhodnih podatkov.

Izračun modelnih ploskev podrobneje opisuje poglavje 6.1. Med primerjavo se je izkazalo, da so med opazovanji grobe napake. Vzroki za to in opis izbire primernih podatkov za primerjavo so opisani v poglavju 6.2. V poglavju 6.3 je opisan postopek primerjave meritev ter rezultati.

## **6.1 Modelna ploskev**

Podatek, ki ga imamo na voljo za izračun modelne ploskve, je množica nepravilno razporejenih točk v prostoru. Točke tvorijo mrežo, na katero želimo napeti ploskev, ki posnema njen geometrijski potek. V ta namen imamo na razpolago veliko interpolacijskih tehnik. Upoštevati moramo dejstvo, da nobena izmed njih ni popolna. Uporabnost posamezne metode je odvisna predvsem od tipa podatkov, ki jih interpoliramo in rezultat vsake je drugačen.

V splošnem jih razdelimo na deterministične in geo-statistične. Deterministične temeljijo direktno na okoliških merjenih vrednostih ali na matematičnih formulah, ki določajo gladkost izhodne ploskve. Delimo jih na globalne, ki upoštevajo celoten set podatkov in lokalne, ki upoštevajo točke znotraj določene razdalje ali okolice. Geo-statistične metode temeljijo na statističnih modelih, ki upoštevajo statistično razmerje med merjenimi točkami (razdaljo in stopnjo variacije). Poleg zmožnosti napovedi poteka ploskve imajo še eno dobro lastnost, da lahko izračunajo zanesljivost te napovedi.

Različna programska oprema ponuja različne možnosti. Programski paket SURFER 8, ki sem ga uporabila za interpolacijo, omogoča 12 različnih interpolacijskih metod. Uporabila sem tiste, ki najbolj natančno upoštevajo dejanske podatke in zagotavljajo najbolj natančne rezultate:

- triangulacijo z linearno interpolacijo (opisana v poglavju 6.1.1),
- kriging (opisana v poglavju 6.1.2),
- metodo naravnih sosedov (opisana v poglavju 6.1.3) ter
- metodo z inverznimi razdaljami na potenco (opisana v poglavju 6.1.4).

Za izračun interpolirane ploskve je potrebno izbrati ustrežno metodo ter določiti interval med mrežnimi linijami v x in y smeri.

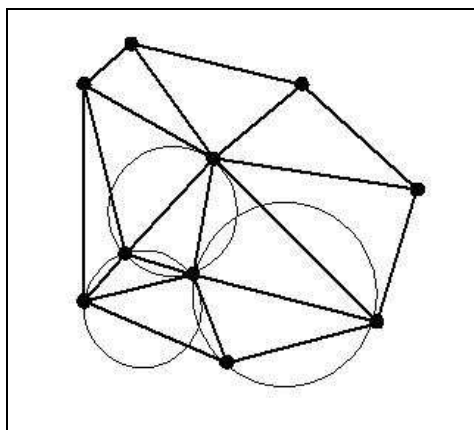
### **6.1.1 Triangulacija z linearno interpolacijo (angl. triangulation with linear interpolation)**

Opazovane vrednosti so pri tej metodi med seboj povezane z mrežo linij, ki ponazarjajo trikotniške ploskve (TIN). Metoda uporablja optimalno Delauney-jevo triangulacijo. Algoritem z linijami poveže dane točke, glede na določene pogoje:

- pogoj očrtega kroga trikotnika, kar pomeni da znotraj očrtega kroga ni nobene druge točke, kakor trije vogali trikotnika,
- pogoj čimbolj enakostraničnih trikotnikov, s čimer se eliminirajo ostri koti ter podolgovati trikotniki,
- pogoj konveksnosti roba območja (Delaunay-jeva mreža mora zaokroževati konveksno območje).

Točke so tako povezane na način, da ni noben rob trikotnika presekan z ostalimi stranicami trikotnika.





Slika 43: Delaunay-jeva triangulacija (University of Virginia – spletna stran, 07.06.2007)

Izračunati je potrebno še višinsko komponento točk mreže. Vse točke mreže znotraj enega trikotnika so definirane s trikotniško ploskvijo, njihovo višino algoritem izračuna z linearno interpolacijo iz višin vogalnih točk.

### 6.1.2 Kriging metoda

Metoda je ena izmed najbolj prilagodljivih in je uporabna za skoraj vse vrste podatkov. Spada med geo-statistične interpolacijske metode. Neznane vrednosti pri tej metodi ocenjujemo z najboljšo linearno nepristransko oceno ali z utežnim linearnim premikanjem povprečja. Omogoča zelo dobro prilagajanje napovedi ob upoštevanju opazovanih vrednosti. Prednost metode je v možnosti izbiranja različnih parametrov, ki vplivajo na kakovost rezultatov.

V metodo kriging so edinstveno vključeni trije faktorji: variogram model (angl. variogram model), tip obnašanja (angl. drift type), in nugget efekt (angl. nugget effect).

Variogram matematično določa prostorsko spremenljivost podatkov in izhodne mreže. Interpolacijske uteži, ki so pripisane točkam med izračunom točk mreže, so direktne funkcije variograma. Programski paket Surfer 8 ima na razpolago 7 različnih variogramov.

Tip obnašanja je pomemben kadar imamo v podatkih velike luknje ali želimo interpolirati ploskev izven meja obstoječih podatkov. Kadar imamo podatke bolj ali manj enakomerno porazdeljene tega faktorja ne uporabimo.

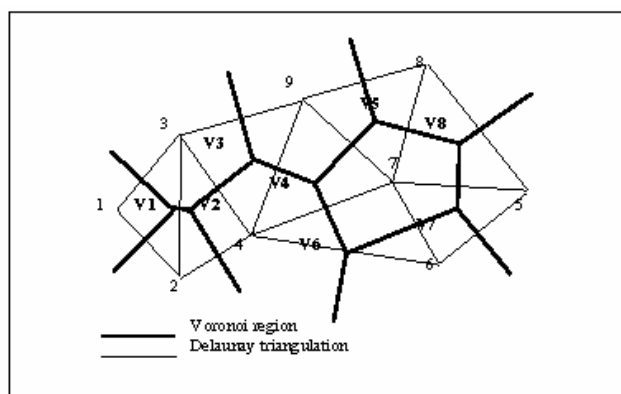
Nugget efekt se uporabi kadar so v naših podatkih možne napake. Upeljemo ga iz semivariograma, ki ga izračunamo iz podatkov. Uporaba tega faktorja povzroči manjše zaupanje v originalne podatke nasproti splošnemu trendu podatkov. Večji kot je faktor, bolj gladko ploskev dobimo kot rezultat interpolacije.

V mojem primeru je bil uporabljen navaden kriging z linearnim variogramom, brez posebej določenega tipa obnašanja, in nugget efekt.

### 6.1.3 Metoda naravnih sosedov (angl. natural neighbor)

Metoda v prvem koraku določi območja, znotraj katerih so dane točke, ki so točkam, katerim računamo višino, najbližje. Območja dobimo tako, da povežemo sosednje točke in s simetralami na povezave v sredinski točki razmejimo prostor. S tem dobimo nepravilne mnogokotnike imenovane Thiessen-ovi poligoni (tudi Voronoi-jevi poligoni oziroma Dirichlet-ove celice), ki omejujejo območje, ki je najbližje dani točki. Območja ponazarjajo vplivno območje za vsako točko, ki je uporabljena pri izračunu nove.

Slika 44 prikazuje Voronoi-jeva območja in z njimi povezano Delaunay-jevo triangulacijo.



Slika 44: Voronoi-jeva območja in z njimi povezano Delaunay-jevo triangulacijo (Lattuada, Raper, 1996)

Če je setu podatkov dodana nova točka, se Thiessen-ovi poligoni spremenijo. Nekaj poligonov se po velikosti skrči, nobeden pa se ne poveča. Metoda naravnih sosedov uporablja utežno povprečenje sosednjih opazovanj, pri čemer so uteži sorazmerne »sposojenemu območju«. To je območje, povezano s ciljnim Thiessen-ovim poligonom, izvzeto iz obstoječega poligona.

#### 6.1.4 Metoda z inverznimi razdaljami na potenco (angl. inverse distance to a power)

Originalni izmerjeni podatki, ki ležijo znotraj določenega radija od nove točke mreže, so uteženi tako, da vpliv ene točke relativno na drugo upada z razdaljo. Uteži so podatkom pripisane z uporabo »utežne potence«, ki kontrolira kako utežni faktor upada, ko razdalja od točke, ki ji določamo višino, narašča. Večja kot je »utežna potenca«, manj vpliva imajo točke daleč stran med interpolacijo. Ko potenca narašča, se vrednost točke približuje vrednosti najbližje točke. Za manjšo potenco, so uteži bolj prosto razporejene med sosednjimi točkami.

Ponavadi se metoda obnaša kot točen interpolator. Med računanjem neznane vrednosti, so uteži, pripisane danim točkam, ulomki in vsota vseh uteži je 1. Če naključna opazovana točka sovпада s točko mreže, je razdalja med njima 0 in to opazovanje dobi utež 1 ter vsa ostala opazovanja 0. Točki mreže je tako pripisana vrednost opazovanja.

Način izračuna vrednosti točke mreže po tej metodi je:

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}}$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2}$$

Kjer so:  $h_{ij}$  ... učinkovita ločitvena razdalja med točko mreže  $j$  in sosednjo točko  $i$

$\hat{Z}_j$  ... interpolirana vrednost za točko mreže  $j$

$Z_i$  ... sosednje točke

$d_{ij}$ ... razdalja med točko mreže  $j$  in sosednjo točko  $i$

$\beta$  ... parameter potence

$\delta$  ... parameter glajenja

Programski paket Surfer 8 ponuja možnosti nastavitve parametra potence in glajenja:

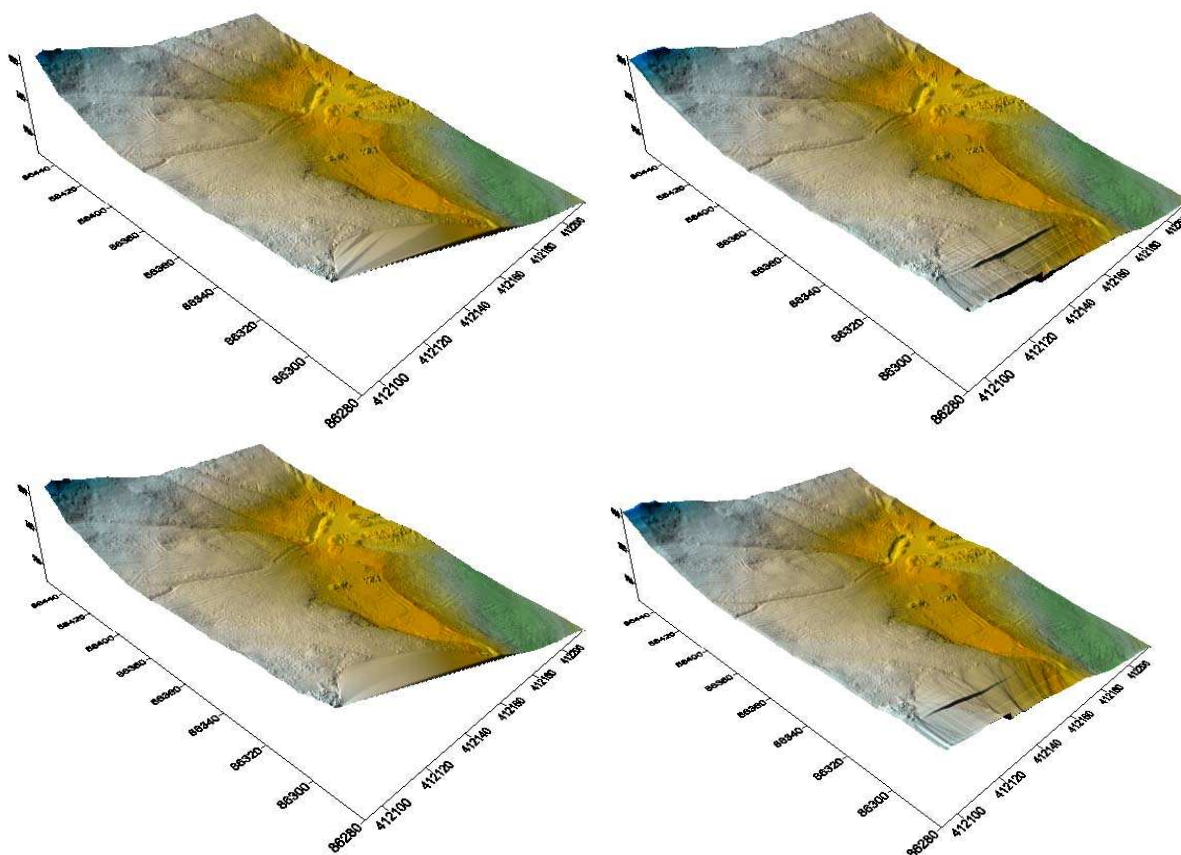
- parameter potence določa kako hitro upadajo uteži, pripisane danim točkam, z razdaljo od točke mreže
- parameter glajenja omogoča vključitev faktorja "nesigurnosti" vhodnih podatkov. Večji kot je, manj vpliva ima vsako opazovanje na določitev točke mreže.

Omogoča tudi možnost dodelitve različnih uteži v različnih smereh.

V primeru uporabe metode z inverznimi razdaljami na potenco sem uporabila standardne nastavitve, ki jih ponuja program. Vrednost parametra potence je tako nastavljen na 2 in parameter glajenja je 0.

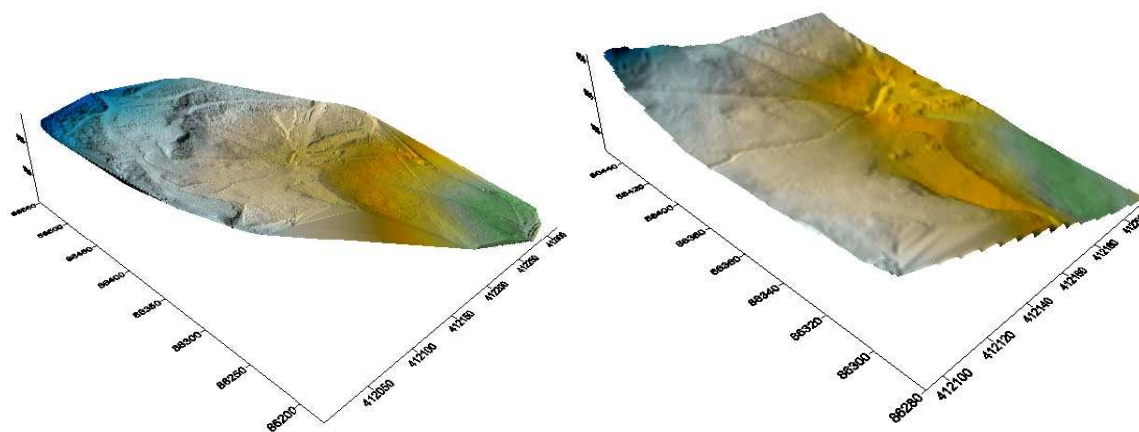
### **6.1.5 Modelne ploskve plazu Slano blato**

Vhodni podatki, ki sem jih uporabila za izračun modelnih ploskev, so podatki laserskega skeniranja z izločenimi točkami, ki ne predstavljajo terena. Na sliki 45 so prikazane modelne ploskve plazu. Pri tem so metode interpolacije po vrsti: triangulacija z linearno interpolacijo, kriging, metoda naravnih sosedov ter metoda z inverznimi razdaljami na potenco. Razmiki med stranicami mreže so 0.25 m.



Slika 45: Modelne ploskve plazov z različnimi metodami interpolacije (mreža intervala 0.25 m)

Kasneje sem izdelala še modelne ploskve s stranicami mreže 1 m, da ugotovim kako večja celica vpliva na končno natančnost. Dodatno pa sem zmanjšala tudi gostoto originalnih podatkov s filtrom Octree za 80%. Korak filtriranja oziroma zmanjšanja količine podatkov je pri delu z oblakom točk velikokrat nujno potreben. Mnogokrat se namreč zgodi, da programski paket, ki ga želimo uporabiti za nadaljno obdelavo, ne sprejme tako velikega števila točk. Želela sem ugotoviti za koliko se kvaliteta originalnih podatkov s tem poslabša. Slika 46 desno prikazuje modelno ploskev s pravilno mrežo točk intervala 1m, slika 46 levo pa modelno ploskev z zmanjšano gostoto vhodnih podatkov. Obe sliki sta primer triangulacije z linearno interpolacijo.



Slika 46: Modelna ploskev z intervalom mreže 1 m (desno) in modelna ploskev z zmanjšano gostoto vhodnih podatkov z intervalom mreže 0.25 m (levo)

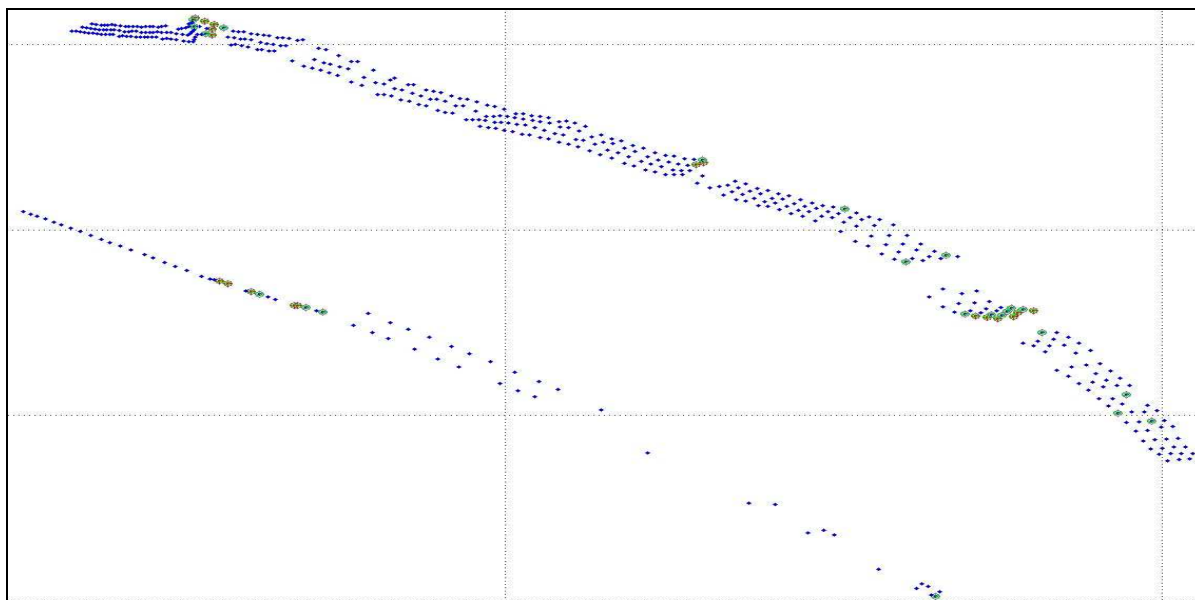
Zaradi hitrejše računalniške obdelave (za izračun modelnih ploskev potrebuje program včasih tudi več ur) sem v primeru vključenih vseh podatkov skeniranja uporabila samo območje, kjer se nahajajo tudi podatki pridobljeni z elektronskim tahimetrom. To je tudi razlog, da ploskve v primeru zmanjšane gostote vhodnih podatkov izgledajo vizualno drugače. V njihovem primeru je ploskev izračunana za celoten del plaz, ki smo ga skenirali.

## 6.2 Izbira primernih podatkov za primerjavo

Primerjava meritev v prvem koraku je pokazala prisotnost grobih pogreškov v meritvah. Izkazalo se je, da so ti razlog pomanjkanja oziroma odsotnosti meritev laserskega skeniranja na določenih območjih na plaz, predvsem so to območja, kjer so drenažni jarki. V primeru obeh metod je na teh mestih prišlo do mrtvega kota oziroma nevidnih delov terena. Če bi snemanje z obema metodama posneli iz istega stojišča, bi s tem zagotovili enake pogoje in do takšnih primerov ne bi prišlo. V našem primeru pa smo z laserskim skenerjem plaz posneli z druge (leve) strani plaz kot z elektronskim tahimetrom ter je zato prišlo do razlik med vidnostjo terena med metodama.

Ker je namen primerjave meritev predvsem primerjava natančnosti meritev, sem izbrala samo točke, kjer so pogoji za obe metodi enaki. Odstranila sem točke na robovih pri drenažnih

jarkih in na mestih, kjer je gostota meritev laserskega skenerja zelo majhna. Na sliki 47 so z zeleno in rdečo barvo prikazane točke, kjer so bila odstopanja veliko večja kot v primeru večine (tudi do -0.6 m).



Slika 47: Prikaz položaja grobih napak

### 6.3 Postopek primerjave

Podatki za primerjavo so sedaj pripravljene. Točke posnete z elektronskim tahimetrom (484 točk) sem primerjala z vsako od modeliranih ploskev. Programski paket Surfer 8 omogoča izračun višine na modelirani ploskvi za vsak  $x$  in  $y$ . Če mu podamo koordinate  $x$ ,  $y$  in  $z$  točk posnetih z elektronskim tahimetrom, nam izračuna višinske razlike oziroma odstopanja višin med podanimi točkami in pripadajočimi točkami na modeliranih ploskvah. Modelirane ploskve uporabljene za primerjavo so po vrsti:

- ploskve z mrežo intervala 0.25 m
- ploskve z mrežo intervala 1 m ter nazadnje še
- ploskve, ki so bile izračunane z manjšo gostoto vhodnih podatkov.

Za analizo vzorca odstopanj med dvema setoma podatkov je običajna statistična obravnava, pri čemer računamo srednjo vrednost, standardno deviacijo, RMSE (angl. Root Mean Square Error), idr. Najbolj pogosto uporabljena in priporočana z mnogimi standardi je mera RMSE – koren srednjega kvadratnega pogreška. Izračuna porazdelitev pogostosti odstopanj med referenčnimi točkami (določene s klasično geodetsko izmero) in pripadajočimi točkami modelne ploskve. Matematična formula za izračun RMSE je:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{DEMi} - z_{REFi})^2}$$

Kjer so:  $z_{DEMi}$ ... vrednost višine i-te točke na površini modelne ploskve

$z_{REFi}$ ... vrednost višine i-te točke referenčnih podatkov

n... število točk

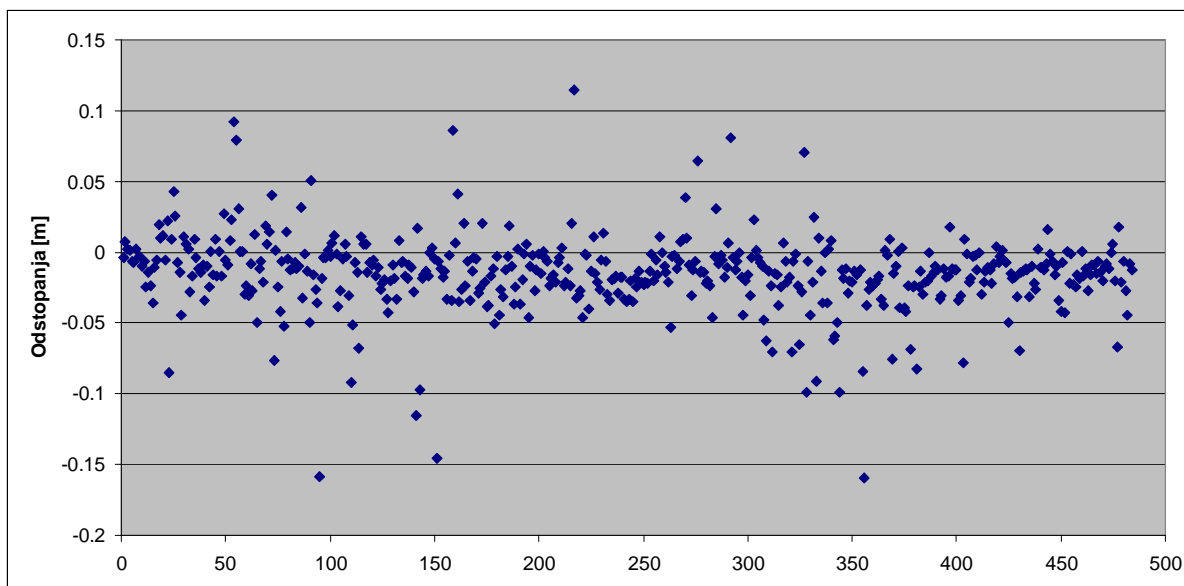
Večja kot je RMSE vrednost, večje je odstopanje med setoma podatkov. Čim večji je vzorec podatkov, tem bolj se vrednost RMSE približa vrednosti standardne deviacije.

## 6.4 Rezultati primerjave

Zaradi preglednosti so na tem mestu grafično prikazani rezultati primerjave višinske komponente samo za primer triangulacije z linearno interpolacijo (v nadaljevanju triangulacija), ostali pa se nahajajo v poglavju Priloge. V poglavju 6.4.1 so predstavljeni rezultati za primer modelne ploskve (0.25 m) izračunane iz originalnih podatkov, poglavje 6.4.2 opisuje rezultate za primer modelne ploskve z mrežo 1 m. Poglavje 6.4.3 vsebuje rezultate primerjave za primer manjše gostote vhodnih podatkov, poglavje 6.4.4 pa povzema rezultate primerjav.



### 6.4.1 Pravilna mreža točk intervala 0.25 m



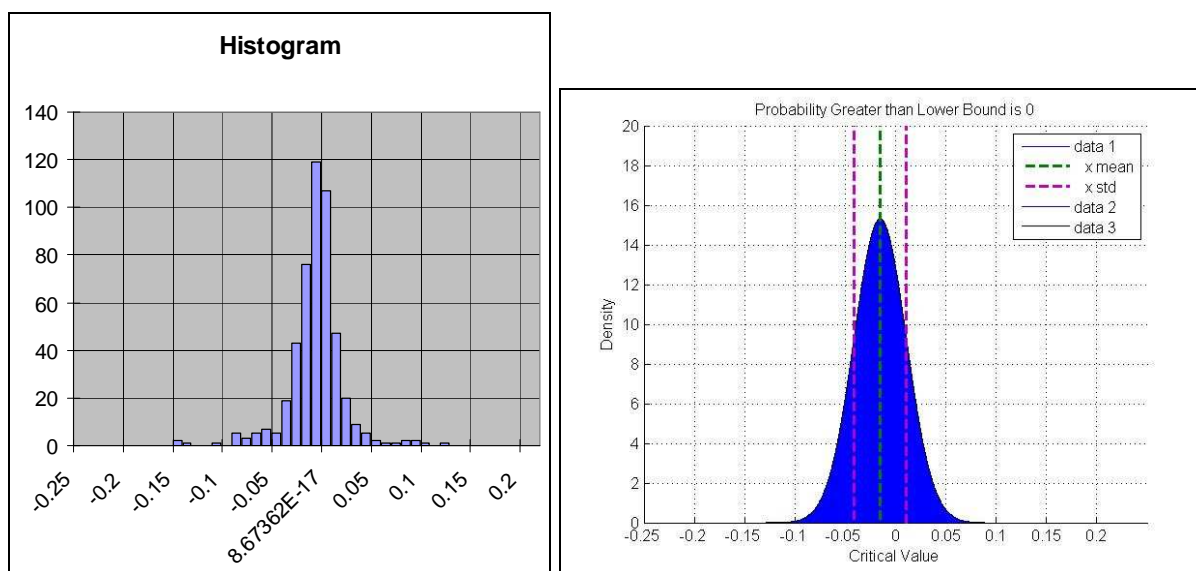
Slika 48: Prikaz odstopanj – mreža intervala 0.25 m

Preglednica 1: Primerjava višin (mreža intervala 0.25 m)

	Triangulacija	Kriging	Metoda naravnih sosedov	Metoda inverzne razdalje na potenco
Število vrednosti	484	484	484	484
Vsota odstopanj [m]	-7.2756	-7.4908	-7.4038	-8.5223
Minimum [m]	-0.1590	-0.1701	-0.1583	-0.1718
Maksimum [m]	0.1149	0.1016	0.0969	0.1074
Obseg [m]	0.2738	0.2718	0.2552	0.2793
Srednja vrednost [m]	-0.0150	-0.0155	-0.0153	-0.0176
Mediana [m]	-0.0131	-0.0133	-0.0131	-0.0151
Varianca [m]	0.0007	0.0007	0.0007	0.0008
Standardni odklon [m]	0.0270	0.0260	0.0261	0.0285
RMSE [m]	0.0309	0.0303	0.0302	0.0335

Iz prikaza odstopanj točk na sliki 48 lahko vidimo, da je točk z večjimi vrednostmi odstopanj zelo malo. Vse vrednosti odstopanj padejo v interval od -17 cm do 11 cm. Statistične vrednosti (podane v preglednici 1) kažejo na visoko natančnost meritev laserskega skeniranja, s standarnimi odkloni manjšimi od 3 cm. Srednja vrednost v primeru vseh izračunanih ploskev je negativna vrednost in se nahaja v mejah od -1.5 cm do -1.76 cm. Vrednost RMSE ima nekoliko večje vrednosti od standardne deviacije in se nahaja v intervalu od 3 cm do 3.1cm.

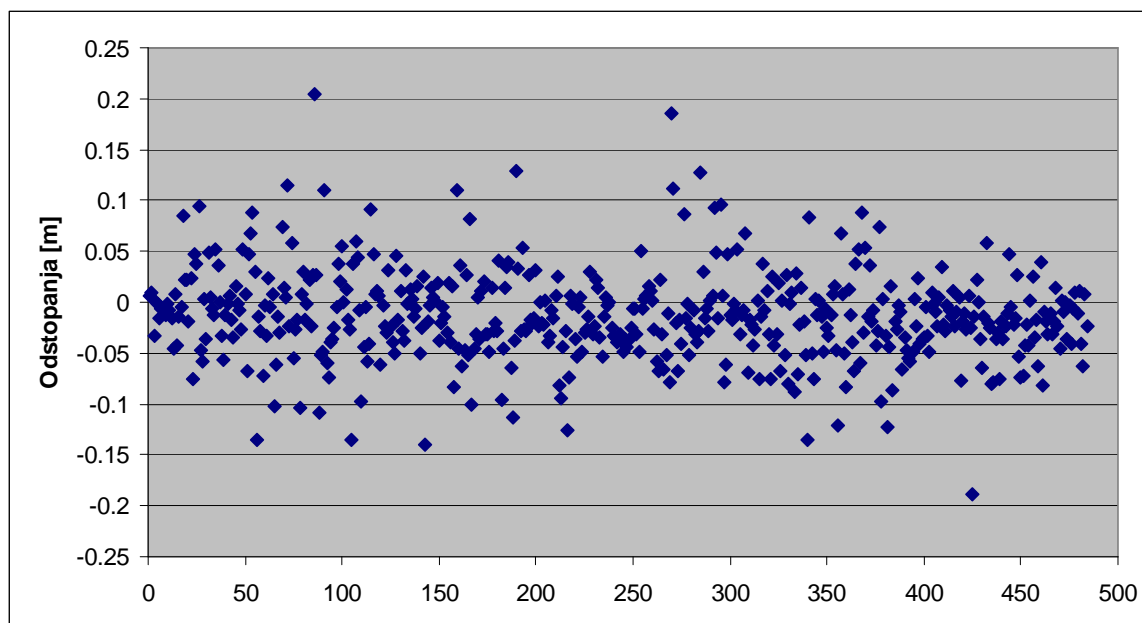
Histogram meritev prikazuje pogostost vrednosti odstopanj. Vrednosti odstopanj so razdeljene v razrede velikosti 1 cm.



Slika 49: Histogram in graf normalne porazdelitve – mreža intervala 0.25 m

Histogrami in grafi normalne porazdelitve so v primerjanih štirih primerih precej podobni. Graf normalne porazdelitve je določen s srednjo vrednostjo in standardno deviacijo. Znotraj meja [srednja vrednost-standardni odklon, srednja vrednost+standardni odklon] se nahaja 68% vseh vrednosti. Grafi in histogrami so vsi za približno enako vrednost (1.5 cm) premaknjeni v levo od vrednosti 0. Če primerjam obliko grafov normalne porazdelitve, lahko ugotovim tudi, da je oblika vseh ozka, kar pomeni, da se večina odstopanj nahaja znotraj malega intervala vrednosti.

### 6.4.2 Pravilna mreža točk intervala 1 m

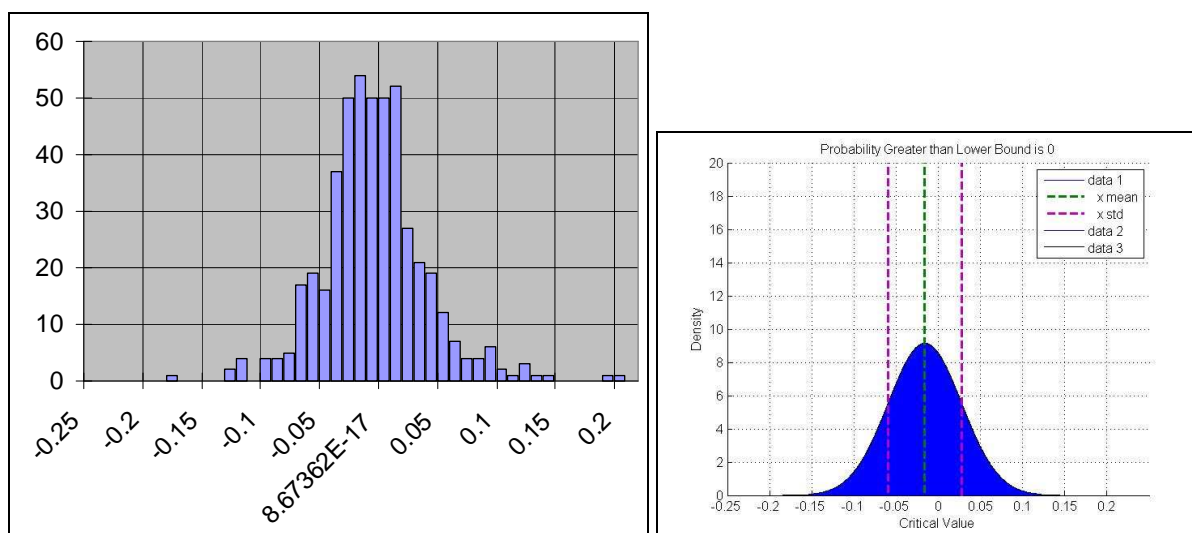


Slika 50: Prikaz odstopanj – mreža intervala 1 m

Preglednica 2: Primerjava višin (mreža intervala 1 m)

	Triangulacija	Kriging	Metoda naravnih sosedov	Metoda inverzne razdalje na potenco
Število vrednosti	484	484	475	484
Vsota odstopanj [m]	-6.5040	-6.2697	-6.2893	-7.680
Minimum [m]	-0.1883	-0.1825	-0.1888	-0.1926
Maksimum [m]	0.2039	0.2005	0.1978	0.2020
Obseg [m]	0.3922	0.3829	0.3866	0.3947
Srednja vrednost [m]	-0.0134	-0.0129	-0.0132	-0.0159
Mediana [m]	-0.0156	-0.0145	-0.0163	-0.0173
Varianca [m]	0.0020	0.0020	0.0019	0.0019
Standardni odklon [m]	0.0448	0.0445	0.0441	0.0436
RMSE [m]	0.0467	0.0463	0.0460	0.0464

Že iz primerjave prikaza odstopanj (sliki 48 in 50) se zelo dobro vidi, da so v tem primeru vrednosti odstopanj bolj razpršene kot v primeru mreže intervala 0.25 m. Tudi najmanjša in največja vrednost sta se povečali. Minimalna vrednost v primeru metode inverznih razdalj na potenco je -0.19 m (razlika od mreže 0.25m za 3 cm). Maksimalne vrednosti so se s povečavo intervala mreže na 1 m povečale v povprečju za kar 10 cm in imajo vrednosti 0.20 m. Srednja vrednost je tudi v primeru mreže intervala 1 m za vse primere interpolacije negativna vrednost in znaša od -1.3 cm do -1.6 cm (inverzna razdalja na potenco). Vrednosti standardnega odklona so za vse primere podobne, so okrog 4.4 cm. Razlika od primera mreže 0.25m za 1.8cm. Standardni odkloni in vrednosti RMSE so v tem primeru bližje skupaj, RMSE je 4.6 cm. Vrednosti so se, če primerjam z mrežo 0.25 m povečale za 1.6 cm.

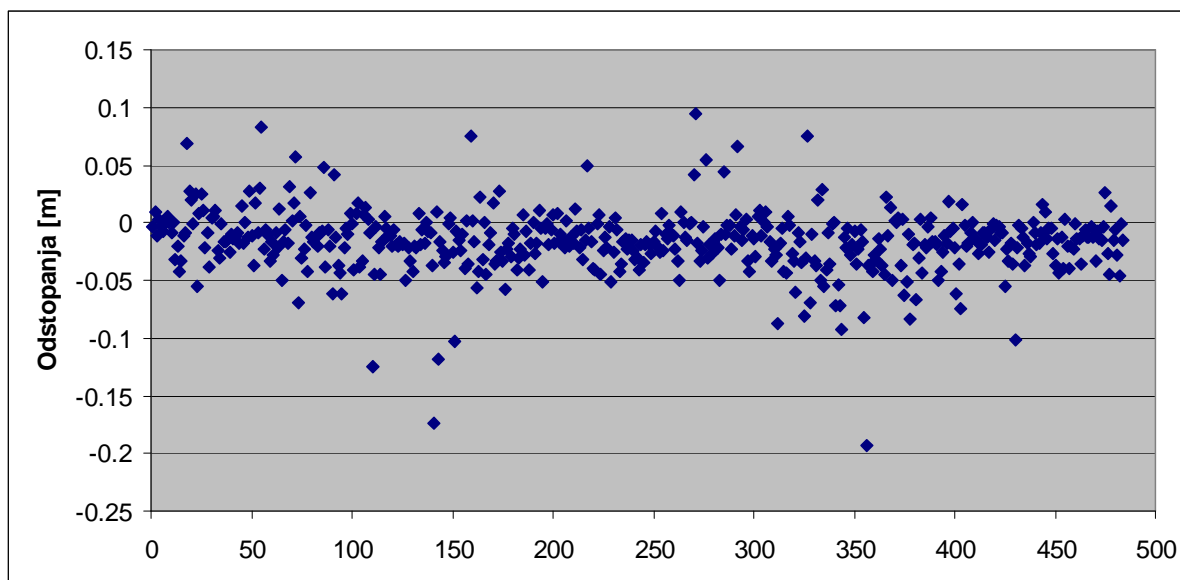


Slika 51: Histogram in graf normalne porazdelitve – mreža intervala 1m

Tudi histogrami in grafi normalne porazdelitve (slika 51) prikazujejo dejstvo, da so vrednosti odstopanj bolj široko razporejene, kot v prejšnjem primeru. Grafi so po obliki bolj ploščati in standardni odkloni so večje vrednosti. Različne metode interpolacije tudi v tem primeru zagotavljajo podobne rezultate, manjša odstopanja so vidna le pri metodi inverznih razdalj na potenco.

### 6.4.3 Pravilna mreža točk intervala 0.25 m – manjša gostota podatkov

Prejšnji primerjavi sta bili izvedeni z originalnimi podatki, ki jih pridobimo z laserskim skeniranjem. Ponavadi pa množici točk (oblak točk) zmanjšamo število, ter s tem olajšamo včasih pa tudi sploh omogočimo nadaljno obdelavo. Zanimalo me je v kolikšni meri vpliva manjša gostota podatkov na natančnost rezultatov, zato je na tem mestu podana tudi ta primerjava.



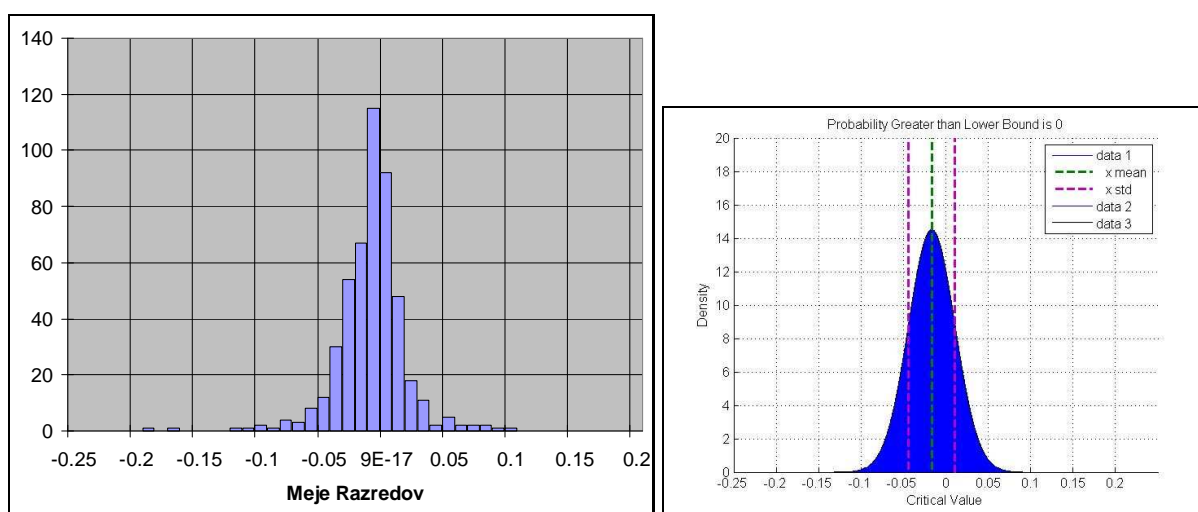
Slika 52: Prikaz odstopanj - manjša gostota vhodnih podatkov, mreža intervala 0.25 m

Preglednica 3: Primerjava višin (manjša gostota vhodnih podatkov, mreža intervala 1 m)

	Triangulacija	Kriging	Metoda naravnih sosedov	Metoda inverzne razdalje na potenco
Število vrednosti	484	484	484	484
Vsota odstopanj [m]	-8.0421	-8.1719	-7.9369	-7.6279
Minimum [m]	-0.1936	-0.1931	-0.1738	-0.1525
Maksimum [m]	0.0944	0.0846	0.0866	0.1528
Obseg [m]	0.2880	0.2777	0.2604	0.3053
Srednja vrednost [m]	-0.0166	-0.0169	-0.0164	-0.0158
Mediana [m]	-0.0157	-0.0152	-0.0155	-0.0147

Varianca [m]	0.0008	0.0008	0.0007	0.0012
Standardni odklon [m]	0.0275	0.0279	0.0274	0.0352
RMSE [m]	0.0321	0.0326	0.0319	0.0386

Vrednosti odstopanj so na prvi pogled (slika 52) še vedno enakomerno porazdeljene okoli vrednosti 0. Zanimivo je, da so minimalne vrednosti bližje vrednosti 0 kot v primeru uporabljenih vseh podatkov. Standardni odkloni znašajo okrog 2.75 cm, razen v primeru metode inverzne razdalje na potenco, kjer je 3.52 cm. Vrednosti so enake oziroma za 1mm različne od uporabljenih vseh podatkov. Srednja vrednost je tudi tukaj v vseh primerih za približno enako vrednost (-1.6 cm) pod 0. Če vrednost primerjam z vrednostjo v primeru vseh podatkov, se razlikujeta za 1.5 mm.



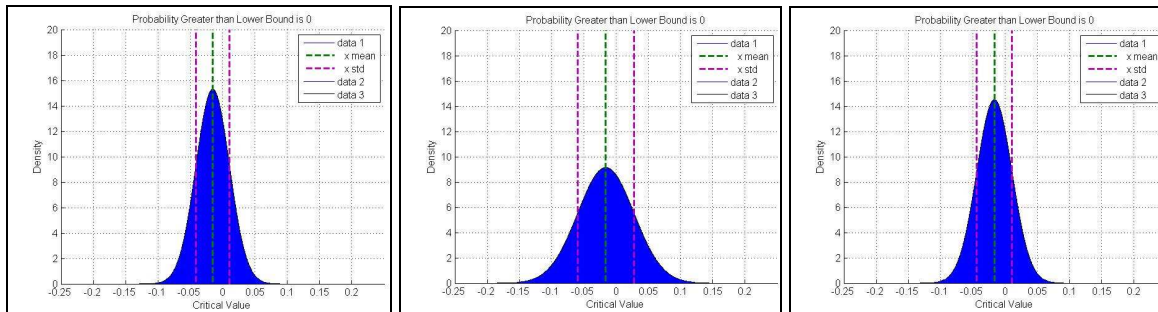
Slika 53: Histogram in graf normalne porazdelitve – manjša gostota vhodnih podatkov, mreža intervala 0.25 m

Grafi so v primerjavi z vsemi podatki še vedno precej skupaj. Razen v primeru grafa metode inverzne razdalje na potenco, kjer vrednosti odstopanj zavzemajo širši pas vrednosti. Srednja vrednost in s tem sredina grafov je kot v vseh primerih do sedaj tudi tokrat zamaknjena v negativno stran za 1.6 cm.

### 6.4.4 Primerjava vseh

Preglednica 4: Primerjava višin – vsi obravnavani primeri

	Mreža 0.25 m	Mreža 1m	Manjša gostota vhodnih podatkov mreža 0.25 m
Minimum [m]	[-0.1583, 0.1718]	[-0.1883, -0.1927]	[-0.1525, -0.1936]
Maksimum [m]	[0.0969, 0.1149]	[0.1978, 0.2039]	[0.1528, 0.0944]
Obseg [m]	[0.2552, 0.2793]	[0.3829, 0.3947]	[0.2604, 0.3053]
Srednja vrednost [m]	[-0.0150, -0.0176]	[-0.0130, -0.0159]	[-0.0158, -0.0169]
Mediana [m]	[-0.0131, -0.0151]	[-0.0145, 0.0173]	[-0.0147, -0.0157]
Varianca [m]	[0.0007, 0.0008]	[0.0019, 0.0020]	[0.0007, 0.0012]
Standardni odklon [m]	[0.0260, 0.0285]	[0.0441, 0.0448]	[0.0274, 0.0352]
RMSE [m]	[0.0302, 0.0335]	[0.0460, 0.0467]	[0.0319, 0.0386]



Slika 54: Grafi normalne porazdelitve: levo – mreža 0.25 m, v sredini – mreža 1m, desno – manjša gostota podatkov

Preglednica 4 vsebuje rezultate vseh metod, pri čemer so vrednosti podane v obliki intervalov, ki predstavljajo najmanjšo in največjo vrednost posamezne statistične mere med vsemi uporabljenimi metodami interpolacije.

Če sedaj primerjam vse pridobljene rezultate, lahko ugotovim, da se rezultati v primeru uporabljenih vseh originalnih podatkov in podatkov z zmanjšanim številom točk le malo razlikujejo. Standardni odklon je v primeru manjše gostote podatkov le za 1 mm različen, kot

pri uporabljenih vseh podatkih. Večja odstopanja so opazna le v primeru metode inverznih razdalj na potenco, kjer se standardni odklon razlikuje za 7 mm. Tudi iz grafov normalne porazdelitve (slika 54) je razvidno, da sta grafa na levi in desni strani zelo podobna. Glede na to, da smo zmanjšali gostoto originalnih podatkov na 20%, so rezultati zelo dobri, očitno pa je potrebno biti pazljiv pri izbiri metode interpolacije, saj vse ne zagotavljajo dobrih rezultatov.

V primeru mreže intervala 1m so odstopanja večja. Vrednost standardnega odklona in vrednost RMSE je tako dva krat večja. Tudi graf normalne porazdelitve je zato manj stisnjen okrog srednje vrednosti, kot v primeru ostalih dveh.

Podatek o srednji vrednosti, vrednosti minimalnega in maksimalnega odstopanja, histogrami in grafi normalne porazdelitve kažejo na prisotnost sistematičnega pogreška. Vrednost je precej majhna (1.5 cm). Za gotovo prepričanost v to dejstvo bi bilo potrebno meritve primerjati še na kakšnem drugem primeru.

Na tem mestu moram poudariti, da je višina lasersko določenih točk uporabljena v primerjavah precej odvisna od metode interpolacije. Na rezultate primerjave vpliva v veliki meri tudi oblikovanost površja. V konkretnem primeru je bil teren, ki smo ga skenirali zelo razbrazdan z veliko detajla (grude zemlje in podobno), kar dodatno vpliva na rezultate interpolacij. Rezultati primerjave meritev bi najverjetneje bili še boljši, če bi meritve izvajali na bolj gladko oblikovanem površju.



## 7 Zaključek

Osnovni cilj diplomske naloge je bila analiza primernosti uporabe tehnologije laserskega skeniranja za metrično dokumentiranje zemeljskih plazov. Pri zajemu prostorskih podatkov plazu je zelo pomembna pridobitev prvih podatkov takoj po sprožitvi plazu. S tem so mišljeni lokacija plazu, njegov obseg, smer premikanja, volumen in mase plazovine ter izvedeni podatki kot so profili, plastnice in podobno. Uspešnost prvih ukrepov na plazu je torej odvisna tudi od hitrih in kvalitetnih geodetskih obdelav. Poleg tega so spremembe na plazu najintenzivnejše v začetni fazi plazenja.

Prvi ukrepi navadno zajemajo odločitve o zaščiti ogroženih prebivalcev in premoženja. Te odločitve so vezane na dimenzije plazu, hitrost njegovega širjenja, vrste plazenja itd. Naslednji korak je vezan na ublažitev posledic plazenja in zmanjševanje obsega njegovega širjenja. Na plazu se izvajajo prvi nujni ukrepi, kot so odvodnjavanje vod, preusmerjanje plazine, zemeljska dela na plazu in podobno. Ta dela je možno bistveno lažje in kvalitetno opraviti, če imamo na voljo ustrezne podatke o plazu.

Praktičen primer izmere dela plazu Slano blato je pokazal, da je mogoče za manjše plazove, ki se pojavljajo na vizualno preglednem in neporaščenem terenu, meritve opraviti že v kakšni uri, za velike plazove v težkih razmerah (težko prehoden, poraščen teren, slabo vreme) pa iz več stojišč v roku nekaj ur. Ko v naslednjem dnevu po meritvah pridobimo že prve obdelane prostorsko opredeljene geopodatke, lahko k sprejemanju, planiranju ter izvajanju prvih nujnih zaščitnih ukrepov pristopimo z večjo stopnjo zanesljivosti. Ta prednost je še posebej pomembna pri plazovih velikega obsega.

Z meritvami z laserskim skenerjem smo pridobili podatke o dimenzijah plazu (dolžina, širina, površina), izgledu plazenja (glava, telo, noga, peta), znakih plazenja (plastnice plazu, zgornji odlomni rob, stranske drsne razpoke), oblikovanosti površine plazu ter naklonu terena. Do sedaj so bili takšni podatki na voljo šele po nekaj tednih, celo mesecih od začetka plazenja in je bilo potrebno začetne nujne ukrepe na plazu izvajati brez za ta namen potrebnih geodetskih podlag. Ker je prostorski prikaz kombiniran s fotografijo plazu, grafični prikazi plazu vizualno dobro pokažejo izgled terena, kot je viden s prostim očesom.

Zadnji del diplomske naloge je predstavljala primerjava meritev pridobljenih z dvema različnima pristopoma – meritve z elektronskim tahimetrom in laserskim skenerjem. Primerjala sem višine točk izmerjenih na klasičen način ter pripadajočih točk na modeliranih ploskvah, pri čemer sem uporabila več metod interpolacije, različna intervala med točkami mreže – 0.25 m in 1 m ter različno gostoto vhodnih podatkov. Rezultati so pokazali, da je 68% vrednosti odstopanj znotraj 2.8 cm, če uporabimo originalne podatke. Prav takšno vrednost dobimo, če uporabimo podatke, ki jih filtriramo s filtrom octree, ki ga omogoča program RiSCAN PRO. Pozorni moramo biti le na izbiro ustrezne metode interpolacije, ker se rezultati različnih metod (še posebej kadar je podatkov manj) lahko zelo razlikujejo med seboj. V mojem primeru so bili rezultati najslabši v primeru uporabe metode inverznih razdalj na potenco, rezultati ostalih treh pa so zelo blizu skupaj. Rezultati primerjave bi bili najverjetneje lahko tudi boljši, če bi meritve z obema inštrumentoma izvajali z istih stojišč, in s tem zagotovili enake pogoje ter če ploskev terena ne bi bila tako razgibana. Uporaba mreže intervala 1 m z vidika statističnih rezultatov ni smiselna. Standardne deviacije so skoraj dva krat večje in že sam vizualni izgled modelne ploskve je veliko slabši.

Zaključna misel diplomske naloge bi tako bila, da je tehnologija terestričnega laserskega skeniranja odlična za metrično dokumentiranje zemeljskih plazov, tako iz vidika učinkovitosti del na terenu, izdelkov, ki jih je možno iz skeniranih podatkov izpeljati, kot iz vidika primerjave skladnosti meritev z elektronskim tahimetrom.

## Viri

Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A. 2004. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies.

<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm5/papers/558.pdf> (14.9.2006)

Dubbini, M., Zanutta, A. 2005. Terrestrial laser scanning for landslide movements detection.

<http://www.cirgeo.unipd.it-cirgeo-convegna-wsh2005-atti-papers-WSH2005-2195.pdf>  
(15.08.2006)

Giussani, A., Scaioni, M. 2004. Application of TLS to support landslides study: survey planning, operational issues and data processing.

[http://www.isprs.org/commission8/workshop\\_laser\\_forest/GIUSSANI.pdf](http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/GIUSSANI.pdf) (18.09.2006)

Hsiao, K. H., Liu, J. K., Yu, M. F., Tseng, Y. H. 2004. Change detection of landslide terrains using ground – based LIDAR data.

<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/122.pdf> (14.9.2006)

Institute of cartography and geoinformatics – spletna stran:

<http://www.ikg.uni-hannover.de/> (20.02.2007)

Komac, M. 2005. Napoved verjetnosti pojavljanja plazov z analizo satelitskih in drugih prostorskih podatkov. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 232 str.

Komac, M., Mikoš, M., Fajfar, D., Ravnik, D., Gvozdanović, T., Komel, P., Miklavčič, L., Fras, M. 2005. Novelacija in nadgradnja informacijskega sistema o zemeljskih plazovih in vključitev v bazo GIS\_UJME.

[http://www.sos112.si/slo/tdocs/zem\\_plaz\\_gis\\_ujme.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/zem_plaz_gis_ujme.pdf) (04.01.2007)

Komac, B., Zorn, M. 2002. Aplikativne možnosti geografije pri preučevanju pobočnih procesov.

[http://www.ff.uni-lj.si/oddelki/geo/publikacije/dela/files/Dela\\_18/15%20komac%20zorn.pdf](http://www.ff.uni-lj.si/oddelki/geo/publikacije/dela/files/Dela_18/15%20komac%20zorn.pdf)  
(16.01.2007)

Lambrou, E., Pantazis, G. 2006. A new geodetic methodology for the accurate Documentation and Monitoring of inaccessible surfaces.

[https://www.fig.net/commission6/baden\\_2006/PDF/O3D/Lambrou.pdf](https://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/O3D/Lambrou.pdf) (14.04.2007)

Lattuada, R., Raper, J. 1996. Application of 3D Delaunay triangulation algorithms in geoscientific modelling.

[http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/lattuada\\_roberto/paper.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/lattuada_roberto/paper.html) (30.05.2007)

Leica geosystems – spletna stran: <http://www.leica-geosystems.com> (13.09.2006)

Mavsar, P. 2006. Izdelava virtualnega modela kraške jame iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 56 f.

Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Landslides in BC – spletna stran:

<http://www.em.gov.bc.ca/Mining/Geosurv/Surficial/landslid/default.htm> (25.01.2007)

Mozetič, B. 2004. Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje.

[http://www.geodetski-vestnik.com/48/3/gv48-3\\_351-362.pdf](http://www.geodetski-vestnik.com/48/3/gv48-3_351-362.pdf) (11.10.2006)

Pfilpsen, B. 2006. Volume computation – a comparison of total station versus laser scanner and different software.

[http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn\\_nbn\\_se\\_hig\\_diva-90-1\\_fulltext.pdf](http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_hig_diva-90-1_fulltext.pdf)  
(14.04.2007)

Program RiSCAN PRO – pomoč

Program Surfer 8 - pomoč

Ribičič, M. 2002a. Inženirska geologija I : skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta: 1 zv. (loč. pag.).

Ribičič, M. 2002b. Zemeljski plazovi, usadi, podori.

[http://www.sos112.si/slo/tdocs/naravne\\_nesrece.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/naravne_nesrece.pdf) (04.01.2007)

Ribičič, M. 2002c. Izračun volumnov in sanacija plazu Slano blato nad Lokavcem pri Ajdovščini.

<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2002/u09.pdf> (09.12.2006)

Riegl laser measurement systems – spletna stran: <http://www.riegl.com> (28.06.2006)

Stanek, H. 2004. Terrestrial laser – scanning – universal method or a specialist's tool?.

[http://www.fig.net/pub/bratislava/papers/ts\\_02/ts\\_02\\_stanek.pdf](http://www.fig.net/pub/bratislava/papers/ts_02/ts_02_stanek.pdf) (31.07.2006)

Trinks, I., Clegg, P., McCaffrey, K., Jones, R. et al. 2005. Mapping and analysing virtual outcrops.

[http://www.dur.ac.uk/react.res/RRG\\_web/pdf/publications/fulltext.pdf](http://www.dur.ac.uk/react.res/RRG_web/pdf/publications/fulltext.pdf) (04.04.2007)

University of Virginia, Computer science – spletna stran:

<http://www.cs.virginia.edu/> (07.06.2007)

Waggott, S., Clegg, P., Jones, R. 2005. Combining terrestrial laser scanning, RTK GPS and 3D visualisation: application of optical 3D measurement in geological exploration.

[http://www.dur.ac.uk/react.res/RRG\\_web/pdf/publications/waggot.pdf](http://www.dur.ac.uk/react.res/RRG_web/pdf/publications/waggot.pdf) (18.09.2006)



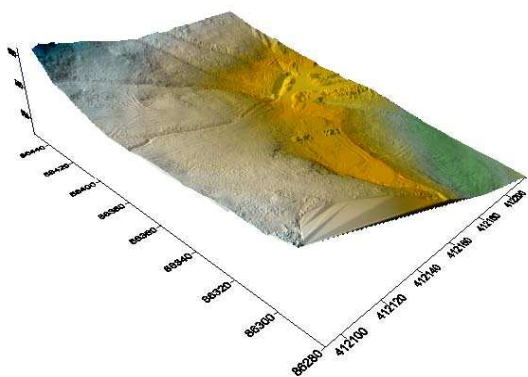
## **PRILOGE**



## Priloga A: Rezultati primerjave višin: pravilna mreža točk intervala 0.25 m

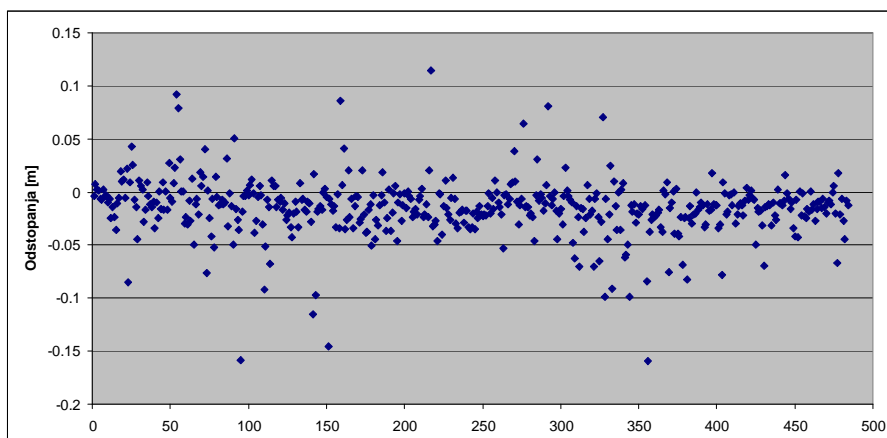
### Priloga A1: Rezultati za metodo triangulacija z linearno interpolacijo

Modelna ploskev

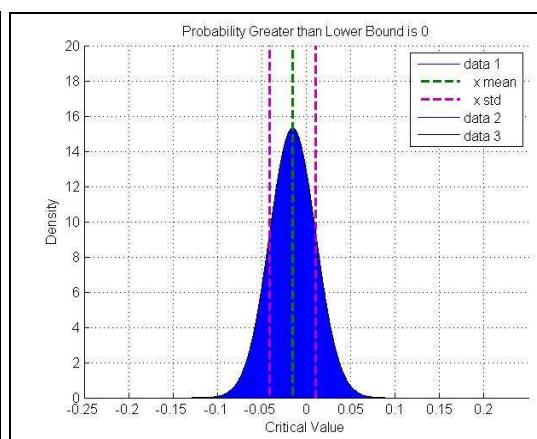
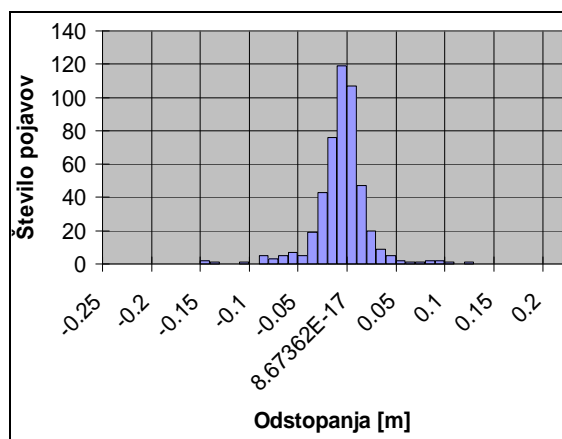


Število vrednosti	484
Vsota	-7.2756 m
Minimum	-0.1590 m
Maksimum	0.1149 m
Razdalja	0.2738 m
Srednja Vrednost	-0.0150 m
Mediana	-0.0131 m
Varianca	0.0007 m
Standardna deviacija	0.0270 m
RMSE	0.0309 m

Prikaz odstopanj

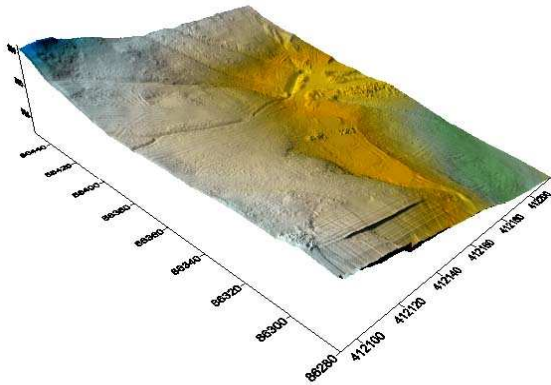


Histogram in graf normalne porazdelitve



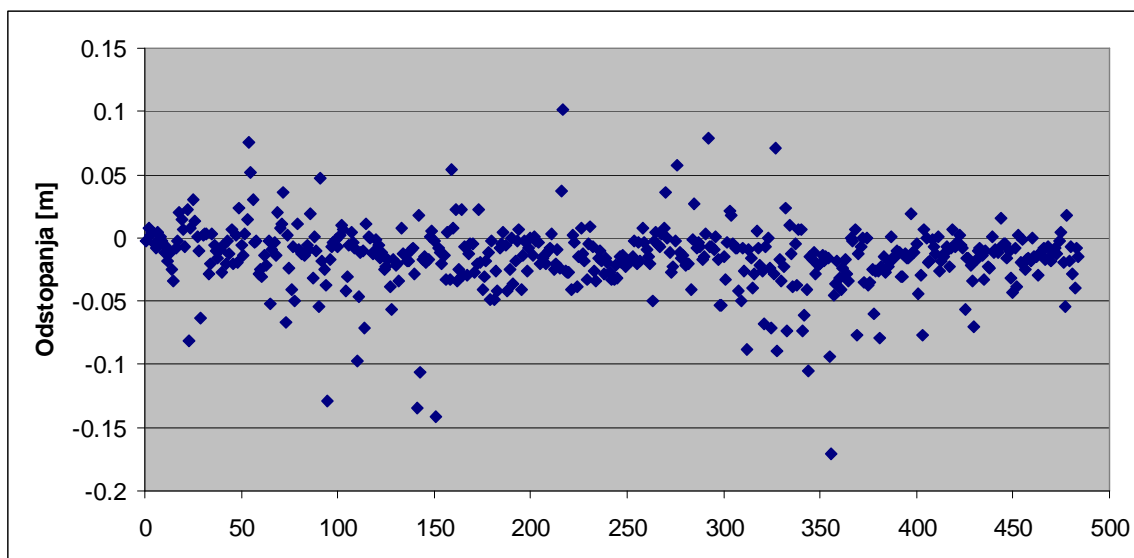
## Priloga A2: Rezultati za metodo kriging

Modelna ploskev

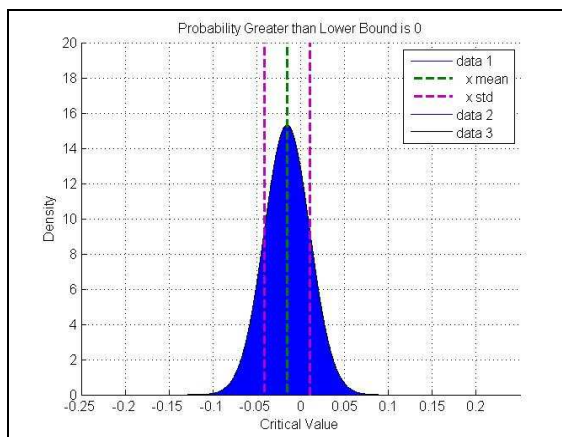
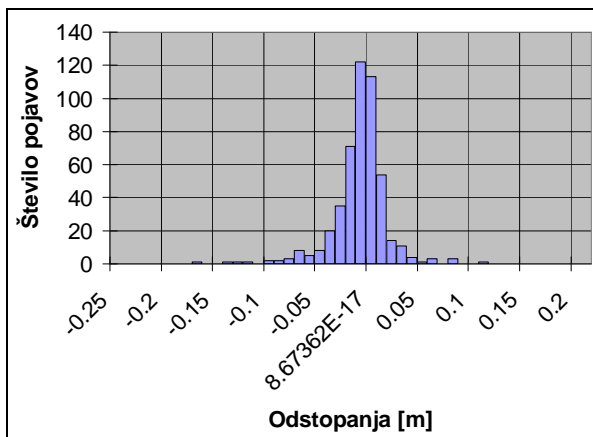


Število vrednosti	484
Vsota	-7.4908 m
Minimum	-0.1701 m
Maksimum	0.1016 m
Razdalja	0.2718 m
Srednja Vrednost	-0.0155 m
Mediana	-0.0133 m
Varianca	0.0007 m
Standardna deviacija	0.0260 m
RMSE	0.0303 m

Prikaz odstopanj

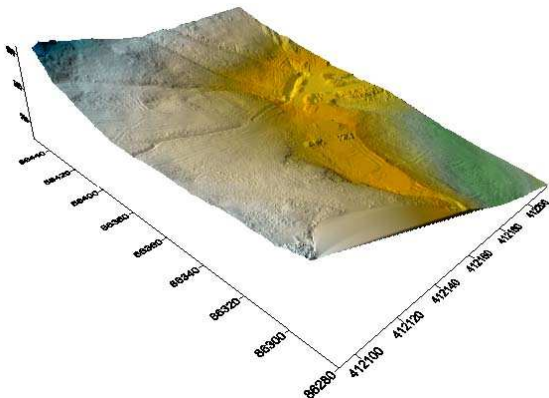


Histogram in graf normalne porazdelitve



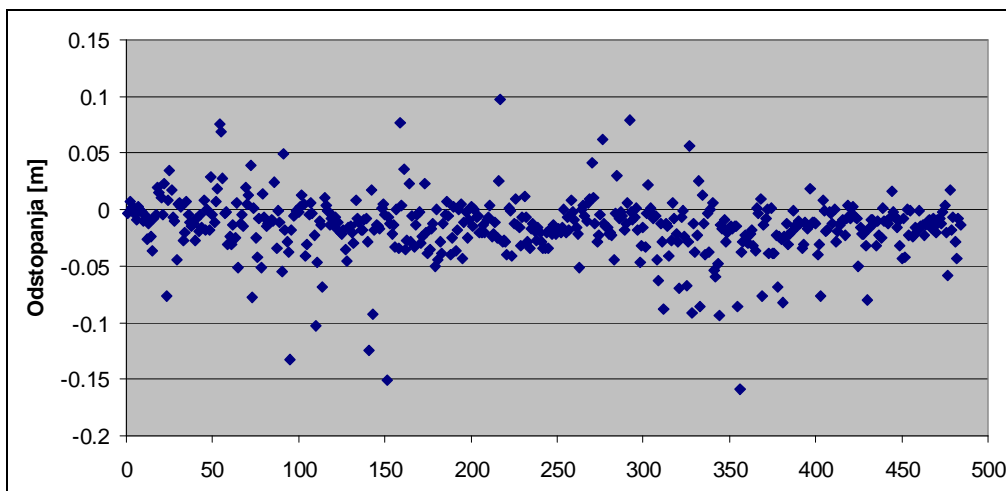
### Priloga A3: Rezultati za metodo naravnih sosedov

Modelna ploskev

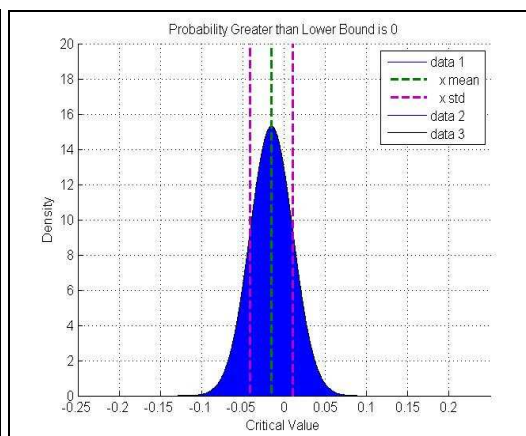
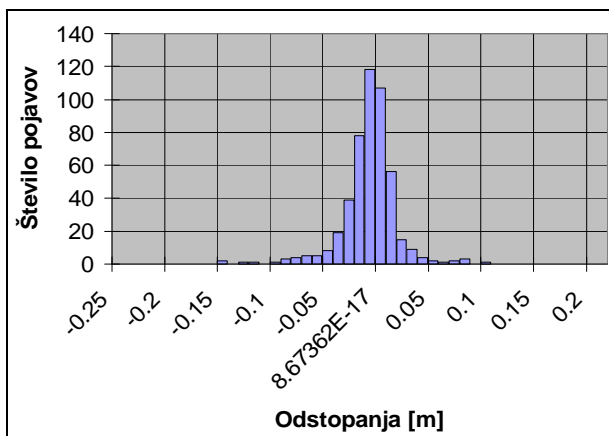


Število vrednosti	484
Vsota	-7.4038 m
Minimum	-0.1583 m
Maksimum	0.0969 m
Razdalja	0.2552 m
Srednja Vrednost	-0.0153 m
Mediana	-0.0131 m
Varianca	0.0007 m
Standardna deviacija	0.0261 m
RMSE	0.0302 m

Prikaz odstopanj

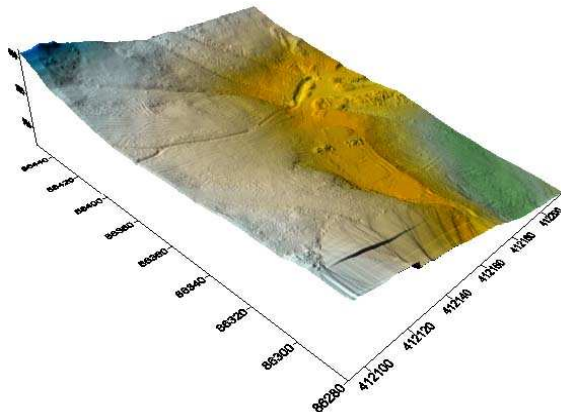


Histogram in graf normalne porazdelitve



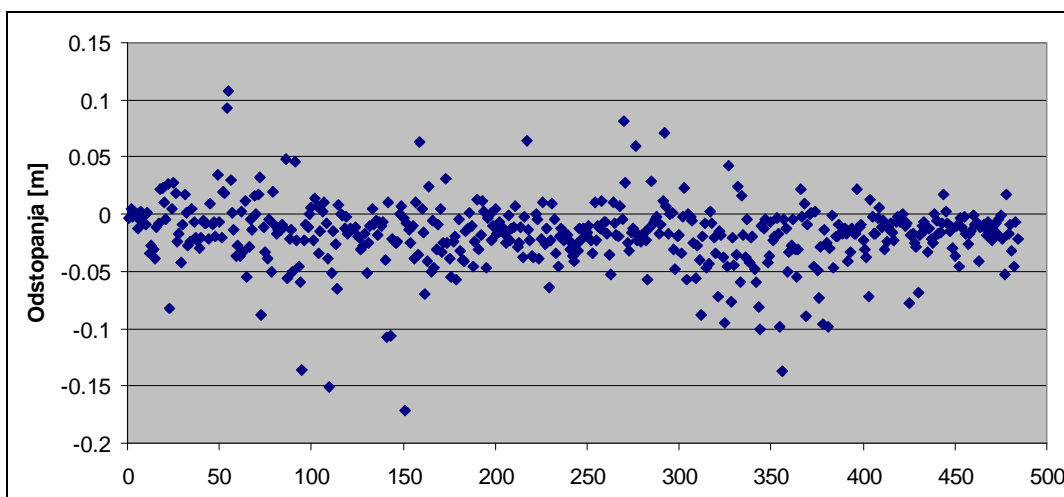
## Priloga A4:Rezultati za metodo inverzne razdalje na potenco

Modelna ploskev

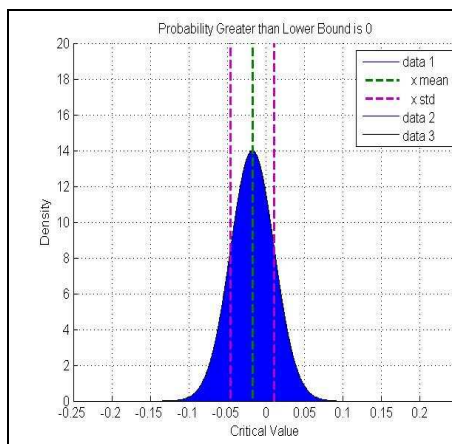
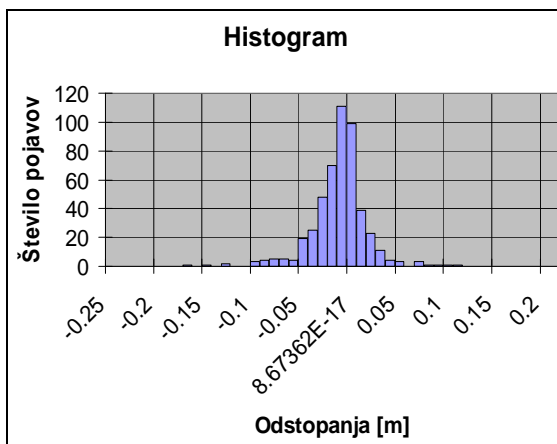


Število vrednosti	484
Vsota	-8.5223 m
Minimum	-0.1718 m
Maksimum	0.1074 m
Razdalja	0.2793 m
Srednja Vrednost	-0.0176 m
Mediana	-0.0151 m
Varianca	0.0008 m
Standardna deviacija	0.0285 m
RMSE	0.0335 m

Prikaz odstopanj



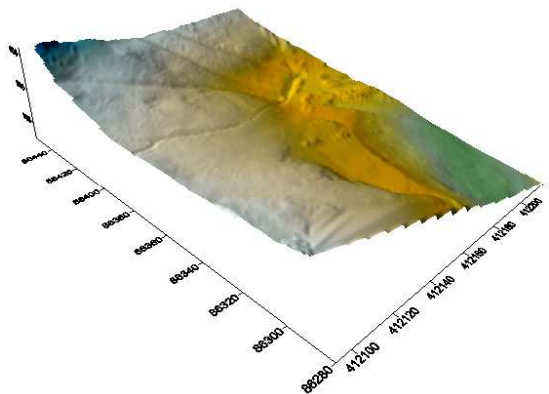
Histogram in graf normalne porazdelitve



## Priloga B: Rezultati primerjave višin: pravilna mreža točk intervala 1 m

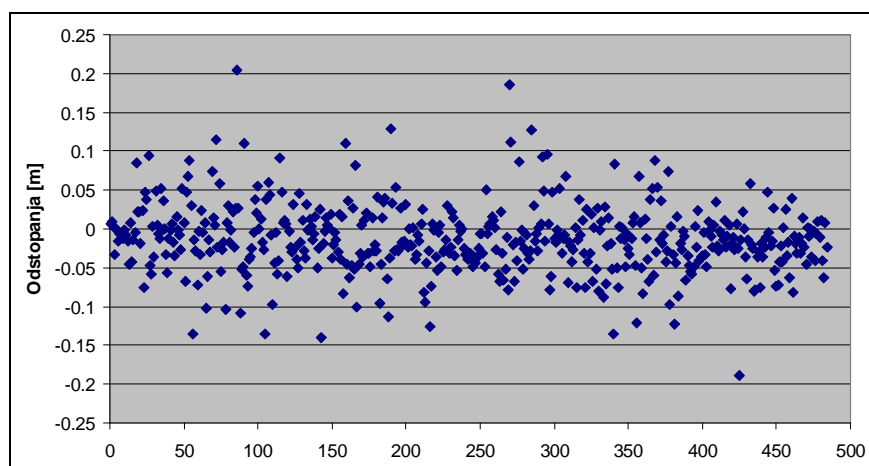
### Priloga B1: Rezultati za metodo triangulacija z linearno interpolacijo

Modelna ploskev

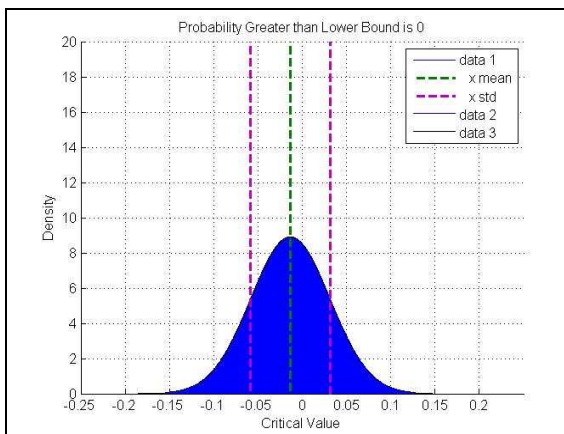
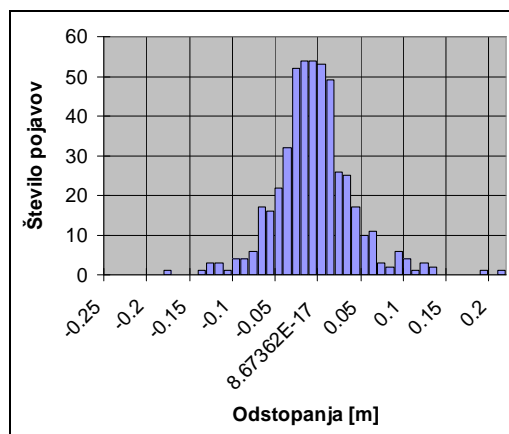


Število vrednosti	484
Vsota	-6.5040 m
Minimum	-0.1883 m
Maksimum	0.2039 m
Razdalja	0.3922 m
Srednja Vrednost	-0.0134 m
Mediana	-0.0156 m
Varianca	0.0020 m
Standardna deviacija	0.0448 m
RMSE	0.0467 m

Prikaz odstopanj

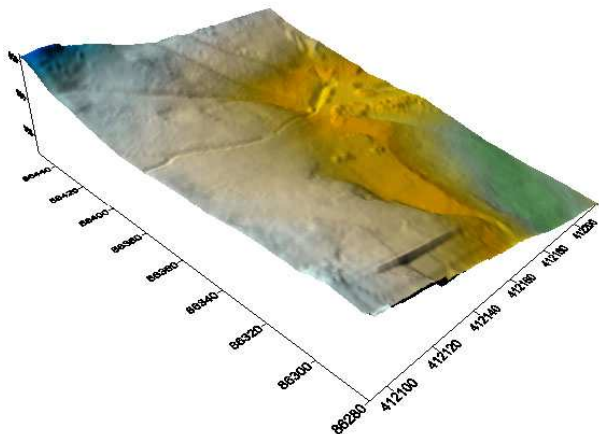


Histogram in graf normalne porazdelitve



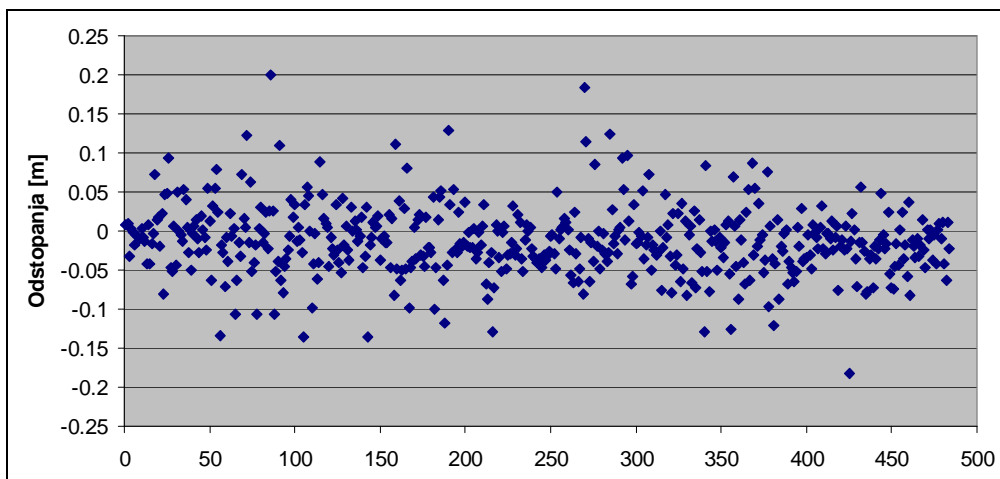
## Priloga B2: Rezultati za metodo kriging

### Modelna ploskev

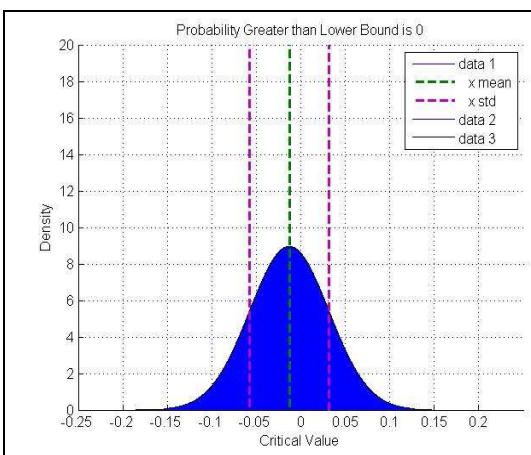
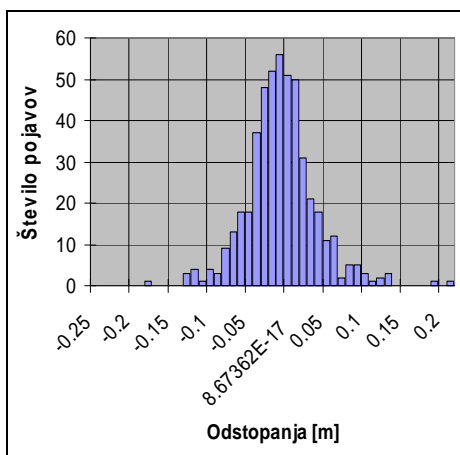


Število vrednosti	484
Vsota	-6.2697 m
Minimum	-0.1825 m
Maksimum	0.2005 m
Razdalja	0.3829 m
Srednja Vrednost	-0.0130 m
Mediana	-0.0145 m
Varianca	0.0020 m
Standardna deviacija	0.0445 m
RMSE	0.0463 m

### Prikaz odstopanj

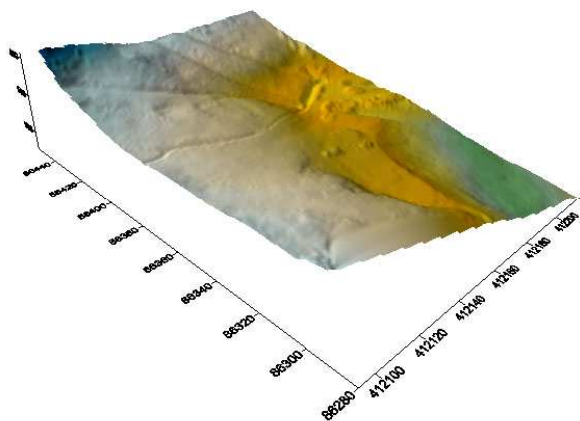


### Histogram in graf normalne porazdelitve



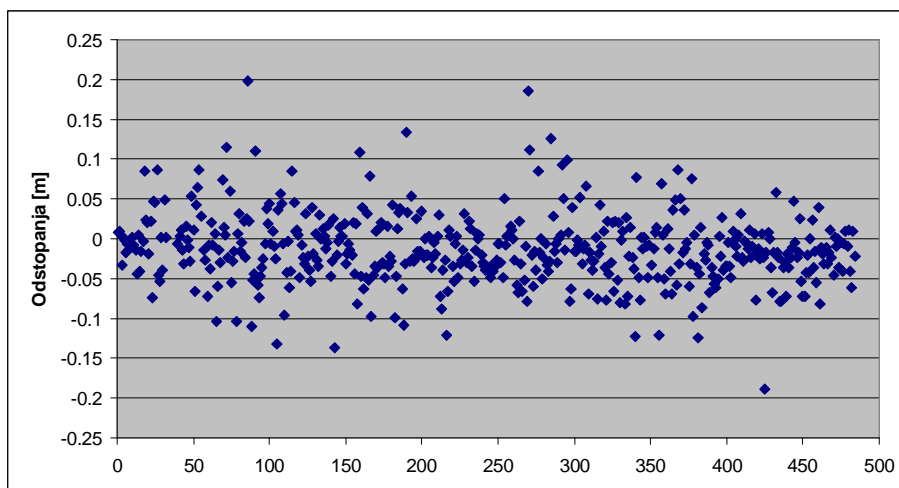
### Priloga B3: Rezultati za metodo naravnih sosedov

Modelna ploskev

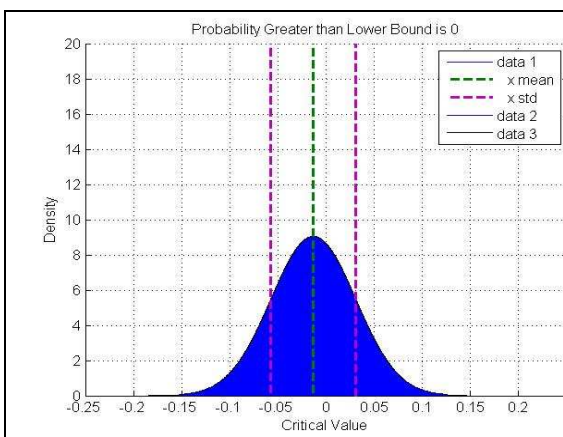
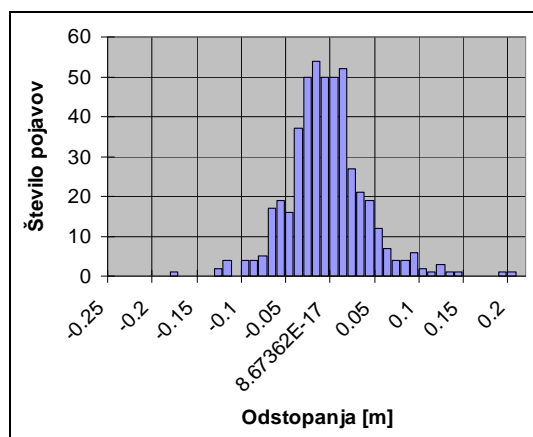


Število vrednosti	475
Vsota	-6.2893 m
Minimum	-0.1888 m
Maksimum	0.1978 m
Razdalja	0.3866 m
Srednja Vrednost	-0.0132 m
Mediana	-0.0163 m
Varianca	0.0019 m
Standardna deviacija	0.0441 m
RMSE	0.0460 m

Prikaz odstopanj

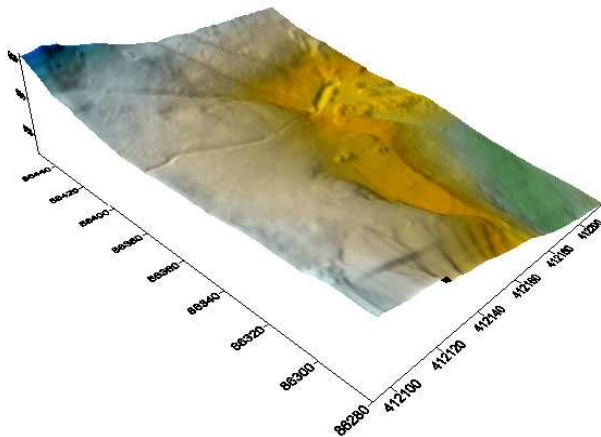


Histogram in graf normalne porazdelitve



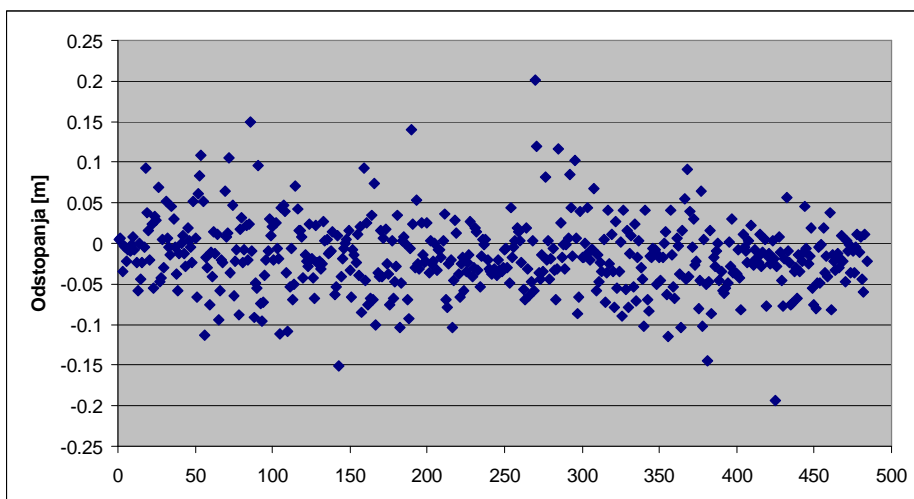
## Priloga B4: Rezultati za metodo inverzne razdalje na potenco

Modelna ploskev

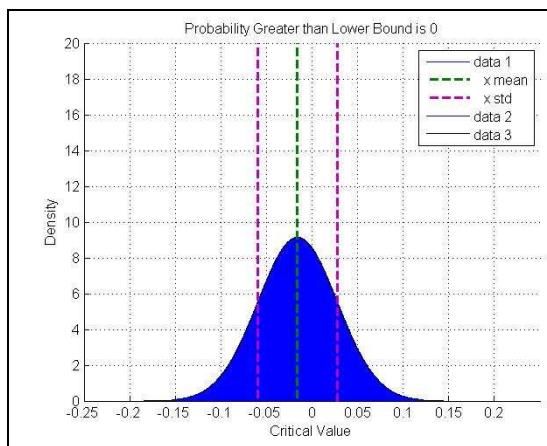
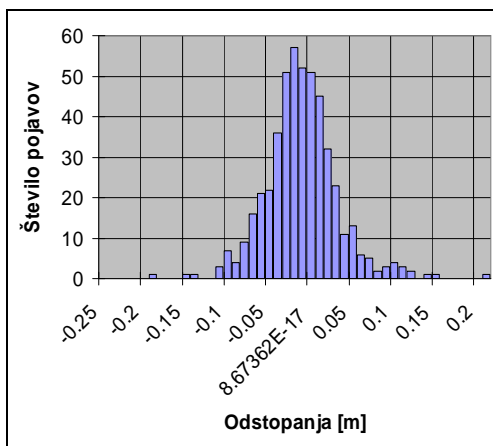


Število vrednosti	484
Vsota	-7.6805 m
Minimum	-0.1927 m
Maksimum	0.2020 m
Razdalja	0.3947 m
Srednja Vrednost	-0.0159 m
Mediana	-0.0173 m
Varianca	0.0019 m
Standardna deviacija	0.0436 m
RMSE	0.0464 m

Prikaz odstopanj



Histogram in graf normalne porazdelitve

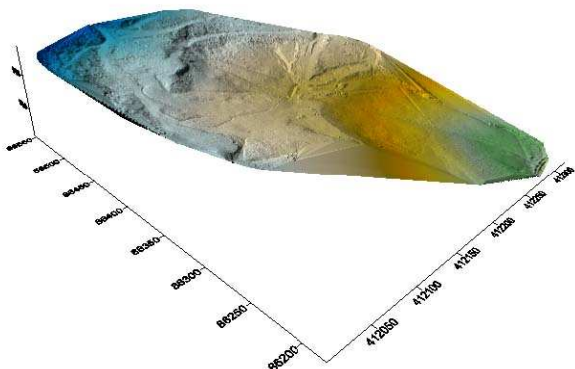




## Priloga C: Rezultati primerjave višin: pravilna mreža točk intervala 0.25 m – manjša gostota vhodnih podatkov

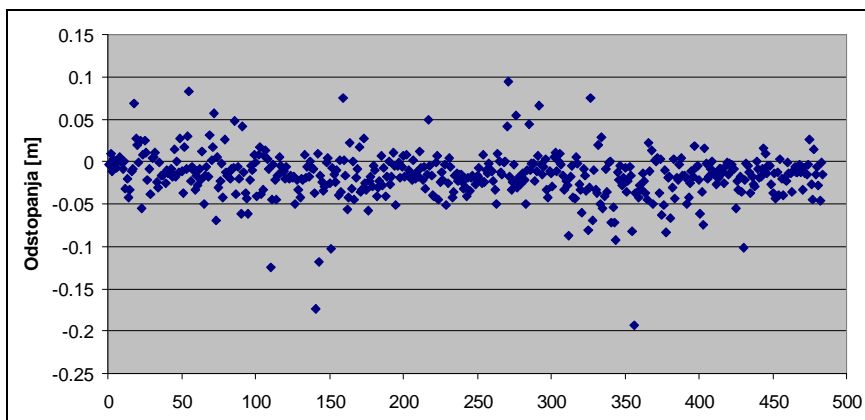
### Priloga C1: Rezultati za metodo triangulacija z linearno interpolacijo

Modelna ploskev

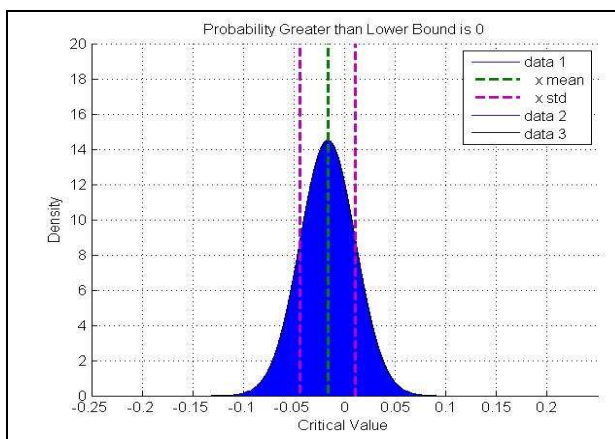
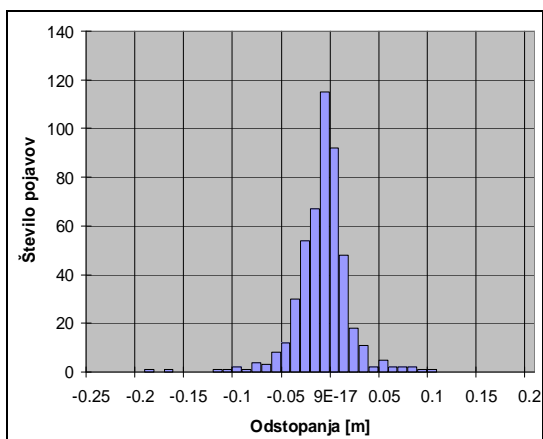


Število vrednosti	484
Vsota	-8.0421 m
Minimum	-0.1936 m
Maksimum	0.0944 m
Razdalja	0.2880 m
Srednja Vrednost	-0.0166 m
Mediana	-0.0157 m
Varianca	0.0008 m
Standardna deviacija	0.0275 m
RMSE	0.0321 m

Prikaz odstopanj

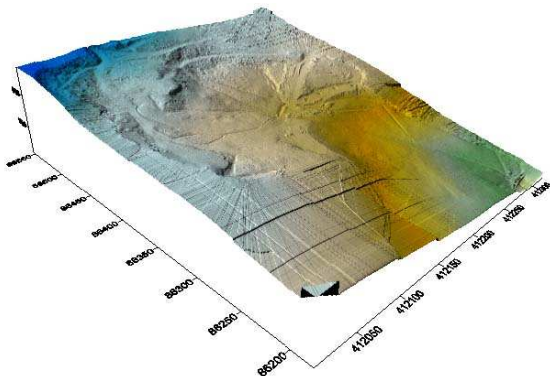


Histogram in graf normalne porazdelitve



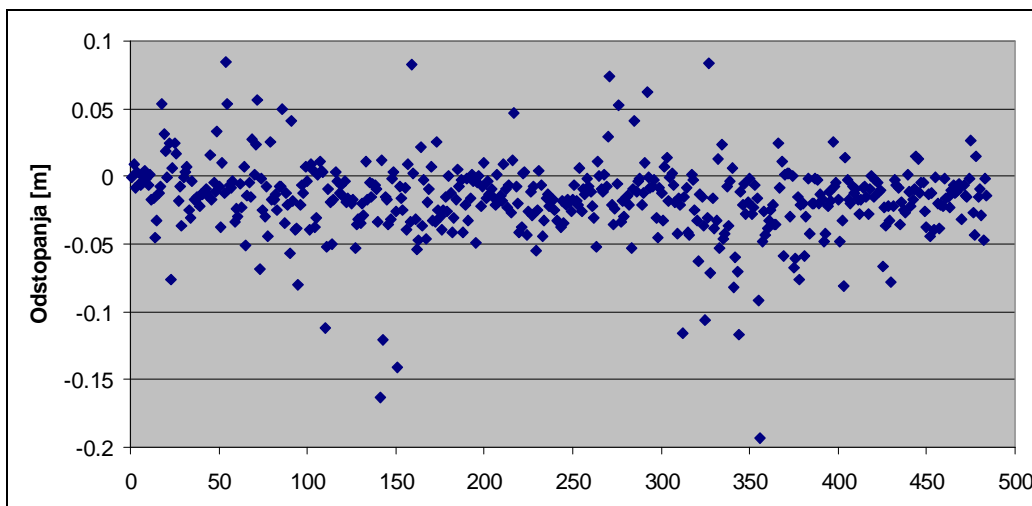
## Priloga C2: Rezultati za metodo kriging

### Modelna ploskev

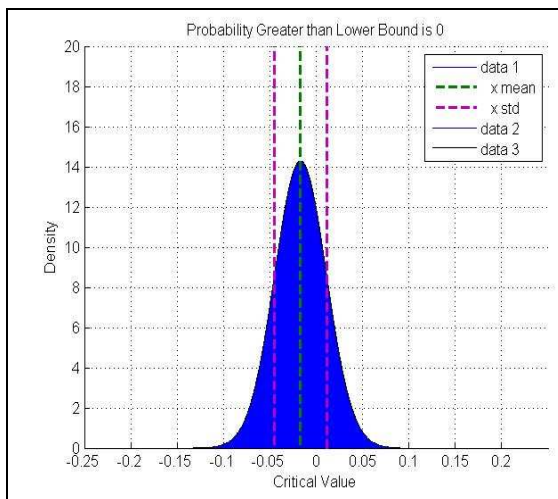
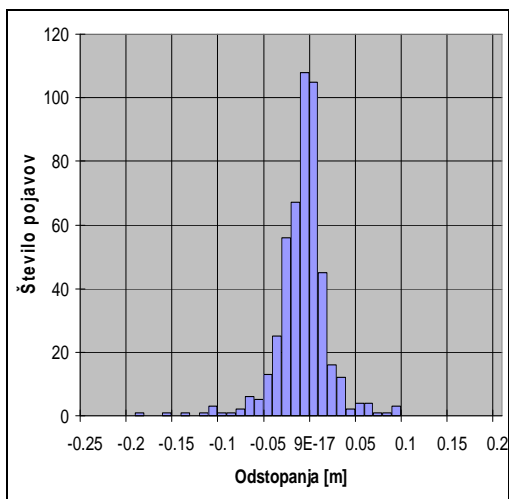


Število vrednosti	484
Vsota	-8.1719 m
Minimum	-0.1931 m
Maksimum	0.0846 m
Razdalja	0.2777 m
Srednja Vrednost	-0.0169 m
Mediana	-0.0152 m
Varianca	0.0008 m
Standardna deviacija	0.0279 m
RMSE	0.0326 m

### Prikaz odstopanj

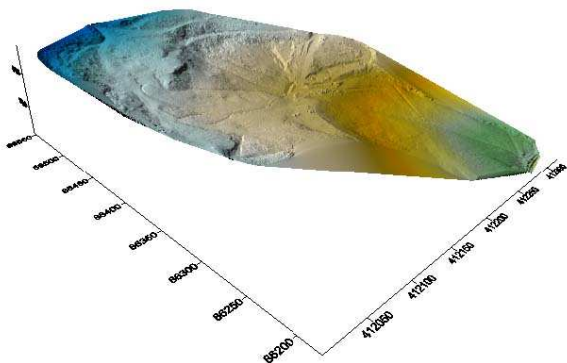


### Histogram in graf normalne porazdelitve



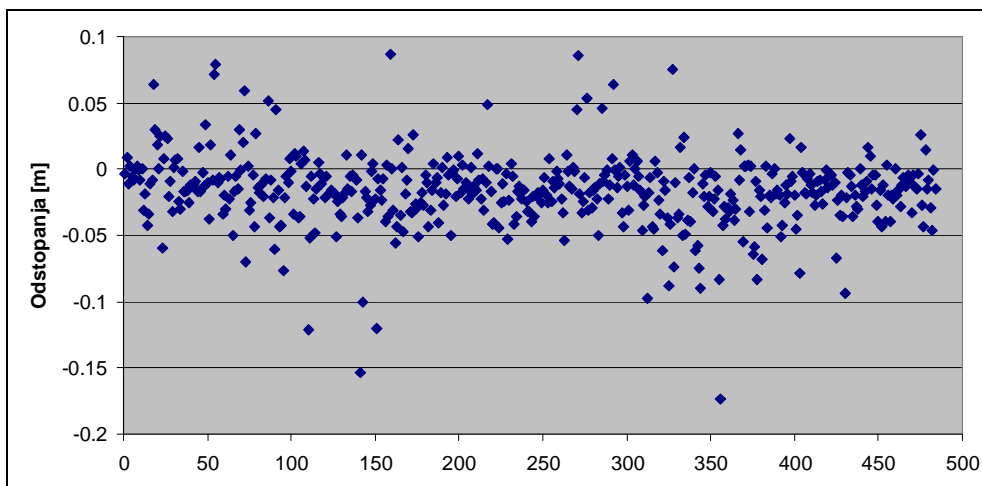
### Priloga C3: Rezultati za metodo naravnih sosedov

Modelna ploskev

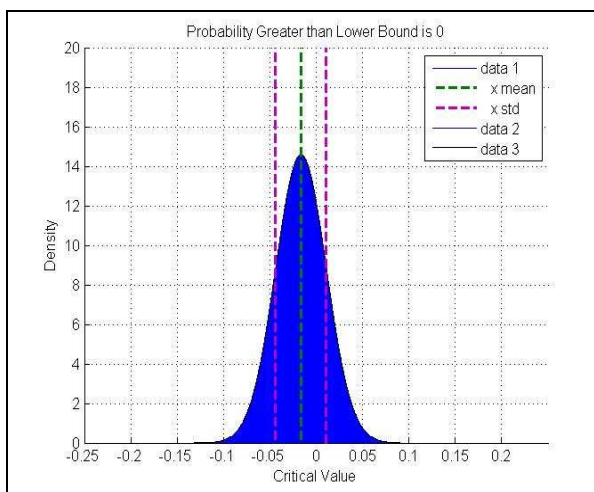
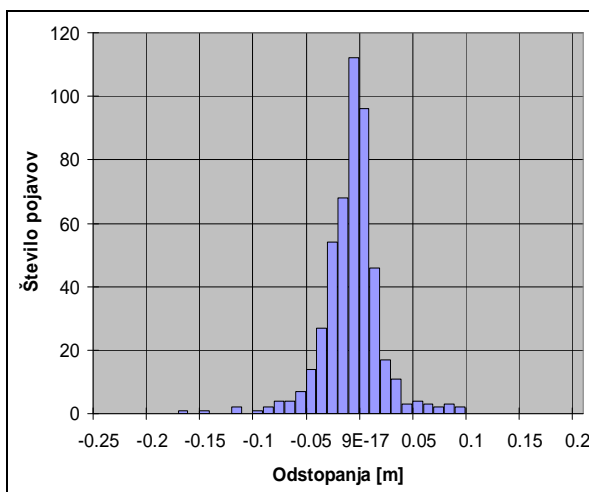


Število vrednosti	484
Vsota	-7.9369 m
Minimum	-0.1738 m
Maksimum	0.0866 m
Razdalja	0.2604 m
Srednja Vrednost	-0.0164 m
Mediana	-0.0155 m
Varianca	0.0007 m
Standardna deviacija	0.0274 m
RMSE	0.0319 m

Prikaz odstopanj

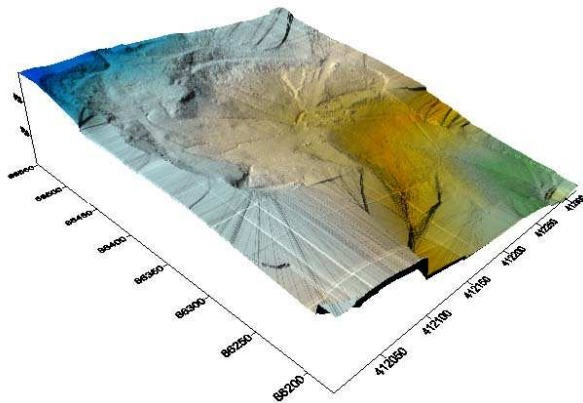


Histogram in graf normalne porazdelitve



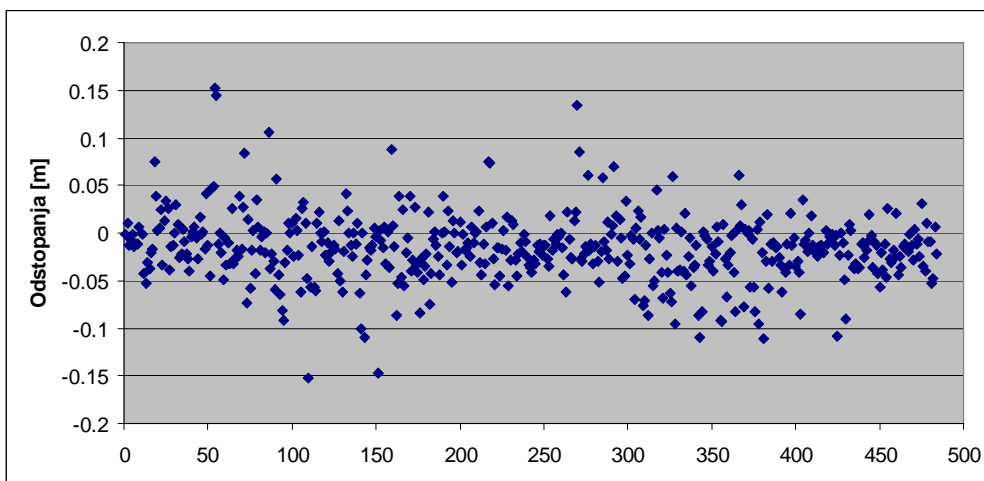
## Priloga C4: Rezultati za metodo inverzne razdalje na potenco

Modelna ploskev



Število vrednosti	484
Vsota	-7.6279 m
Minimum	-0.1525 m
Maksimum	0.1528 m
Razdalja	0.3053 m
Srednja Vrednost	-0.0158 m
Mediana	-0.0147 m
Varianca	0.0012 m
Standardna deviacija	0.0352 m
RMSE	0.0386 m

Prikaz odstopanj



Histogram in graf normalne porazdelitve

