

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



NATALIJA NOVAK

**PRIMERJAVA VIŠIN DOLOČENIH Z MOBILNIM
KARTIRNIM SISTEMOM IN IZ LIDARSKIH
PODATKOV**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA**

Ljubljana, 2018

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA**

Kandidat/-ka:

NATALIJA NOVAK

**PRIMERJAVA VIŠIN DOLOČENIH Z MOBILNIM
KARTIRNIM SISTEMOM IN IZ LIDARSKIH
PODATKOV**

**COMPARISON OF HEIGHTS DETERMIND WITH
MOBILE MAPPING SYSTEM WITH HEIGHTS
COMPUTED ON THE BASIS OF LIDAR DATA**

Mentor/-ica:

prof. dr. Bojan Stopar

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

asist. dr. Oskar Sterle

Somentor/-ica:

asist. dr. Tilen Urbančič

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.2(043.3)
Avtor:	Natalija Novak, dipl. inž. geod. (UN)
Mentor:	prof. dr. Bojan Stopar
Somentor:	asist. dr. Tilen Urbančič, asist. dr. Oskar Sterle
Naslov:	Primerjava višin določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	60 str., 10 pregl., 29 sl., 13 graf., 4 en., 2 pril.
Ključne besede:	mobilni kartirni sistem, inercialni merski sistem, kinematična GNSS/INS izmera, aerolasersko skeniranje, digitalni model reliefa

Izvilleček

V magistrskem delu smo analizirali skladnost višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom, z višinami, pridobljenimi iz lidarskih podatkov. Uporabili smo podatke GNSS/INS meritev mobilnega kartirnega sistema podjetja DFG CONSULTING, d.o.o. ter podatke aerolaserskega skeniranja (ALS) Slovenije. Višine, določene na osnovi podatkov aerolaserskega skeniranja, smo določili na osnovi digitalnega modela reliefa (DMR), za dva izbrana odseka pa na osnovi oblaka točk reliefa (OTR). Višine, določene z GNSS/INS meritvami, smo pridobili iz podatkov meritev mobilnega kartirnega sistema na več kot 1000 km državnih cest različnih karakteristik. Razlike višin smo razvrstili v razrede, jih analizirali in ovrednotili po več kriterijih.. Ugotovili smo, da absolutne razlike višin, pridobljene z meritvami mobilnega kartirnega sistema, v več kot 86 odstotkih primerov odstopajo od digitalnega modela reliefa (DMR) manj kot 0,25 m.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.2(043.3)
Author:	Natalija Novak, B.Sc.
Supervisor:	Prof. Bojan Stopar, Ph.D.
Cosupervisor:	Assist. Tilen Urbančič, Ph.D., Assist. Oskar Sterle, Ph.D.
Title:	Comparison of heights determined with mobile mapping system with heights computed on the basis of Lidar data
Document type:	M. Thesis
Scope and tools:	60 p., 10 tab., 29 fig., 13 graph., 4 eq., 2 ann.
Keywords:	mobile mapping system, inertial measurement unit, kinematic GNSS/INS positioning, airborne laser scanning, digital terrain model

Abstract

In this Master thesis we analyzed heights determined on the basis of mobile mapping system (MMS) with those computed on the basis of Lidar data. For this purpose, the GNSS/INS measurements data of DFG CONSULTING's mobile mapping system were compared with the height data, computed on the basis of the airborne laser scanning data (ALS) of Slovenia. For the purpose of this research, the heights derived from the digital terrain model of ALS data were used. For two specific road sections, heights derived from the ground points of point cloud were used. Heights determined on the basis of the GNSS/INS measurements were obtained with the mobile mapping system measurements of more than 1000 km of national roads of different characteristics. The calculated height differences were classified, analysed and evaluated through different criteria. The result found is that the absolute differences in height obtained on the basis of mobile mapping system's measurements deviate from the digital terrain model's for less than 0,25 m in more than 86 percent of available data.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in nasvete pri nastajanju magistrskega dela se zahvaljujem mentorju prof. dr. Bojanu Stoparju ter somentorjema asist. dr. Tilnu Urbančiču in asist. dr. Oskarju Sterletu.

Hvala podjetju DFG CONSULTING, d.o.o.. za sodelovanje pri izdelavi naloge, za možnost uporabe terenske/programske opreme in testnih podatkov. Za samo idejo ter za pomoč pri izvedbi praktičnega dela magistrskega dela se iskreno zahvaljujem Urošu Ranflu in Domnu Smoletu.

Za čudovito moralno podporo v času pisanja magistrskega dela se iskreno zahvaljujem moji družini.

Zelo sem hvaležna tudi prijateljem za spodbudo in pozitivno energijo, ki mi je nemalokrat dala ogromno motivacije za pisanje. Posebna zahvala gre tebi Jasmina.

Hvala tudi mojim »muham«.

In nenazadnje hvala tebi.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA.....	IV
1 UVOD.....	1
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA.....	4
2.1 Mobilni kartirni sistemi	4
2.1.1 Sistemi GNSS.....	6
2.1.2 Inercialni navigacijski sistemi (INS)	8
2.1.3 Kombinacija GNSS/INS meritev.....	9
2.2 Aerolasersko skeniranje.....	10
2.2.1 Opis tehnologije.....	10
2.2.2 Obdelava podatkov	11
2.2.3 Natančnost in ločljivost lidarskih podatkov	12
2.2.4 Projekt Lasersko skeniranje Slovenije.....	13
2.2.5 Izdelki aerolaserskega skeniranja Slovenije	14
3 METODOLOGIJA RAZISKAVE IN IZRAČUN RAZLIK VIŠIN.....	16
3.1 Metodologija raziskave.....	16
3.1.1 Opredelitev območja obravnave.....	16
3.1.2 Terenske meritve	17
3.1.3 Terenska oprema za določevanje položaja	17
3.1.4 Obdelava kinematičnih GNSS/INS meritev	20
3.1.5 Rezultat obdelave GNSS/INS meritev	25
3.2 Izračun razlik višin med višinami določenimi z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov	26
3.2.1 Vhodni podatki za izračun višinskih razlik	26
3.2.2 Programsko orodje FME Desktop	28
3.2.3 Opis postopka obdelav podatkov.....	29

4	REZULTATI	35
4.1	Vpliv različnih lidarskih podatkov na izračunane razlike višin	50
4.2	Komentar rezultatov	54
5	ZAKLJUČEK	56
VIRI		58

KAZALO SLIK

Slika 1: Mobilni kartirni sistem podjetja DFG CONSULTING, d.o.o.	5
Slika 2: Metoda aerolaserskega skeniranja (Oštir, 2006).	11
Slika 3: Gostota lidarskih točk (Pegan in sod., 2014).	13
Slika 4: 159 odsekov državnih cest, na območjih katerih smo izvajali meritve z mobilnim kartirnim sistem podjetja DFG CONSULTING, d.o.o.	16
Slika 5: GPS sprejemnik Novatel ProPak-V3.	18
Slika 6: GPS antena Novatel GPS-702-GG.	18
Slika 7: Inercialna merska enota iMAR-FSAS.	19
Slika 8: Odometer Leane Net WS – 01 v kovčku in nameščen na avtomobilu.	20
Slika 9: Postopek obdelave podatkov GNSS/INS v programskem orodju Inertial Explorer.	21
Slika 10: Izris približne trajektorije na podlagi kodnih opazovanj.	22
Slika 11: Izris trajektorije po obdelavi GNSS meritev s preciznimi efemeridami.	23
Slika 12: Izris trajektorije po skupni obdelavi GNSS in INS meritev v močno sklopljenem načinu s končnim glajenjem (forward and backward processing).	24
Slika 13: Kombinacija dveh trajektorij oz. t.i. vzvratno glajenje (Ranfl, 2009).	25
Slika 14: Shematični prikaz izračuna razlik višin v programskem okolju FME Desktop.	29
Slika 15: Digitalna os ceste za poljuben odsek.	30
Slika 16: Območje za izrez DMR1.	30
Slika 17: Izrezan DMR1.	31
Slika 18: Izrezana trajektorija.	31
Slika 19: Algoritem za izračun razlik višin v programu FME Desktop.	33
Slika 20: Razlike višin glede na smer odstopanja od DMR-ja.	35
Slika 21: Razlike višin obarvane glede na razred odstopanja v katerega padejo.	37
Slika 22: Digitalna os ceste za odsek 1078.	39
Slika 23: Primeri večjih odstopanj (rdeči krogci).	40
Slika 24: Prikaz DMR1 na območju podvoza.	40
Slika 25: Digitalna os ceste za odsek 1096.	41
Slika 26: Lokacija večjih odstopanj višin.	43
Slika 27: Razlike višin po izločitvi objektov GJI.	44
Slika 28: Razlike višin po razredih odstopanj za odsek 5703.	45
Slika 29: Razlike višin po izločitvi grobih pogreškov.	49

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Specifikacije GNSS-sprejemnika Novatel ProPak-V3.....	17
Preglednica 2: Specifikacije GNSS-antene GPS-702-GG.....	18
Preglednica 3: Specifikacije inercialne enote iMAR-FSAS.....	19
Preglednica 4: Specifikacije odometra Leane Net WS-01.	20
Preglednica 5: Vrednosti cenilk odstopanj.	38
Preglednica 6: Vrednosti cenilk odstopanj po izločitvi objektov GJI.	45
Preglednica 7: Vrednosti cenilk odstopanj.	50
Preglednica 8: Vrednosti cenilk odstopanj za odsek 1078 na podlagi dveh različnih vrst lidarskih podatkov.....	52
Preglednica 9: Vrednosti cenilk odstopanj za odsek 1123 na podlagi dveh različnih vrst lidarskih podatkov.....	53
Preglednica 10: Kontrola absolutne višinske točnosti nadmorskih višin.	55

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Histogram razlik višin za celotno območje obravnave.	36
Grafikon 2: Število točk znotraj posameznih razredov odstopanj.....	37
Grafikon 3: Razlike višin vzdolž digitalne osi ceste za odsek 1078.	39
Grafikon 4: Razlike višin vzdolž osi za odsek 1096.	42
Grafikon 5: Število točk trajektorije po posameznih razredih po izločitvi objektov GJI.	44
Grafikon 6: Število satelitov v času snemanja na odseku 5703.	46
Grafikon 7: Razlike v določitvi položaja točk trajektorije po poti naprej in nazaj.	47
Grafikon 8: Standardni odklon določitve položaja na podlagi močno sklopljene in glajene rešitve. ...	48
Grafikon 9: Število točk po posameznih razredih po izključitvi grobih pogreškov.	50
Grafikon 10: Razlike višin med višinami pridobljenimi z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov.	51
Grafikon 11: Število točk znotraj razredov odstopanj za različne vhodne lidarske podatke (Odsek 1078).	52
Grafikon 12: Razlike višin vzdolž osi za dva različna niza vhodnih lidarskih podatkov (OTR in DMR1).	53
Grafikon 13: Število točk znotraj razredov odstopanj za različne vhodne lidarske podatke.....	54

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ALS	Aerolasersko skeniranje (angl. airborne laser scanning)
DMR	Digitalni model reliefa (angl. digital terrain model)
FME	Feature Manipulation Engine
IMU	Inercialna merska enota (angl. inertial measurement unit)
INS	Inercialni navigacijski sistem (angl. inertial navigation system)
ISA	Sestav inercialnih senzorjev (angl. inertial sensor assembly)
GRS-80	Geodetski referenčni sistem 1980 (angl. geodetic reference system 1980)
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistemi (angl. global navigation satellite system)
LSS	Lasersko zračno skeniranje Slovenije
MEMS	Senzorji za določanje položaja premikajočega sprejemnika (angl. Micro-Electro-Mechanical System)
MMS	Mobilni kartirni sistem (angl. Mobile Mapping System)
OTR	Oblak točk reliefa (angl. point cloud ground)
POS	Sistem za pozicioniranje in orientacijo (angl. position and orientation system)
RMSE	Koren srednjega kvadratnega pogreška (angl. root mean square error)
SLOG2000	Model geoida Slovenije iz leta 2000
TIN	Mreža nepravilnih trikotnikov (angl. triangulated irregular network)
VRS	Virtualna referenčna postaja (angl. virtual reference station)

1 UVOD

Pomembna naloga geodezije je pridobivanje prostorskih podatkov. Tehnologija GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) ima že več let pomembno vlogo pri zajemu topografskih podatkov, vse večjo vlogo pa ima v zadnjih letih tudi aerolasersko skeniranje (angl. Airborne Laser Scanning - ALS). GNSS omogoča hitro in natančno določitev položaja mirujočih in premikajočih objektov, ALS pa omogoča masoven zajem prostorskih podatkov. Da z obema dosežemo natančnost, ustrezne kakovosti za potrebe geodezije obe zahtevata dokaj kompleksno obdelavo meritev. V magistrskem delu smo želeli ugotoviti skladnost višin, pridobljenih z mobilnim kartirnim sistemom, in višin iz lidarskih podatkov, pridobljenih z aerolaserskim skeniranjem. Raziskali smo, kako lahko podatke teh dveh različnih tehnologij souporabimo. V podjetju DFG CONSULTING, d.o.o. že od leta 2001 za pridobivanje podatkov o cestni infrastrukturi uporabljajo tehnologijo mobilnih kartirnih sistemov (angl. Mobile Mapping System - MMS), s katero pridobivajo metrične in semantične geolocirane podatke o prostoru.

Geolokacijo prostorskih podatkov zagotovimo z integriranim sistemom, ki združuje kinematično GNSS-izmero in inercialno navigacijo. GNSS-meritve so lahko obremenjene s številnimi zunanjimi vplivi, pri sprejemu signala GNSS v neprimernem okolju pogosto prihaja do prekinitve sprejema signalov s satelitov. V takih primerih položaja na osnovi meritev GNSS ne moremo določiti z ustrezno kakovostjo. V tem primeru pride v poštev komplementaren inercialni navigacijski sistem, ki je avtonomen. Kakovost določevanja položaja z inercialnim navigacijskim sistemom s časom pada, zato je uporaben le v primerih kratkih prekinitev sprejema signala GNSS. Pri povezovanju različnih senzorjev mobilnega kartirnega sistema se za določanje poti uporablja Kalmanov filter. Tak način določanja položaja imenujemo »dead reckoning« določevanje položaja. Dead reckoning lahko razumemo podobno kot slepi poligon v geodeziji. Gre za določitev položaja nove točke relativno glede na znano točko na podlagi dolžinskih in kotnih meritev (Ranfl, 2009). Z integracijo GNSS-meritev in meritev inercialnega sistema lahko v dobrih pogojih dosežemo tudi horizontalno in višinsko natančnost položaja, višjo od centimetra.

Osnovni princip tehnologije ALS je, da na podlagi izhodiščnega položaja in orientacije snemalnega sistema ter na podlagi meritev časa in smeri potovanja laserskih pulzov od oddajnega mesta do opazovanih objektov določimo trirazsežen položaj skeniranim točkam. ALS je s pridobljenimi podatki o višinah točk trenutno najhitrejša in posledično najbolj ekonomična tehnika za izdelavo digitalnih modelov reliefa, vedno bolj pa je uporabljena tudi na drugih področjih, kot so gozdarstvo, geologija, arheologija idr. Višinska točnost točk, izmerjenih z aerolaserskim skeniranjem, naj bi bila po podatkih proizvajalcev za višino leta 1000 m nekje do 0,15 m (Urbančič, 2017). Tako kot GNSS so tudi lidarske meritve obremenjene z zunanjimi vplivi. Na območjih brežin rek in potokov, bregov, neravnih terenov, območij vegetacije itd. je zaradi nehomogenih lastnosti tarče znotraj odtisa laserskega žarka položaj točk težko določiti z visoko točnostjo. Največjo težavo predstavlja nizka vegetacija (grmičevje, visoka

trava,...), saj tam laserski žarek ne prodre do tal, ampak se že prej odbije od vegetacije. S filtriranjem težko odstranimo vse take točke, ki jih obravnavamo kot talne točke. V takih primerih moramo upoštevati, da so višine točk določene manj kakovostno. Izvajalci aerolaserskega skeniranja težijo k temu, da se meritve izvajajo v zimskem času, ko je vegetacije manj (predvsem to velja za območja listnatih in mešanih gozdov).

Višine, neposredno pridobljene tako z mobilnim kartirnim sistemom kot tudi z ALS, so elipsoidne višine, saj jih določimo preko opazovanj GNSS. Pri ALS izhajamo iz višine referenčne točke na letalu, ki ima preko meritev GNSS-sistema določeno elipsoidno višino. Za praktično uporabo jih je potrebno preračunati v nadmorske višine. Za transformacijo elipsoidnih višin v nadmorske višine je bil za oba vira podatkov uporabljen absolutni model geoida Slovenije iz leta 2000. Pri tem velja, da na izračun razlik višin v sistemu nadmorskih višin kakovost uporabljenega modela geoida nima vpliva.

Cilj magistrskega dela je bil ugotoviti skladnost višin, pridobljenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov, z namenom kasnejše skupne uporabe obeh vrst podatkov. S podatki, ki jih pridobimo s tehnologijo mobilnih kartirnih sistemov lahko uporabniki (državne inštitucije, občine,...) zmanjšajo stroške poslovnih procesov in povečajo učinkovitost, saj lahko preglede cest in različne analize cestnega telesa in okolice (analiza stanja cest, analiza prometne signalizacije itd.) opravljajo kar v pisarni. Eden izmed ciljev podjetja DFG CONSULTING, d.o.o. je v prihodnosti razviti tehnologijo, s katero bi lahko pospešili in poenostavili zajem podatkov o cestnem in obcestnem prostoru iz videoposnetkov mobilnega kartirnega sistema. Trenutno se podatki o legi objektov pridobivajo z večslikovnimi fotogrametričnimi postopki, ki pa so precej zamudni. Proces bi lahko pospešili z enoslikovnim zajemom prostorskih podatkov, pri katerem pa potrebujemo za pridobitev podatkov o legi objektov ploskev reliefa znane geometrije. V primeru, da ploskev reliefa ni dostopna jo lahko določimo iz drugih virov. Najenostavnejši in najhitrejši način za pridobitev višine objektov bi bila določitev višine objektov iz podatkov ALS.

Poleg hitrejšega zajema je cilj podjetja prikaz najrazličnejših objektov na cestah in v obcestnem prostoru na posnetkih, tudi objektov iz obstoječih prostorskih baz podatkov (npr. katastrski podatki). Da pa lahko objekte prikazujemo na posnetkih, potrebujemo njihove koordinate v trirazsežnem prostoru. Pomanjkljivost nekaterih obstoječih prostorskih podatkov je, da nimajo določene višine (npr. katastrski podatki). V takšnem primeru je potrebno višino določiti kako drugače. Višino bi tako lahko pridobili z izmero na terenu, vendar je ta način zamuden. Druga možnost za hitrejšo določitev višine je določitev višine na osnovi lidarskih podatkov.

Preden se odločimo za uporabo podatkov lidar v kombinaciji s podatki pridobljenimi z mobilnim kartirnim sistemom je pomembno pridobiti odgovor na vprašanje, ali so višine na digitalnem modelu

reliefa iz podatkov ALS dovolj kakovostne, da bi podatke o višinah objektov lahko pridobili iz le-tega ter ali se višine, določene z mobilnim kartirnim sistemom, dovolj dobro ujemajo z lidarskimi podatki. V magistrskem delu smo zato izračunali razlike višin med višinami določenimi iz mobilnih kartirnih sistemov in iz lidarskih podatkov ter rezultate prikazali in analizirali.

V magistrskem delu bomo v poglavju teoretična izhodišča najprej opisali tehnologijo mobilnih kartirnih sistemov. Podrobneje bomo opisali senzorje, ki v mobilnih kartirnih sistemih služijo za določevanje položaja premičnega sprejemnika, ter načine združevanja meritev posameznih senzorjev. Opisali bomo tudi tehnologijo aerolaserskega skeniranja in predstavili projekt Lasersko skeniranje Slovenije ter njegove produkte. V poglavju metodologija bomo opredelili območje obravnave, uporabljeno terensko mersko opremo ter programsko opremo za naknadno obdelavo terenskih meritev. V nadaljevanju poglavja bomo opisali sam postopek izračuna razlik višin ter uporabljeno programsko orodje. V zadnjem delu magistrskega dela so podani rezultati izračuna višin razlik ter njihova interpretacija.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Mobilni kartirni sistemi

Tehnologija mobilnih kartirnih sistemov je prisotna že več kot dvajest let in je posledica razvoja v tehnologijah za kinematično določitev položaja (GNSS, INS), sodobnih komunikacijskih tehnologijah in tehnologijah GIS. Integracija naštetih tehnologij v enoten sistem omogoča pridobivanje prostorskih podatkov v realnem času, kartiranje objektov ter njihovo vizualizacijo (Ranfl, 2009).

V splošnem tvorijo mobilni kartirni sistem trije sklopi:

- senzorska platforma (navigacijski senzorji: GNSS, INS; kartirni senzorji: video kamera, laserski skener),
- mobilna platforma (vozilo),
- programska orodja za obdelavo podatkov.

Navigacijski senzorji zagotavljajo podatke o položaju vozila in senzorjev ter podatke o orientaciji senzorjev. Ti podatki so nujno potrebni za pridobivanje geolociranih podatkov objektov v prostoru. Kartirni senzorji omogočajo pridobivanje podatkov o prostoru v trenutku snemanja (posnetek trenutnega stanja) ter njihovo naknadno obdelavo v pisarni. S senzorji mobilnih kartirnih sistemov za pridobivanje podatkov lahko pridobimo tako metrične kot tudi semantične podatke objektov. Pridobljene podatke ustrezno obdelamo, geolociramo (umestimo v ustrezni koordinatni sistem) in shranimo v prostorsko-informacijske podatkovne baze.

Mobilni kartirni sistem združuje GNSS in INS-tehnologijo in fotogrametrične postopke. Geolokacijo video posnetkov izvedemo z uporabo GNSS in ostalih navigacijskih senzorjev. Fotogrametrija je brezkontaktna metoda merjenja na digitalnih podobah (slike, video posnetki). Fotogrametrični postopki omogočajo pridobitev metričnih in nemetričnih (opisnih) podatkov iz posnetkov. Posnetki morajo biti narejeni s kalibrirano snemalno napravo ter pravilno umeščeni v prostor.

Za izvedbo snemanja smo v naši nalogi uporabili mobilni kartirni sistem WideoCar 4 podjetja DFG CONSULTING, d.o.o. (slika 1), ki temelji na navigacijskem sistemu Novatel SPAN (Synchronized Position Attitude & Navigation) podjetja Novatel Inc.



Slika 1: Mobilni kartirni sistem podjetja DFG CONSULTING, d.o.o.

Sistem Novatel SPAN

Sistem Novatel SPAN (angl. Synchronized Position Attitude & Navigation) za zagotavljanje neprekinjeno natančno določenega podatka o položaju in usmerjenosti vozila uporablja tehnologijo GNSS v kombinaciji z INS. Kombinacija obeh tehnologij zagotavlja natančen položaj sistema tudi v zahtevnih okoliščinah brez GNSS signala (predori, kanjoni, gozdovi,...). Z odometrom zagotavljamo dodatne meritve razdalje v inercialnem sistemu (Ranfl, 2009). Naknadna obdelava meritev je bila izvedena v programskem paketu Inertial Explorer. Programski paket omogoča združevanje meritev GNSS-sistema, inercialnega merskega sistema in odometra (Ranfl, 2009).

V naslednjih podpoglavjih smo podrobneje opisali sistema GNSS in INS ter načine združevanja meritev obeh sistemov.

2.1.1 Sistemi GNSS

GNSS je kratica za globalne navigacijske satelitske sisteme. To so sistemi, ki omogočajo določitev položaja opazovalca na Zemlji na podlagi opazovanih razdalj od satelitov GNSS. Tehnologija GNSS omogoča globalen način določevanja položaja, bodisi na zemeljskem površju bodisi nad njim (npr. uporaba v letalstvu) (Kozmus, 2010). Sistemi GNSS so sestavljeni iz treh osnovnih segmentov: vesoljski, nadzorni ter uporabniški segment. Vesoljski segment so sateliti, ki krožijo okoli Zemlje po znanih tirnicah in oddajajo signale, ki jih lahko na Zemlji sprejemamo s sprejemnikom GNSS. Nadzorni segment sestavljajo nadzorne postaje na Zemlji, ki spremljajo delovanje satelitov, pridobivajo parametre satelitovih tirnic za izračun položajev satelitov v poljubnem trenutku idr. Uporabniki, ki na podlagi opazovanj določamo položaj na Zemlji pa predstavljamo uporabniški segment. Za določitev položaja sprejemnika GNSS v prostoru potrebujemo podatke o položajih satelitov. Določitev položaja satelita in stanje satelitovih ur temelji na efemeridah. Ločimo t.i. s satelita oddane efemeride, ki jih uporabljamo v nalogah, ki ne zahtevajo visoke natančnosti določitve položaja, ter precizne efemeride, ki jih uporabljamo pri zahtevnejših nalogah, kjer potrebujemo višjo natančnost določitve položaja. Poznamo več vrst preciznih efemerid, ki se med seboj razlikujejo po tem, kdaj so uporabniku na voljo in kakšna je njihova natančnost. Ločimo ultra hitre efemeride, ki so dostopne med izmero, hitre efemeride in končne efemeride, ki so najnatančnejše (Pavlovčič Prešeren in Stopar, 2004; Pavlovčič Prešeren in Stopar, 2005).

Trenutno je najbolj znan/uveljavljen sistem GNSS sistem GPS (angl. Global Positioning System), ki je bil v 80ih letih vzpostavljen s strani ministrstva ZDA (Kozmus, 2010). Poleg sistema GPS so vzpostavljeni še naslednji GNSS-sistemi: ruski GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), evropski Galileo in kitajski Compass/Beidou. Vsak izmed sistemov GNSS ima lastno konstelacijo satelitov, svoje načine kodiranja signalov ter svoje specifične frekvence valovanj (Kozmus, 2010).

2.1.1.1 Tipi opazovanj GNSS

Poznamo tri načine določitve položaja na osnovi opazovanj GNSS. Eden je določitev položaja na osnovi kodnih opazovanj, ki temeljijo na opazovanjih psevdorazdalj med satelitom in sprejemnikom. V splošnem so za potrebe geodezije kodna opazovanja preslabe natančnosti. V geodeziji so osnovna vrsta opazovanj fazna opazovanja, ki predstavljajo razliko med fazo sprejetega valovanja in fazo valovanja, ki ga ustvari sprejemnik. Zaradi višje ločljivosti faznih opazovanj je možno bolj natančno določiti položaj sprejemnika. Določitev položaja pri faznih opazovanjih je povezana s problemom določitve t.i. fazne nedoločenosti oz. neznanega števila celih valov. Premikanja satelita glede na sprejemnik pa je tudi t.i. Dopplerjev efekt, ki se kaže v spremembi frekvence sprejetega valovanja (Kozmus, 2009).

2.1.1.2 Absolutni in relativni način določitve položaja

Na podlagi opazovanj GNSS lahko določimo absolutni ali relativni položaj. Če za določitev položaja neke točke uporabimo samo en sprejemnik, govorimo o absolutnem načinu določitve položaja. Absolutna določitev položaja sprejemnika se lahko določi na osnovi kodnih in faznih opazovanj, se pa v praksi pri absolutnem določanju položaja največkrat uporablja fazni način (Kozmus in Stopar, 2003).

Z relativnim načinom lahko dosežemo višjo točnost določitve položaja, vendar potrebujemo za tak način določitve položaja dva sprejemnika, referenčni in mobilni sprejemnik. Pri tem je položaj referenčnega sprejemnika znan, položaj mobilnega sprejemnika določimo relativno glede na znan položaj referenčnega sprejemnika s tvorjenjem baznih vektorjev med točkami (Hofmann-Wellenhof in sod., 2008). V postopek določitve položaja lahko kot referenčni sprejemnik vključimo tudi eno izmed stalno delujočih postaj GNSS ali pa uporabimo virtualno referenčno postajo VRS (angl. Virtual Reference Station). V Sloveniji imamo 16 stalnih GNSS postaj (omrežje SIGNAL), ki so razporejene po celotnem območju države. Meritve stalnih referenčnih postaj lahko za relativno določitev položaja sprejemnika uporabimo v primeru, ko smo od točke referenčne postaje oddaljeni največ 20 km (SIGNAL, 2018). V primerih večje oddaljenosti kot referenčni sprejemnik uporabimo postajo VRS, ki je znotraj omrežja SIGNAL programsko določena (Pavlovčič Prešeren in sod., 2010).

2.1.1.3 Statični in kinematični način določitve položaja

V primeru, ko sprejemnik v času določevanja položaja miruje, govorimo o statičnem načinu določitve položaja. Pri statičnih GNSS-meritvah imamo praviloma na voljo veliko nadštevilnih opazovanj, saj s povečevanjem dolžine trajanja GNSS-meritev pridobimo mnogo več opazovanj, kot jih potrebujemo za enolično določitev vseh neznank. Statična metoda izmere zagotavlja najnatančnejše končne rezultate, saj lahko ob ustrezni izvedbi meritev z uporabo preciznih efemerid satelita in kakovostnih algoritmov določimo položaj tudi s natančnostjo, boljšo od milimetra (Stopar in sod., 2006).

O kinematični metodi določevanja položaja govorimo, kadar določamo položaj sprejemnika, ki se med izvajanjem GNSS-opazovanj premika. Kinematični način se uporablja predvsem v primeru sledenja premikajočih vozil, ali v primerih, kjer se predvideva premik obravnavanega objekta (Ranfl, 2009). Težavo pri kinematičnem določevanju položajev sprejemnika predstavlja morebitna izguba sprejema signala GNSS, kar onemogoči določitev položaja v izbranem trenutku.

Za potrebe našega magistrskega dela smo uporabili kinematično metodo izmere z naknadno obdelavo meritev, saj omogoča določitev položaja z nekaj-centimetrsko natančnostjo (Ranfl, 2009). Kjer je prišlo do izpada GNSS-signala ali pa je bil zaradi razmer sprejem signal moten, smo na osnovi opazovanj GNSS določene koordinate nadomestili z meritvami INS sistema.

2.1.2 Inercialni navigacijski sistemi (INS)

Inercialni navigacijski sistem (INS) je sestavljen iz inercialne merilne enote (IMU) ter navigacijskega računalnika za obdelavo meritev s senzorjev (Kozmus, 2009). Inercialna merska enota je sestavljena iz inercialnih senzorjev, s katerimi se merijo inercialni pospeški in kotni zasuki sistema. Za merjenje inercialnega pospeška uporabljamo merilnike pospeška. Poleg merilnikov pospeškov pa so del inercialne merske enote tudi žiroskopi, s katerimi stabiliziramo koordinatne osi in merilci kotnih zasukov okrog koordinatnih osi. Računalnik na podlagi meritev IMU izračuna relativni položaj, orientacijo in hitrost INS.

V splošnem delimo inercialne navigacijske sistema na:

- žiroskopsko stabilizirane,
- sistem s fiksiranimi senzorji.

V primeru žiroskopsko stabiliziranega sistema so senzorji zasukov izolirani od zasukov platforme. S tem se izognemo pogreškom kotnih meritev, ki so odvisni od zasukov platforme, kar nam omogoča določitev zasukov z višjimi natančnostmi. Slabost takšnih sistemov je, da so precej veliki, težki in cenovno težje dostopni. Za razliko od žiroskopsko stabiliziranega sistema, v primeru sistema s fiksnimi senzorji, inercialna enota neposredno zaznava zasuke platforme. Premiki in zasuki se v takšnem primeru izračunajo v na podlagi meritev iz senzorjev. Prednost takšnih sistemov je predvsem nižja cena (Ranfl, 2009).

Vrste inercialnih merskih enot

Poznamo več vrst IMU, ki so sestavljene iz različnih inercialnih senzorjev, predvsem pa se med seboj razlikujejo po natančnosti, ki jo lahko dosežejo. Najnatančnejši IMU so t.i. navigacijski inercialni sistemi (angl. navigation grade). Prednost takšnih IMU je, da za delovanje ne potrebujejo dodatnih senzorjev. Položaj se lahko določa izključno s senzorji v teh sistemih (Kozmus, 2009). Senzorji, ki sestavljajo omenjene merilne enote, so mehanski ter laserski žiroskopi. Največja slabost navigacijskih inercialnih sistemov je njihova visoka cena. Naslednja skupina so t.i. taktični inercialni sistemi (angl. tactical grade). V večini primerov jih sestavljajo optični žiroskopi in servo pospeškometri. Natančnost določitve koordinat teh sistemov je v primerjavi z navigacijskimi inercialnimi sistemi slabša, vendar pa je dosežena natančnost še vedno podmetrska. V zadnjo skupino (t.i. osnovni sistemi) spadajo enote MEMS (angl. Micro Electro Mechanical System). Elektronske in mikromehanične komponente so na teh enotah združene na enotnem čipu. Takšni sistemi so v primerjavi z ostalima sistemoma cenovno precej bolj dostopni, vendar pa so zaradi nezmožnosti zagotavljanja položaja v primeru daljših vrzeli brez GNSS-signala precej neuporabni (Kozmus, 2009).

Inercialni merski sistem podjetja DFG CONSULTING, d.o.o. »iMAR FSAS« uvrščamo med taktične IMU.

Odometer

Poleg merilnikov pospeškov ter žiroskopov, ki so gradniki inercialne merske enote, pa lahko za izboljšanje natančnosti določitve položaja vozila v inercialnem navigacijskem sistemu uporabimo še meritve odometra. Odometer je naprava, ki šteje obrate kolesa in tako meri razdalje, ki jo prevozi neko vozilo. V primeru mobilnega kartirnega sistema je odometer poleg IMU dodatna podpora GNSS-sistemu. Tako kot IMU, tudi odometer pripomore k določitvi položaja vozila, v času ko položaja ne moremo določiti le iz meritev GNSS-sistema (Ranfl, 2009).

2.1.3 Kombinacija GNSS/INS meritev

Kinematična metoda GNSS-izmere ne omogoča neprekinjenega določevanja položaja, saj se med vožnjo pogosto prekine sprejem GNSS-signala. V trenutkih izgube signala moramo položaj določiti drugače, z uporabo inercialnega sistema. Takšen sistem je avtonomen, kar pomeni, da zunanji dejavniki nanj ne vplivajo. Vrzeli, ki nastanejo ob izgubi GNSS-signala, pa lahko inercialni sistem nadomesti le za kratek čas. Ob dolgih izgubah signala se prične kakovost določitve položaja s časom slabšati. Oba omenjena sistema se med seboj dopolnjujeta – sta komplementarna. Meritve GNSS tako zmanjšajo pogoške inercialnega sistema, ki bi bili v primeru samostojnega delovanja neobvladljivi. Meritve INS pa omogočajo določitev položaja v trenutkih ne sprejemanja GNSS-signala (Ranfl, 2009). Najpomembnejši načini združevanja GNSS in INS meritev so: nesklopljen način združevanja, šibko sklopljen način združevanja in močno sklopljen način združevanja.

Vse naše GNSS/INS meritve so bile združene v močno sklopljenem načinu združevanja. Glavna lastnost močno sklopljenega načina združevanja GNSS in INS meritev je skupna obdelava vsakega od sistemov GNSS in INS. Za združevanje meritev se uporabi Kalmanov filter. Kalmanov filter ter vse tri načine združevanja GNSS/INS meritev je v svojem magistrskem delu podrobneje opisal Ranfl (2009) in za najboljši način združevanja GNSS/INS meritev predlagal močno sklopljeno rešitev s končnim glajenjem.

2.2 Aerolasersko skeniranje

Aerolasersko skeniranje je metoda daljinskega zaznavanja, pri kateri se neposredno izmeri razdalja med oddajnim mestom laserskega žarka in detajlom na Zemljinem površju. Nosilec laserskega skenerja je v primeru ALS premikajoči se nosilec v zraku (npr. letalo) (Triglav Čekada, 2016). Laser je naprava za proizvodnjo laserske svetlobe (angl. **light amplification by simulated emission of radiation**). Laserska svetloba je ozko usmerjena in ima dobro določeno valovno dolžino. Laserski skenerji uporabljajo valovne dolžine v območjih vidne in bližnje infrardeče svetlobe (Urbančič in Grigillo, 2015). Gre torej za aktivni senzorski sistem merjenja, kjer se za snemanje uporablja lasten vir elektromagnetnega valovanja. Obstajata dva načina, ki se uporabljata za merjenje razdalj: fazni in impulzni način. Impulzni način uporabljajo vsi komercialni lidarski sistemi. Poleg meritev oddaljenosti med oddajnim mestom ter površjem se meri tudi smer laserskega žarka (Urbančič, 2017).

Lasersko skeniranje delimo na: satelitsko lasersko skeniranje, aerolasersko skeniranje, terestrično lasersko skeniranje, mobilno lasersko skeniranje ter lasersko skeniranje iz kratkih razdalj. Naštete tehnologije laserskega skeniranja se med seboj razlikujejo v vrsti platforme ter v opremljenosti (Kosmatin Fras, 2009).

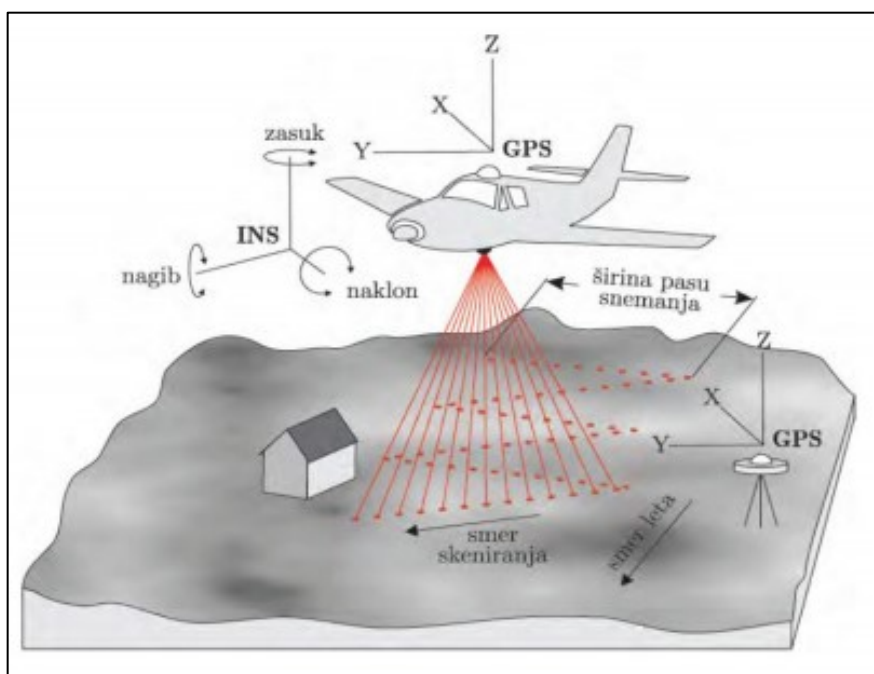
V začetku so bili oblaki točk ALS uporabljeni samo za izdelavo DMR, danes pa lidarski sistemi omogočajo veliko gostoto točk in so zato uporabni na številnih področjih, kot so: zaznavanje in modeliranje prostra, od objektov in stavb, 3D modeliranje infrastrukturnih objektov od cestnih omrežij daljnovodnih in cevovodnih vodnikov, do modeliranja posameznih dreves in zaznavanja sprememb v gozdovih itd. (Urbančič, 2017).

Lidarski snemalni sistem je sestavljen iz zračnega in terenskega segmenta. Zračni segment poleg nosilca ALS in laserskega skenerja sestavlja še sistem za dinamično pozicioniranje in orientacijo sistema (angl. Position and Orientation System - POS). Sodobni sistemi velikokrat vključujejo tudi digitalno kamero, ki hkrati z lidarskim skeniranjem omogoča tudi fotografiranje terena. Terenski segment je sestavljen iz referenčne postaje za globalno pozicioniranje in strojne ter programske opreme za naknadno obdelavo podatkov (Kosmatin Fras, 2009).

2.2.1 Opis tehnologije

Med skeniranjem nosilec lidarskega sistema leti po vnaprej določeni liniji, pri čemer skenira površje le v določeni širini – pasovih. Pri načrtovanju snemanja je zato pomembno, da zarišemo linijo leta tako, da zagotovimo preklap snemalnih pasov. Laser med snemanjem proti površju z veliko hitrostjo pošilja kratke laserske pulze in beleži njihov odboj ter pri tem meri čas potovanja vsakega pulza od njegove oddaje do zaznave vrnjenega dela odbitega žarka (slika 2).. Oddan laserski pulz se na površju objektov običajno difuzno razprši, zaradi česar se nazaj do senzorja vrne le manjši del odbitega žarka. Na zelo

gladkih površinah občasno prihaja tudi do zrcalnega odboja, pri čemer se žarek ne vrne nazaj proti senzorju in zato takrat meritev ne moremo izvesti. Iz časa potovanja pulza se izračuna razdalja od senzorja na nosilcu do opazovanega površja. Sistem POS v določenih časovnih intervalih, neodvisno od lidarja, shranjuje položaje in zasuke plovila. Istočasno z meritvami s skenerjem se na letalu izvajajo tudi opazovanja GNSS, hkrati pa se shranjujejo tudi podatki meritev GNSS na referenčni GNSS postaji. Te podatke potrebujemo pri naknadni določitvi položaja laserskega skenerja z diferencialno GPS metodo. Vsi zajeti podatki, tudi lidarski, se registrirajo v GPS časovnem sistemu, kar omogoča časovno sinhronizacijo med senzorskimi sistemi. Točnost sinhronizacije se giblje okoli ene mikrosekunde. Pomembno je, da so uporabljeni senzorski sistemi kalibrirani ter da dovolj natančno poznamo njihov medsebojni položaj in orientacijo na plovilu (Kosmatin Fras, 2009).



Slika 2: Metoda aerolaserskega skeniranja (Oštir, 2006).

2.2.2 Obdelava podatkov

Glavni namen aerolaserskega skeniranja je določiti trirazsežne koordinate skeniranih točk v oblaku. Točke v oblaku, ki imajo koordinate določene v lokalnem koordinatnem sistemu, umestimo v prostor s postopkom georeferenciranja. Položaj in orientacijo skenerja določimo z integracijo GNSS in IMU sistema. V tem primeru govorimo o postopku direktnega georeferenciranja oblaka točk (Hebel in Stilla, 2012). Višjo kakovost določitve položaja skenerja lahko dosežemo z naknadno obdelavo opazovanj, pri čemer se navežemo na referenčno postajo GNSS.

Po opravljenem georeferenciranju oblaka točk sledi izravnava podatkov na območjih prekrivanja pasov. Na teh mestih zaradi različnih razlogov prihaja do manjših ali večjih višinskih odstopanj. Z uskladitvijo

različnih snemalnih pasov dobimo enoten model (oblak) točk. Za različne namene končne uporabe je potrebno urejen in georeferenciran oblak lidarskih točk še nadalje obdelati. Koraki nadaljnje obdelave so filtriranje, klasifikacija in modeliranje podatkov. Filtriranje podatkov je postopek, s katerim se v splošnem ločuje želene podatke od neželenih. Čiščenje se lahko izvaja vizualno (ročno) ali z uporabo ustreznih programskih orodij. Običajno se lidarske točke v prvem koraku filtrira na točke, ki najbolj verjetno pripadajo terenu, in ostale točke. Slednje se lahko dalje ločuje na pokrov vegetacije, točke na stavbah ipd. Te postopke razvrščanja podatkov v vsebinske razrede imenujemo klasifikacija oblakov točk. Aerolaserska tehnologija ima zaradi svoje sposobnosti delnega prodiranja pulzov skozi vegetacijo in velike gostote meritev izredno velik potencial za pridobivanje natančnih digitalnih modelov (reliefa, vegetacijskega pokrova, mest, pokrajin itd.). Filtrirani in klasificirani podatki so najprej v diskretni obliki kot naključno raztresene točke, ki jih z metodami interpolacije lahko pretvorimo tudi v rastrsko obliko (npr. pravilna kvadratna mreža). Za končne aplikacije pa diskretni modeli niso dovolj uporabni, zato se iz točk z različnimi metodami modeliranja ploskev izdelajo ploskovni modeli, ki v podatke vnesejo dodatne topološke odnose (definicija ploskev in robov) in tako omogočajo izvedbo različnih analiz podatkov, vizualizacij, simulacij idr. (Kosmatin Fras, 2009).

2.2.3 Natančnost in ločljivost lidarskih podatkov

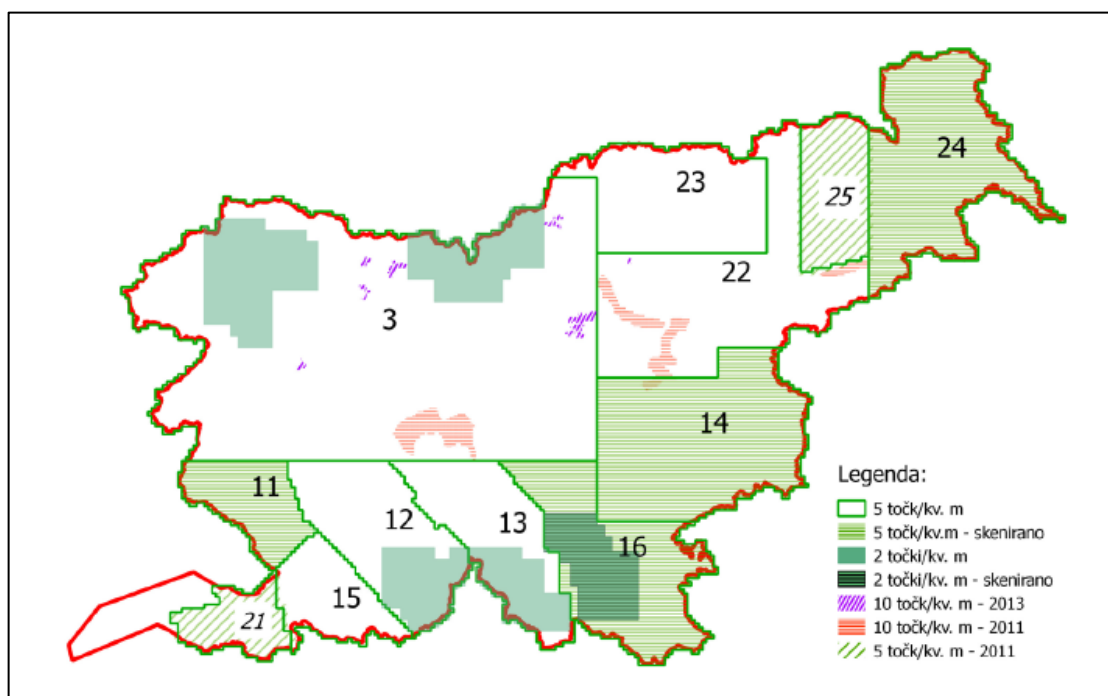
Preden se odločimo o vrsti lidarskih podatkov, ki jih bomo potrebovali v konkretnem primeru, se moramo pozanimati o njihovi potrebni ločljivosti in natančnosti. Deklarirane natančnosti posamezne točke oblaka ALS s strani proizvajalcev skenerjev so danes reda velikosti nekaj centimetrov. Na natančnost neposredno georeferenciranih podatkov vplivata predvsem natančnost sistema POS ter natančnost kalibracije sistemov (Urbančič, 2017). Poleg tega na natančnost vplivajo še naslednji dejavniki: pokrovnost površja, divergenca laserskega žarka, kot skeniranja, gostota točk, transformacije med koordinatnimi sistemi, metode interpolacije, razgibanost terena in obdobje izvedbe meritev (ali se snema v času olistnate ali neolistnate vegetacije). Za dosego čim višje natančnosti je pomembna tudi enakomerna hitrost in višina leta, dober načrt leta, idr.

Poleg natančnosti položaja lidarskih točk moramo poznati tudi njihovo ločljivost. Ločljivost oblaka točk nam pove, kakšna je gostota oblaka točk na enoto površine. Od gostote lidarskih točk pa je odvisno, kako podrobno in kako natančno bo oblika nekega objekta izvednotena (Triglav Čekada, 2010). Znotraj poljubnega delovišča zaradi različnih dejavnikov (različni red odbojev laserskega žarka, slaba odbojnost, itd.) govorimo o povprečni gostoti lidarskih točk. Glede na namen uporabe lidarskih točk se odločimo, kakšna bo ustrezna oz. še zadovoljiva gostota točk. Npr. za izdelavo zelo podrobnih DMR-jev bi potrebovali vsaj 10 točk na enoto površine. Če pa želimo izdelati manj podroben DMR, primerljiv z DMR-jem izdelanim iz posnetkov cikličnega aerofotografiranja Slovenije (CAS), pa je dovolj, če uporabimo gostoto 5 točk ali manj na enoto površine (Triglav Čekada, 2009).

Za potrebe magistrskega dela smo uporabili izdelke projekta Lasersko skeniranje Slovenije (LSS), zato je v nadaljevanju poglavja projekt na kratko opisan. Predstavljen je potek izvedbe projekta, uporabljena terenska oprema, opisani so postopki obdelav podatkov ter končni produkti projekta ter dosežena geometrična kakovost LSS.

2.2.4 Projekt Lasersko skeniranje Slovenije

Lasersko skeniranje Slovenije (LSS) je bilo izvedeno večinoma v letih 2014 in 2015, dva bloka pa sta bila posneta že leta 2011. Za snemanje je bil uporabljen laserski skener RIEGL LMS-Q78. Deklarirana natančnost določitve položaja lidarskih točk z omenjenim skenerjem je po podatkih proizvajalca 20 mm (Urbančič, 2017). Območje Slovenije je bilo razdeljeno na 19 snemalnih blokov, pri čemer je bil večji del Slovenije skeniran z gostoto 5 točk ali več na enoto površine (slika 3). Območja večjih gozdov so bila skenirana z gostoto 2 točki na enoto površine, na območjih zemeljskih plazov in večje poplavne ogroženosti pa je bila gostota točk 10 točk na enoto površine. V vseh primerih govorimo o gostoti prvih odbojev, enota površine pa je kvadratni meter. Poleg celotnega območja Slovenije je bil skeniran še pas zunaj državne meje, širine 250 m, vendar se na tem mestu podatki niso popravljali oz. brisali. Na dosego čim boljših rezultatov so vplivali tudi tako, da so snemanje izvajali v času neolistnate vegetacije, v primeru viskogorij pa v obdobju najmanjše količine snega. Načrtovana gostota točk je bila na območjih z gostoto 5 točk ali več/m² površine dosežena v 94,4 % primerov. Na območjih zelo strmih gora s skalnimi previsi je ponekod zmanjšano število točk (Triglav Čekada in Bric, 2014).



Slika 3: Gostota lidarskih točk (Pegan in sod., 2014).

Oblaki točk večinoma nimajo enakomernih gostot, zato je bilo potrebno gostoto točk na celotnem območju obdelave preveriti z izrisom karte gostote določenega klasifikacijskega razreda, ki je bil uporabljen za izdelavo digitalnega modela reliefa – imenujmo jo karta filtriranega oblaka točk (Kerin, 2014).

Karte gostote točk, ki prikazujejo tla, so bile izdelane za vse bloke laserskega skeniranja Slovenije. Predstavljene so bile v tehničnih poročilih posameznih blokov skeniranja. Uporabniki imajo s tem možnost vpogleda v realno število laserskih točk, ki se jih je uporabilo za izdelavo DMR z velikostjo celice $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (DMR1) na območju posameznega bloka skeniranja (Triglav Čekada, 2017).

V gostih gozdovih je bila gostota točk reliefa povprečno $0,5\text{ točk/m}^2$, na območjih travnikov pa 2 točki/m^2 (Triglav Čekada in Bric 2015). To pomeni, da moramo pri uporabi laserskega DMR1 v gozdu vedeti, da je le-ta ponekod preveč zgleden zaradi uporabe premajhnega števila točk v postopku interpolacije. To pa se kaže tako, da na podobi analitičnega senčenja DMR1 relief pod rastjem in na odprtem terenu nista enako gladka (Triglav Čekada, 2017).

2.2.5 Izdelki aerolaserskega skeniranja Slovenije

Končni izdelki projekta LSS so (Pegan in sod., 2014):

- georeferenciran oblak točk (GOT) z elipsoidnimi višinami,
- georeferenciran in klasificiran oblak točk (GKOT) z nadmorskimi višinami,
- oblak točk reliefa (OTR),
- digitalni model reliefa z mrežno celico velikosti 1 m (DMR1),
- podobe analitičnega senčenja (PAS) za območja velikosti $5\text{ km} \times 5\text{ km}$.

Izdelki so locirani tako v starem (D48/GK) kot tudi v novem državnem koordinatnem sistemu (TM/D96). Transformacija med sistemoma je bila v 2D smislu izvedena s trikotniško transformacijo (Geodetski inštitut Slovenije, 2015). Za prehod iz elipsoidnih v nadmorske višine pa je bil uporabljen absolutni geoid Slovenije iz leta 2000. V tehničnih poročilih projekta navajajo, da je za večinski del ozemlja Slovenije dosežena natančnost transformacije manjša od desetih centimetrov. Izjema so območja ob državni meji, kjer je bila izvedena ekstrapolacija, ter območja z nizkimi gostotami skeniranih točk (Berk in sod., 2011). V magistrskem delu smo uporabili samo podatke DMR1 in OTR, pri čemer DMR1 predstavlja mreža pravilno razporejenih točk ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$), interpoliranih iz OTR. OTR pa predstavlja georeferenciran oblak točk, katerega vsebovane točke predstavljajo samo točke reliefa. V tehničnih poročilih projekta LSS je z mero točnosti RMSE opredeljena tudi položajna kakovost LSS. V ravninskem smislu je točnost koordinat v koordinatnem sistemu D96/TM 30 cm. V višinskem smislu pa je točnost elipsoidnih višin (elipsoid GRS80) 15 cm.

Lidarski podatki trenutno predstavljajo najpodrobnejši prikaz reliefa pod vegetacijo v Sloveniji. Kljub omejenim kakovostim iz tehničnih poročil se moramo zavedati, da so te vrednosti izračunane na podlagi vzorčnega števila točk in da te vrednosti ne veljajo za celotno območje bloka. Točne vrednosti za posamezno območje obravnave lahko dobimo le z lokalno oceno kakovosti DMR-ja. Zadnji del Slovenije je bil kot omenjeno posnet v letu 2015, zato bodo podatki zaradi geomorfoloških in antropogenih dejavnikov v prostoru počasi zastareli. Ažurnost in kakovost podatkov ALS bi lahko zagotovili s cikličnim aerolaserskim snemanjem Slovenije.

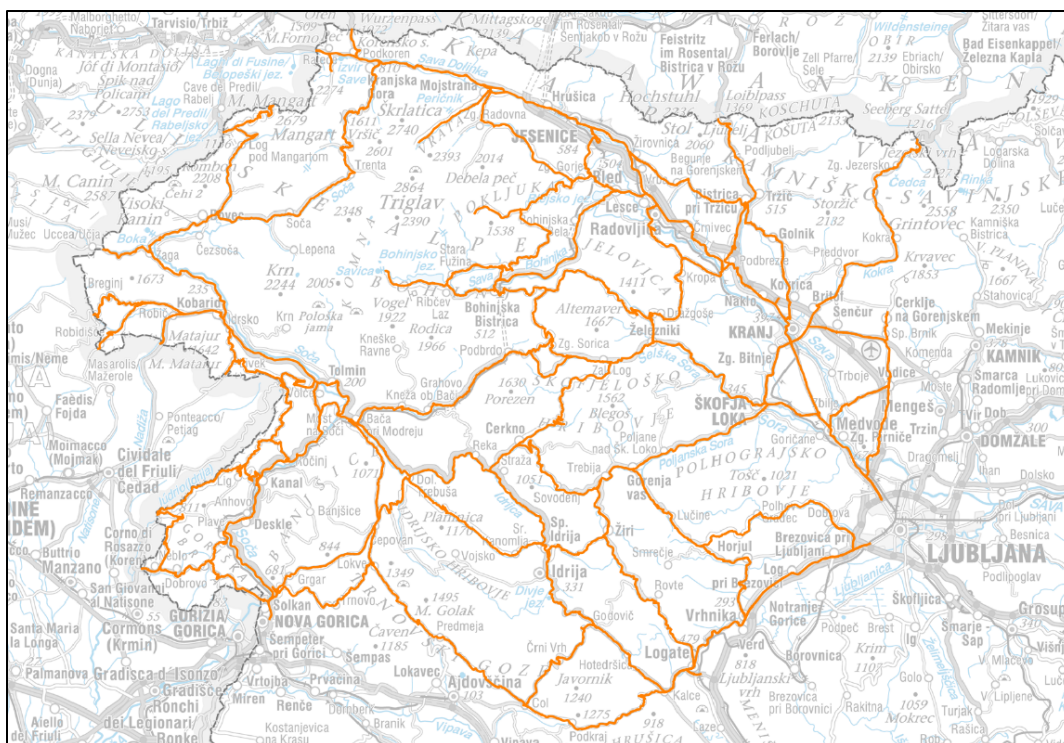
3 METODOLOGIJA RAZISKAVE IN IZRAČUN RAZLIK VIŠIN

3.1 Metodologija raziskave

Namen in cilj magistrske naloge je bil ugotoviti skladnost višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov. Mobilni kartirni sistem za določevanje položaja premikajočega sprejemnika uporablja kombinacijo GNSS in INS-sistema. Zanimalo nas je, koliko se višine tako določenih točk premikajočega sprejemnika (roverja) ujemajo z višinami na DMR-ju, izdelanim iz podatkov aerolaserskega skeniranja. V nadaljevanju dotičnega poglavja je podrobno opredeljeno območje obravnave, opisana je sama izvedba terenskih meritev ter uporabljena terenska oprema. Poglavje zajema tudi opis postopka obdelave samih kinematičnih GNSS/INS meritev in uporabljeno programsko opremo. V zadnjem delu poglavja so definirani in podrobneje opisani vsi vhodni podatki, potrebni za izračun razlik višin.

3.1.1 Opredelitev območja obravnave

Na sliki 4 je z oranžno barvo prikazano omrežje državnih cest, vključenih v našo analizo. Obsega 159 odsekov državnih cest v skupni dolžini 1204,97 km. Meritve so bile izvedene v okviru projekta *Video posnetek G + R državnih cest*, iz leta 2016. Naročnik projekta je bila Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo, izvajalec projekta pa je bilo podjetje DFG CONSULTING, d.o.o..



Slika 4: 159 odsekov državnih cest, na območjih katerih smo izvajali meritve z mobilnim kartirnim sistem podjetja DFG CONSULTING, d.o.o.

3.1.2 Terenske meritve

Za vsak snemalni dan smo izvedli načrt snemanja na podlagi obstoječe digitalne osi, ki jo je posredoval naročnik (Direkcija RS za infrastrukturo). Vse splanirane odseke, razen enosmernih, smo posneli v obe smeri.

GNSS-meritve smo izvajali s kinematično GNSS/INS metodo izmere z naknadno obdelavo podatkov. Za zagotovitev zadostne količine podatkov za geolociranje video posnetkov smo določili interval zajema podatkov 1 sekunda. Minimalni višinski kot satelita, s katerega se je pridobivalo podatke, je bil 5 stopinj.

3.1.3 Terenska oprema za določevanje položaja

Za določevanje položaja vozila smo uporabili navigacijski sistem SPAN (Synchronized Position Attitude & Navigation) podjetja Novatel Inc., ki združuje tehnologiji satelitskega določevanja položaja in tehnologije inercialnih meritev za zagotavljanje neprekinjenega in natančnega podatka o položaju in usmerjenosti vozila.

Terensko opremo podjetja DFG CONSULTING, d.o.o., za potrebe določevanja položaja, sestavljajo naslednji trije podsistemi:

- sprejemnik GNSS Propak V3 z GPS-anteno Novatel GPS-702-GG,
- inercialna merska enota iMAR FSAS in
- odometer Leane net WS-01.

Sprejemnik GPS Propak V3 z GNSS-anteno Novatel GPS-702-GG

Sprejemnik GPS Propak V3 (slika 5), vgrajen v sistem WideoCar4, je dvo-frekvenčni in sprejema opazovanja GPS. Na GNSS-sprejemnik ProPak-V3 lahko povežemo zunanje enote, kot je inercialna merska enota, na izhodne enote sprejemnika pa se lahko pošilja poljubne podatke o položaju, surovih meritvah in ostalih parametrih delovanja sprejemnika. Ostale specifikacije sprejemnika so navedene v preglednici 1.

Preglednica 1: Specifikacije GNSS-sprejemnika Novatel ProPak-V3.

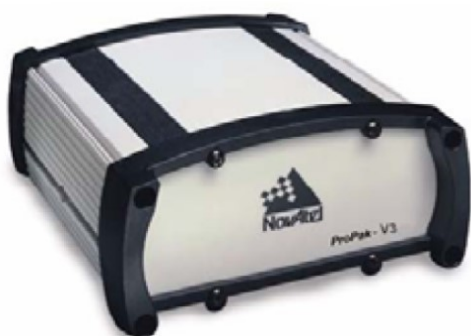
Velikost	185 x 154 x 71 mm
Teža	1.0 kg
Poraba energije	2.5 W
Sprejemanje signalov	GPS L1, L2, L5; SBAS;
Število kanalov	14 L1, 14 L2, 6 L5, 2 SBAS
Komunikacijska vrata	2 x RS-232, 1x RS-422
Shranjevanje podatkov	20 Hz

Natančnost določevanja položaja	L1: 1.8 m SBAS: 0.6. m DGPS: 0.45 m RTK: 1 cm + 1 ppm PP: < 1 cm
Natančnost časovnih meritev	20 ns
Temperatura delovnega okolja	-40°C – 75°C

GNSS-antena GPS-702-GG (slika 6) omogoča sprejem signala tako iz GPS satelitov kot tudi s satelitov navigacijskega sistema GLONASS. S posebno konstrukcijo antene je zagotovljen konstanten položaj faznega centra pri različnih azimutih in vpadnih kotih GNSS-signala na anteno za obe frekvenci (L1, L2). Sprejem GPS-signala ni odvisen od usmerjenosti antene. Omogočeno je tudi uspešno filtriranje odbitih signalov (>multipath<). Več specifikacij sprejemnika je navedenih v preglednici 2.

Preglednica 2: Specifikacije GNSS-antene GPS-702-GG.

Velikost	Premer: 185 mm Višina 69 mm
Teža	500 g
Frekvenčno območje	L1: 1588.5 ± 23 MHz L2: 1236.0 ± 18.3 MHz
Povezava	TNC
Temperatura delovnega okolja	-40°C – 85°C



Slika 5: GPS sprejemnik Novatel ProPak-V3.



Slika 6: GPS antena Novatel GPS-702-GG.

Inercialna merska enota iMAR FSAS

Inercialna merska enota IMU-FSAS (slika 7) je sestavljena iz treh optičnih žiroskopov (FOG), ki delujejo po principu tehnologije zaprte optične zanke in treh servo pospeškometrov. Inercialna enota je načrtovana tako, da omogoča delovanje v zahtevnih vremenskih in delovnih pogojih, saj je vodoneprepusna in absorbira tresljaje z blažilci tresljajev. Nanjo lahko priključimo tudi meritve odometra. Podrobne specifikacije IMU iMAR FSAS so zapisane v preglednici 3.

Preglednica 3: Specifikacije inercialne enote iMAR-FSAS.

Velikost	128 x 128 x 104 mm
Teža	2.1 kg
Vir napetosti	4 – 36 V
Območje zaznavnosti senzorja	kotne meritve : $\pm 450^\circ/\text{s}$ meritve pospeška: $\pm 5 \text{ g}$
Napaka izhodne enote	kotne meritve : $0.75^\circ/\text{h}$ meritve pospeška: 2 mg
Napaka merila	kotne meritve : $< 0.03 \% / 0.03 \%$ meritve pospeška: $< 0.03 \% / 0.1 \%$
Naključne napake	kotne meritve : $0.1^\circ/\sqrt{\text{h}}$ meritve pospeška: $50 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Obdelava meritev	200 Hz
Temperatura delovnega okolja	$-40 - 71^\circ\text{C}$



Slika 7: Inercialna merska enota iMAR-FSAS.

Odometer Leane Net WS-01

Odometer Leane Net WS-01 (slika 8) za razliko od klasičnih odometrov z magnetnimi trakovi predstavlja kompleksnejši koncept za natančno merjenje hitrosti vozila na podlagi inkrementalnega enkoderja. Enkoder je nameščen na zunanji strani zadnjega levega kolesa, dodatno je stabiliziran z navpično zaščitno cevjo. Enkoder zazna 1000 impulzov v eni revoluciji kolesa. V praksi to pomeni, da

glede na obseg kolesa enkoder lahko zazna premik v velikosti 2,2 mm. Na podlagi števila impulzov procesna enota pretvarja meritve impulzov v izredno natančne meritve hitrosti. Podrobne specifikacije odometra so navedene v preglednici 4.

Preglednica 4: Specifikacije odometra Leane Net WS-01.

Max. Rotacijska hitrost	6000 min ⁻¹
Ločljivost	2,2 mm / pulz
Izhodni podatek	A in B pulz, 5 – 30 V
Temperatura delovnega okolja	-40°C – 85 °C



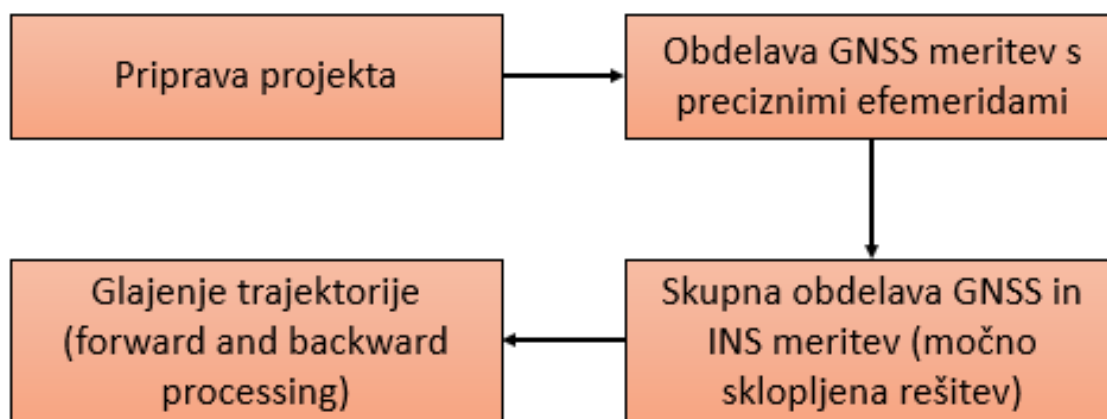
Slika 8: Odometer Leane Net WS – 01 v kovčku in nameščen na avtomobilu.

3.1.4 Obdelava kinematičnih GNSS/INS meritev

Rezultat terenske izmere je datoteka *.gps, kjer so shranjene vse terenske meritve premikajočega sprejemnika. V okviru GNSS meritev so se shranjevala tako fazna kot kodna opazovanja na frekvenci L1 in frekvenci L2 ter Dopplerjeve meritve na frekvenci L1. Podatki GNSS so se shranjevali na vsako sekundo meritev, podatki inercialnih meritev pa so se shranjevali s frekvenco 200 Hz.

Surovi podatke s terena so bili v pisarni obdelani s programskim paketom Inertial Explorer 8.70 podjetja NovaAtel, ki služi za naknadno obdelavo GNSS in INS meritev, njuno združevanje, izračun trajektorije

vozila, oceno natančnosti idr. Položaj se lahko v primeru združevanja GNSS/INS meritev, izračuna v šibko ali močno sklopljenem načinu. V našem primeru so bili položaji izračunani v močno sklopljenem načinu. V nadaljevanju je bil za obdelavo meritev uporabljen tudi RTS (Rauch-Tung-Striebel) filter za glajenje, s katerim so bili doseženi boljši končnirezultati. Slika 9 prikazuje poenostavljen potek obdelave trajektorije premikajočega sprejemnika. Vsak posamezen korak obdelave je podrobneje opisan v nadaljevanju.



Slika 9: Postopek obdelave podatkov GNSS/INS v programskem orodju Inertial Explorer.

Priprava projekta:

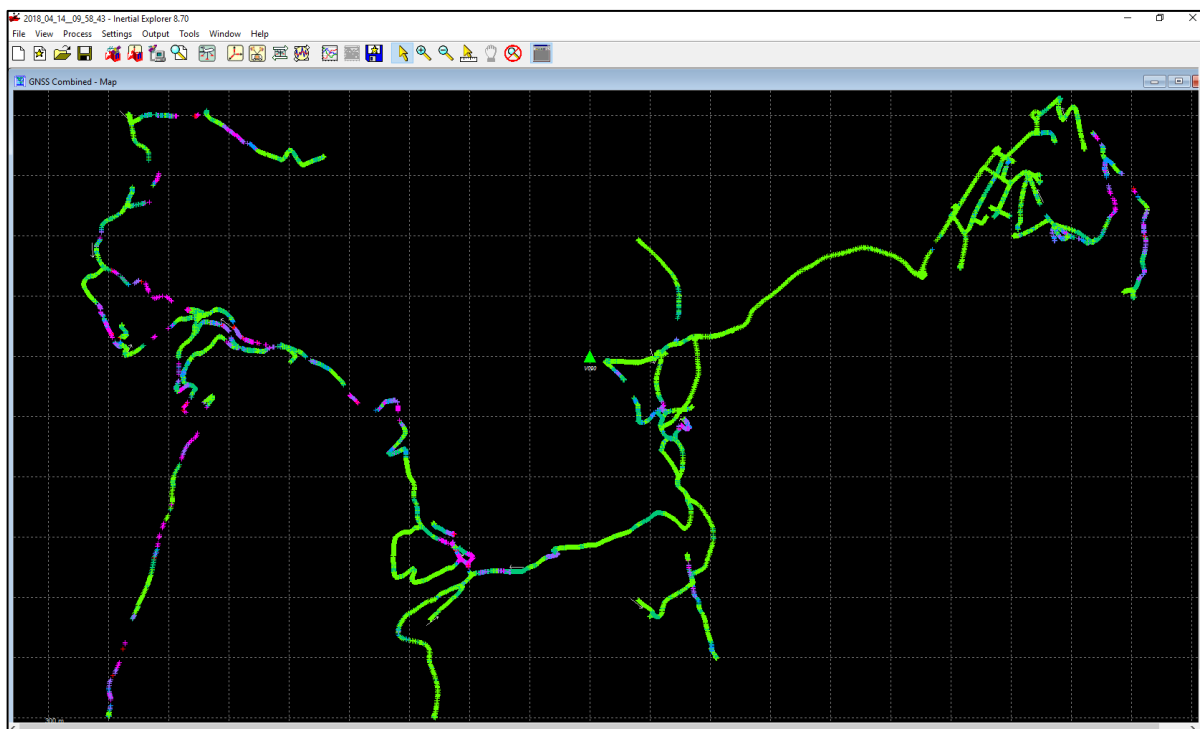
V prvem delu obdelave podatkov se s pomočjo orodja »Project Wizard« ustvari nov projekt. Čarovnik vodi skozi postopek ustvarjanja projekta, dodajanja opazovanj in določanja parametrov opazovanj. V prvem koraku se v program prenesejo GNSS opazovanja premikajočega sprejemnika. Avtomatsko se v projekt dodajo tudi meritve inercialne enote (IMU) in meritve odomotra (DMI). V naslednjem koraku se prenesejo datoteke s preciznimi efemeridami in v projekt doda meritve z referenčne postaje, ki so potrebne za relativno določanje položaja GNSS sprejemnika. Kot referenčno postajo je bila uporabljena virtualno referenčno postajo. Maksimalna oddaljenost VRS od meritev premikajočega sprejemnika, zaradi zagotavljanja natančnosti, ne sme presegati dolžine 15 km. V primeru, da podatki VRS nisodostopni oziroma popolni, se kot referenčno postajo uporabo meritvam najbližjo stalno postajo. Ko so uvoženi vsi potrebni podatki, program izriše približni potek trajektorije, zgolj na podlagi GNSS-meritev. Ker v tem koraku analize natančnosti še ni izvedena, se vse točke trajektorije obarvajo sivo (slika 10).



Slika 10: Izris približne trajektorije na podlagi kodnih opazovanj.

Obdelava opazovanj GNSS

Ko je ustvarjen projekt, sledi obdelava opazovanj. Najprej se določi položaj samo na osnovi opazovanj GNSS brez upoštevanja meritev IMU in DMI. Izbere se metodo obdelave meritev (Diferencialni GNSS) in zahtevnejše nastavitve obdelave. Določi se tudi, da naj se obdelava meritev izvede po času naprej in nazaj. Rezultati obdelave opazovanj GNSS se prikažejo v obarvani trajektoriji premikajočega sprejemnika (slika 11), kjer barve predstavljajo različne natančnosti določitve 3D položaja. Zelena barva predstavlja najvišje natančnosti določitve položaja (0 in 0,15 m), rdeča barva pa najnižje natančnosti (2-10 m) (Inertial Explorer, 2018). Pridobi se tudi podatke o tem, kaj se je dogajalo med terenskimi meritvami, podatke o tem, s koliko satelitov smo sprejemali signal, ali so bili prisotni krajši izpadi signala (angl.cycle-slips), kakšne so bile vrednosti PDOP, HDOP, VDOP. Po pregledu teh parametrov je vidno, da na določenih segmentih v določenih trenutkih meritev ni bilo na voljo signala zadostnega števila satelitov, da je bil onemogočen sprejem signala satelitov, itd.



Slika 11: Izris trajektorije po obdelavi GNSS meritev s preciznimi efemeridami.

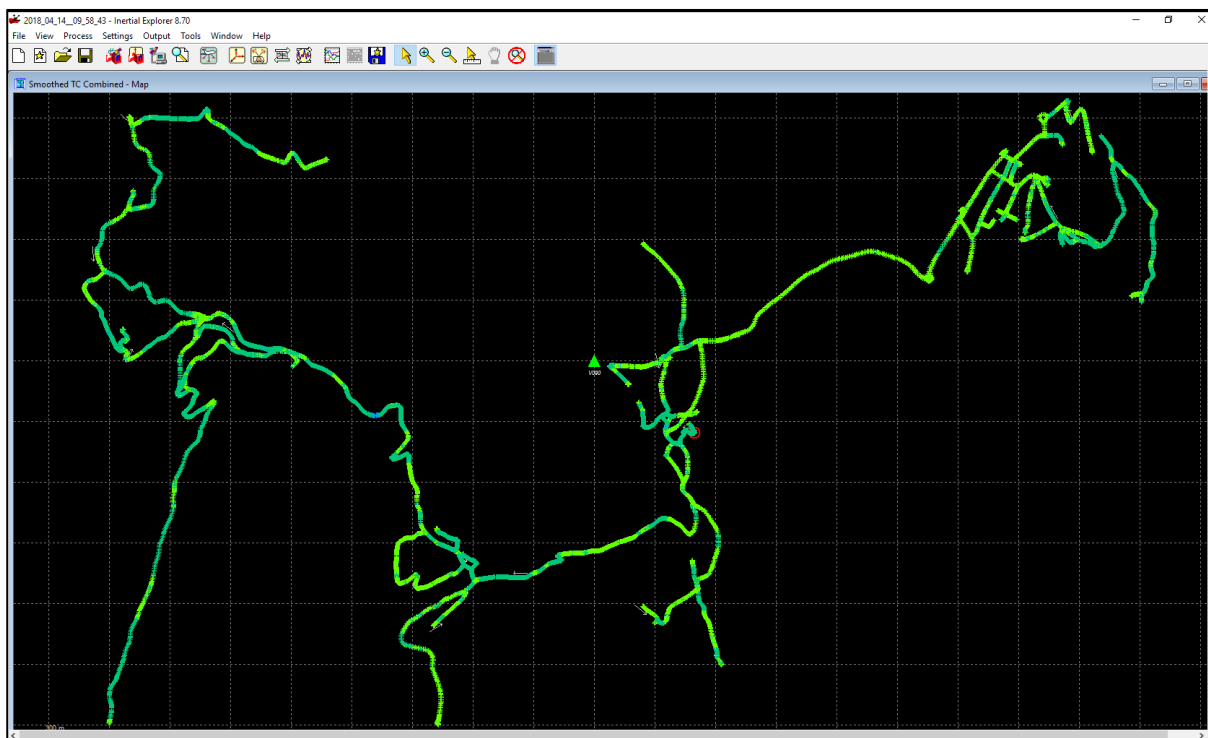
Skupna obdelava opazovanj GNSS in INS

V zadnjem koraku sledi skupna obdelava meritev GNSS in INS. Postopek obdelave opazovanj poteka podobno kot pri obdelavi samo meritev GNSS, le da se v tem primeru nastavijo tudi parametri za obdelavo meritev IMU in DMI. Določiti je potrebno tudi vrednosti odmikov med izhodišči (angl. lever-arm offset) sistemov GNSS in IMU ter med izhodišči sistemov IMU in DMI. Program sam najde intervale, kjer položaja ni mogoče izračunati na podlagi GNSS-meritev, in tam izračuna položaj na podlagi meritev inercialnega sistema.

Na voljo sta dva načina združevanja GNSS in INS meritev - šibko sklopljena rešitev (angl. »Loosely Coupled«) in močno sklopljena rešitev (angl. »Tightly Coupled«). V primeru šibko sklopljenega sistema se položaji premičnega sprejemnika najprej neodvisno izračunajo iz GNSS in inercialnih meritev. Oceni se tudi kakovost določitve položaja premičnega sprejemnika. Nato se izračunani položaji združijo v skupno trajektorijo (slika 12), pri tem pa se vsakemu položaju določi atribut, ki nam pove, iz katerih meritev je bil položaj določen. Če je položaj določen iz meritev GNSS, se mu pripiše atribut GPS, v primeru določitve položaja iz inercialnih meritev se položaju pripiše atribut FREE, atribut ZUPT (angl. »zero velocity update«) pa označuje položaje v trenutkih, ko je vozilo mirovalo (Inertial Explorer, 2018).

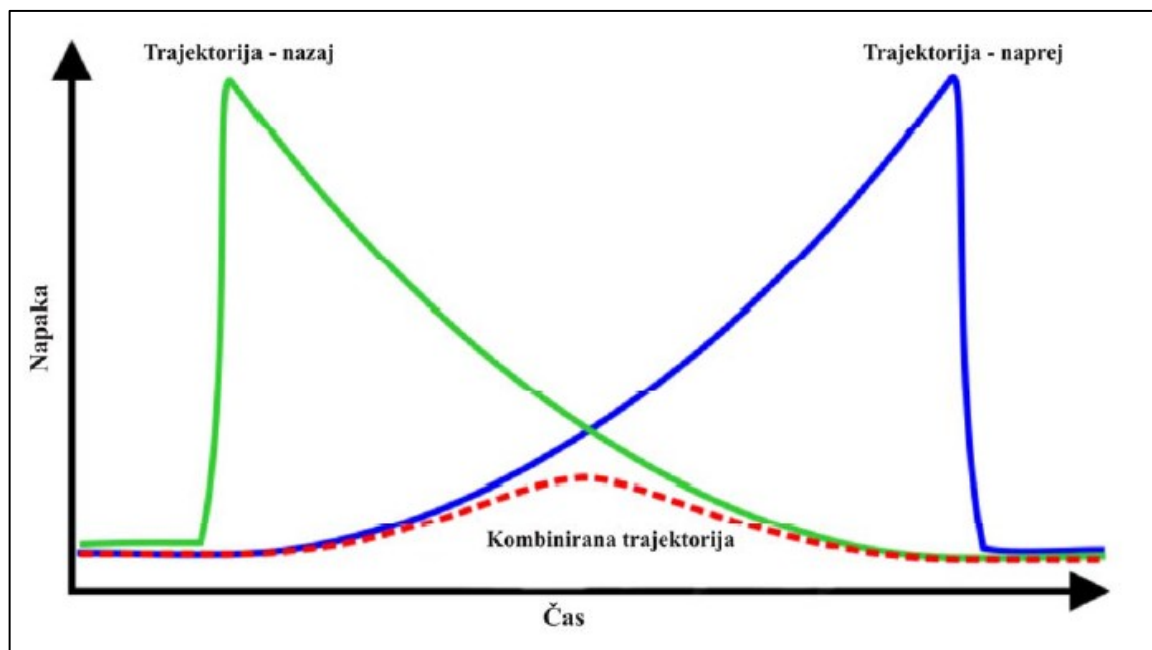
Kadar gre za obdelavo v močno sklopljenem načinu, je dodan tudi atribut PHS (angl. »phase update«). Ta atribut označuje trenutke, ko so se položaji izračunavali iz inercialnih meritev, hkrati pa so bile

uporabljene tudi fazne meritve GNSS-opazovanj z enega, dveh ali pa treh GNSS-satelitov. Vsak izmed omenjenih atributov nam pove, kako kakovostno je bil položaj vozila določen. Najbolj kakovostni način predstavlja atribut GPS, atribut FREE pa predstavlja položaj, določen z najmanjšo natančnostjo (Ranfl, 2009).



Slika 12: Izris trajektorije po skupni obdelavi GNSS in INS meritev v močno sklopljenem načinu s končnim glajenjem (forward and backward processing).

Trajektorijo je mogoče izračunati po času naprej in nazaj. Pri izračunu trajektorije po času nazaj pada natančnost položajev v obratni smeri, kot če računamo trajektorijo po času naprej. Z združitvijo trajektorije, izračunane po času naprej in nazaj, izboljšamo njeno končno kakovost. Princip združevanja rešitev je prikazan na sliki 13. V zadnjem koraku z uporabo filtrov za glajenje še izboljšamo končni rezultat.



Slika 13: Kombinacija dveh trajektorij oz. t.i. vzvratno glajenje (Ranfl, 2009).

Ko se končno združevanje obeh rešitev in končno glajenje zaključita, lahko pregledamo grafični prikaz rezultatov (angl. »Plot result«) in nato po potrebi izboljšamo rezultate s spreminjanjem parametrov obdelave. Ko je dosežen optimalni rezultat, obdelano trajektorijo izvozimo v obliki datoteke *.txt (ASCII datoteka).

Metode združevanja GNSS in INS meritev je v svojem magistrskem delu podrobneje obravnaval Ranfl (2009). Na podlagi številnih analiz in primerjav je ugotovil, da dobimo najboljše rezultate pri določevanju trajektorije, če uporabimo močno sklopljeno kombinirano rešitev s končnim glajenjem. V tem načinu so bile obdelane tudi vse naše terenske meritve.

3.1.5 Rezultat obdelave GNSS/INS meritev

Rezultat obdelave je trajektorija, ki predstavlja položaje premičnega sprejemnika na vsako sekundo izvajanja meritev.

Koordinate točk trajektorije, pridobljene z GNSS/INS sistemom, smo iz ravninskega koordinatnega sistema D96/TM nato pretvorili v ravninski koordinatni sistem D48/GK na podlagi trikotniške transformacije. Natančnost transformacije je 5 cm. Elipsoidne višine, pridobljene z GNSS/INS meritvami, smo preračunali v ortometrične višine na podlagi absolutnega modela geoida.

3.2 Izračun razlik višin med višinami določenimi z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov

V tem poglavju smo opisali sam postopek izračuna razlik višin med višinami, določenimi z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov. Predstavili smo tudi vse vhodne podatke, ki smo jih potrebovali pri samem izračunu ter uporabljeno programsko opremo.

3.2.1 Vhodni podatki za izračun višinskih razlik

Za izračun razlik višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov, smo potrebovali naslednje podatke:

- digitalna os ceste za posamezne odseke,
- trajektorija premičnega sprejemnika v koordinatnem sistemu D48/GK z nadmorskimi višinami,
- digitalni model reliefa z mrežno celico velikosti 1 m x 1 m,
- sloj objektov GJI v Shapefile formatu.

Za dva odseka smo kot vhodni podatek uporabili tudi oblak točk reliefa (OTR). Namen tega je bilo primerjati, kako različni vhodni podatek vpliva na vrednosti razlik višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov.

Digitalna os ceste

Digitalna os ceste predstavlja shematiziran potek sredine cestišča med točko A in točko B. Vodimo jo kot linijski vektorski sloj. Format zapisa je ESRI shapefile, ki je postal de facto standard za zapis prostorskih podatkov. Urejanje digitalne osi cest je odvisna od načina urejanja in upravljalca cest. V Republiki Sloveniji (v nadaljevanju RS) imamo tri institucije, ki skrbijo za evidence o cestah na različnih nivojih (GURS, 2012).

- Direkcija RS za infrastrukturo (DRSI): državne ceste (tudi osi avtocest in hitrih cest),
- občine: občinske ceste,
- Zavod za gozdove Slovenije: gozdne ceste.

V našem magistrskem delu so prišle v poštev digitalne osi državnih cest, ki jih upravlja DRSI.

Trajektorija

Trajektorija v našem primeru predstavlja 3D položaj premičnega sprejemnika na vsako sekundo meritev. V magistrskem delu smo se osredotočili na vrednosti višinske komponente točk trajektorije. Višine, pridobljene s kinematičnimi GNSS/INS meritvami, so elipsoidne višine, ki pa v praksi niso uporabne. Za prehod med elipsoidnimi višinami v nadmorske višine smo uporabili absolutni model geoida Slovenije, izračunan za območje Slovenije leta 2000. Elipsoidne višine in nadmorske višine povezuje

geoidna višina (Kuhar in sod., 2011). Lokalnega modela geoida na našem območju nismo preverjali, ker nam je bil cilj izvesti samo primerjavo višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom in višin iz lidarja. V slednjem so bile nadmorske višine pridobljene z uporabo istega modela geoida kot v primeru kinematičnih GNSS/INS meritev, zaradi česar predpostavimo, da prehod iz elipsoidnih višin v nadmorske višine na same razlike višin nima vpliva, saj je v obeh primerih natančnost transformacije enaka.

Podatke absolutnega modela geoida smo uporabili pri naknadni obdelavi GNSS/INS opazovanj. Programska oprema Inertial Explorer namreč omogoča uporabo modela geoida, zato ga lahko uporabimo za transformacijo med elipsoidnimi in nadmorskimi višinami.

Digitalni model reliefa

Višine, določene z mobilnim kartirnim sistemom, smo na celotnem območju obravnave primerjali z višinami iz DMR1 z velikostjo celice 1 m x 1 m. DMR1 ter vsi ostali izdelki LSS so brezplačno dostopni na spletni strani ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje) in so na voljo v obeh ravninskih državnih koordinatnih sistemih in v nadmorskih višinah. DMR1 je bil najprej izdelan v koordinatnem sistemu D96/TM in nato transformiran v koordinatni sistem D48/GK. Po transformaciji so jih ponovno razrezali na območja v velikosti 1 km² (Triglav Čekada, 2016).

Najpomembnejši korak pri izdelavi DMR je filtriranje točk (Kobler in sod., 2007). Za izdelavo DMR1 Slovenije je bila uporabljena brezparametrična metoda samodejne izdelave DMR iz lidarskih podatkov. Omenjena metoda temelji na konceptih matematične morfologije (Mongus in Žalik, 2012) in je učinkovita tudi na zahtevnih območjih, ki vključujejo strma pobočja in različne stavbe. Kljub dobri metodi filtriranja se vseeno pojavljajo težave pri odstranjevanju velikih objektov, kamor spadajo gosta vegetacija in različni tipi antropogenih vplivov na okolje (različne pozidave, ceste, mostovi itd.). Analiza metode izdelave DMR iz podatkov lidar je bila izvedena na testnih primerih in je pokazala, da naj bi se teren pravilno določil v več kot 90 odstotkih (Mongus in sod., 2013).

Oblak točk reliefa

Oblak točk reliefa (OTR) je izdelek, ki vsebuje le točke, ki so bile klasificirane kot tla. Podatki so shranjeni po listih velikosti 1 km² v obeh državnih koordinatnih sistemih. Shranjeni so v formatu LAS. Dosežena gostota točk tal je na območjih gozdov večinoma do 0,5 točk/m², na odprtih območjih travnikov pa okoli 2 točki/m². Ta podatek je potrebno upoštevati pri analizi rezultatov, predvsem na območjih gozdov (Triglav Čekada in sod., 2012).

Objekti gospodarske javne infrastrukture

Gospodarska javna infrastruktura (GJI) so vsi objekti gospodarske infrastrukture, vpisani v Zbirni kataster GJI, ter ostala javna infrastruktura. Objekti GJI so razdeljeni na sedem slojev, ki so podrobno opredeljeni v Zbirnem katastru gospodarske javne infrastrukture v dokumentu Šifrant slojev in opis strukture izdanih podatkov. V magistrskem delu so nas zanimali objekti cestne infrastrukture, ki spadajo v sloj prometne infrastrukture. Med objekte cestne infrastrukture uvrščamo mostove, nadvoze, podvoze, železnice (če so na nadvozu), viadukte, predore in galerije. Lokacijo objektov GJI lahko opišemo bodisi s točko, linijo ali poligonom v državnem koordinatnem sistemu (GURS, 2012).

3.2.2 Programsko orodje FME Desktop

V magistrskem delu smo za izračun razlik višin uporabili programsko orodje FME Desktop, podjetja Safe Software. Prva različica z imenom Feature Manipulation Engine je izšla leta 1996, leta 2008 pa se je programsko orodje preimenovalo v FME. FME Desktop omogoča povezovanje, združevanje in obdelavo prostorskih podatkov. Sestavljeno je iz treh programov in sicer: FME Workbench (FME Delovno okolje), FME Data Inspector (FME Pregledovalnik) in FME Quick Translator (FME Hitro prevajanje). Programsko orodje FME Desktop podpira ogromno število različnih formatov, podatke pa lahko uporabniki preoblikujemo, povezujemo in obdelujemo s pomočjo več kot 400 orodji (angl. transformers) (Safe Software, 2012).

3.2.3 Opis postopka obdelav podatkov

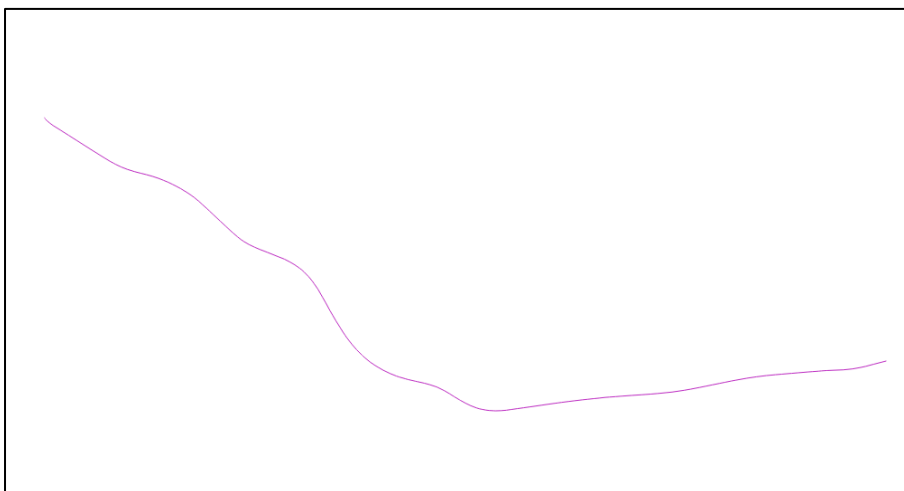
Izračun razlik višin smo v programskem okolju FME Desktop po korakih izvedli najprej za en odsek po sledečem postopku:



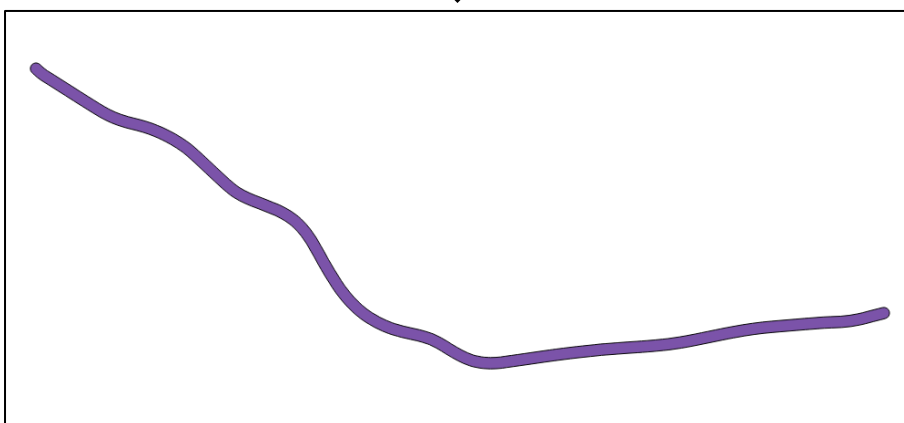
Slika 14: Shematični prikaz izračuna razlik višin v programskem okolju FME Desktop.

Določitev območja za izrez DMR1

V program FME Desktop smo uvozili os ceste za izbrani odsek v Shapefile (SHP) formatu (slika 15). S pretvornikom »Buffer« smo okoli digitalne osi ceste ustvarili območje oz. poligon za izrez DMR1 v širini 6 metrov na vsako stran osi cest (slika 16). Širino pasu smo izbrali tako, da vrednost presega maksimalno možne širino vozišča državnih cest. S tem smo zagotovili, da vse točke trajektorije padejo v območje tega poligona. Izdelan poligon smo izvozili v Shapefile (SHP) formatu.



Slika 15: Digitalna os ceste za poljuben odsek.



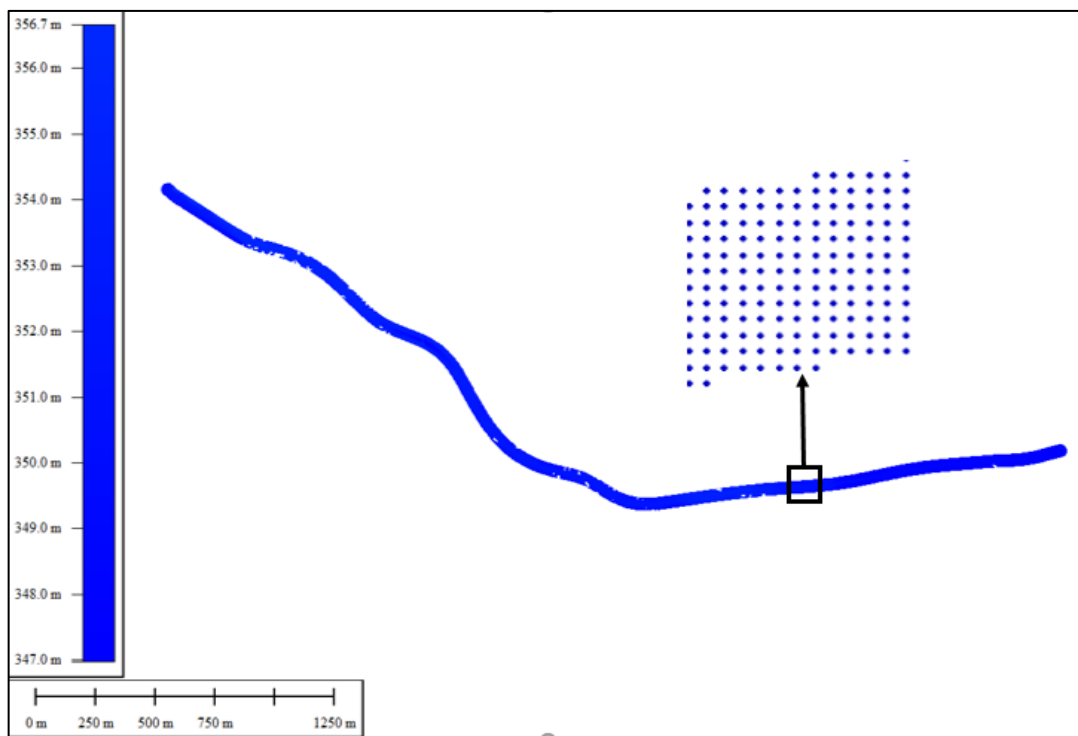
Slika 16: Območje za izrez DMR1.

Iskanje ustreznih listov DMR1 za posamezni odsek

Za vsak posamezni odsek smo poiskali liste DMR1, ki jih seka posamezni odsek. Uporabili smo orodje »Spatial Filter«. Izhodna datoteka tega koraka je batch datoteka, ki ob zagonu avtomatsko poišče ustrezne liste DMR1 iz celotne baze listov DMR1 in jih skopira v naš delovni imenik.

Izrez DMR1

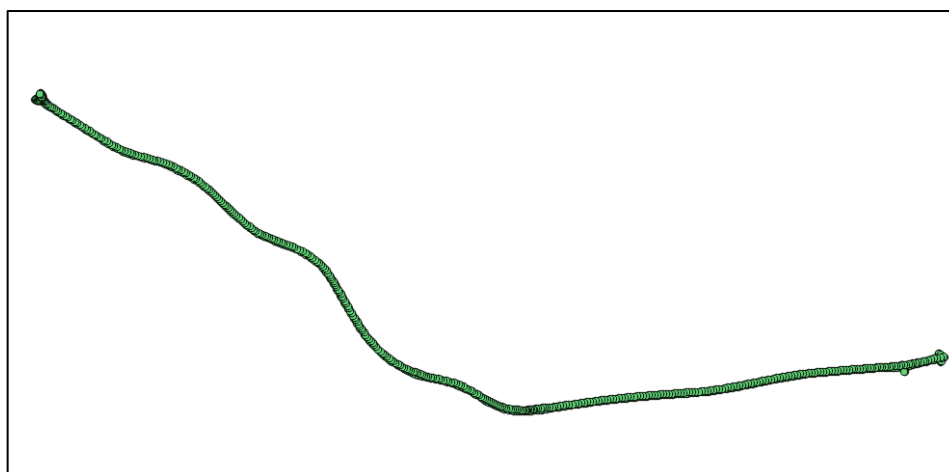
S pretvornikom »Clipper« smo točke DMR1 izrezali s poligonom, katerega smo predhodno ustvarili (buf.shp). Namen tega koraka je bil zmanjšati količino podatkov, vključenih v obdelavo, in tako skrajšati čas obdelave. Rezultat izreza so točke DMR1 znotraj poligona (slika 17).



Slika 17: Izrezan DMR1.

Izrez trajektorije

Trajektorija predstavlja položaje premičnega sprejemnika znotraj posameznega snemalnega dneva, kar pomeni, da je sestavljena iz več odsekov državnih cest. Z orodjem »Clipper« smo zato podobno kot pri izrezu DMR na območju ustvarjenega poligona izrezali tudi trajektorijo (slika 18).



Slika 18: Izrezana trajektorija.

Izdelava ploskve za obravnavano območje iz DMR1

Vhodni podatek v tem koraku so bile točke DMR1 na izrezanem območju v ASCII formatu. S pretvornikom »Surface Modeller« smo iz teh točk izdelali ploskev reliefa.

Dodajanje novega atributa – razlika višin

V naslednjem koraku smo točke trajektorije z orodjem »PointOnRasterValueExtractor« projecirali na DMR1. S tem smo določili višine točk trajektorije na DMR1.

Izračun razlike višin

V naslednjem koraku smo izračunali razlike višin iz meritev mobilnega kartirnega sistema in iz lidarskih podatkov. S pretvornikom »Attribute Creator« smo v atributno tabelo vsakega posameznega odseka dodali dva nova atributa in sicer razliko višin »razlikaVisin« ter absolutno razliko višin »AbsRazlika«.

Razliko višin smo izračunali kot:

$$\Delta H = (H_{trj} - H_{GPS\ nad\ tlemi}) - H_{DMR} \quad (1)$$

ΔH – razlika višin

H_{trj} – višinska koordinata točke pridobljena z meritvami mobilnega kartirnega sistema

$H_{GPS\ nad\ tlemi}$ – višina GPS antene nad tlemi

H_{DMR} – višina v celici ploskve lidarskega DMR-ja

Višina GNSS antene nad tlemi je 1,95 m. Izhodna datoteka izračuna je ESRI Shapefile datoteka, ki ima v atributni tabeli dodana stolpca z vrednostmi razlik višin in absolutnih razlik višin za vsako posamezno točko trajektorije znotraj odseka.

Statistična analiza izračunanih razlik višin

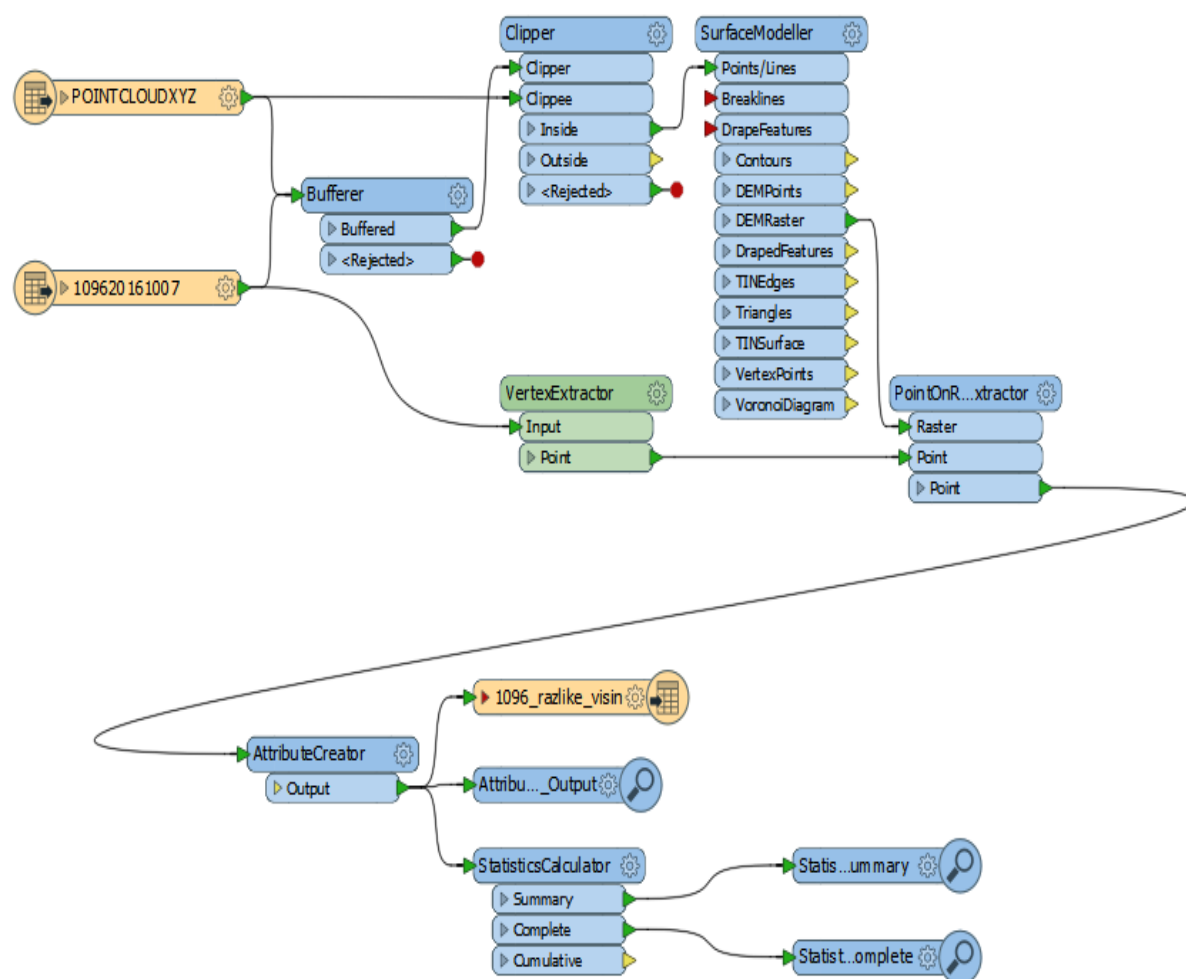
Za dobljene razlike višin smo z orodjem »Statistic Calculator« v programskem okolju FME Desktop poiskali največjo razliko višin ter izračunali standardni odklon σ in srednjo vrednost μ razlik višin med višinami, določenimi z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarja. Prav tako smo izračunali RMSE (angl. Root Mean Square Error) oz. srednji kvadratni pogrešek. Gre za statistično količino, s katero lahko opredelimo grobe pogreške. Posamezno odstopanje označimo za grobi pogrešek v primeru, da presega 3-kratnik vrednosti RMSE. Enačbe za izračun RMSE, srednje vrednosti μ in standardnega odklona σ so:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta H_i - \mu)^2} \quad (4)$$

Na sliki 19 je prikazana shema celotnega postopka izračuna razlik višin v programskem okolju FME Desktop.

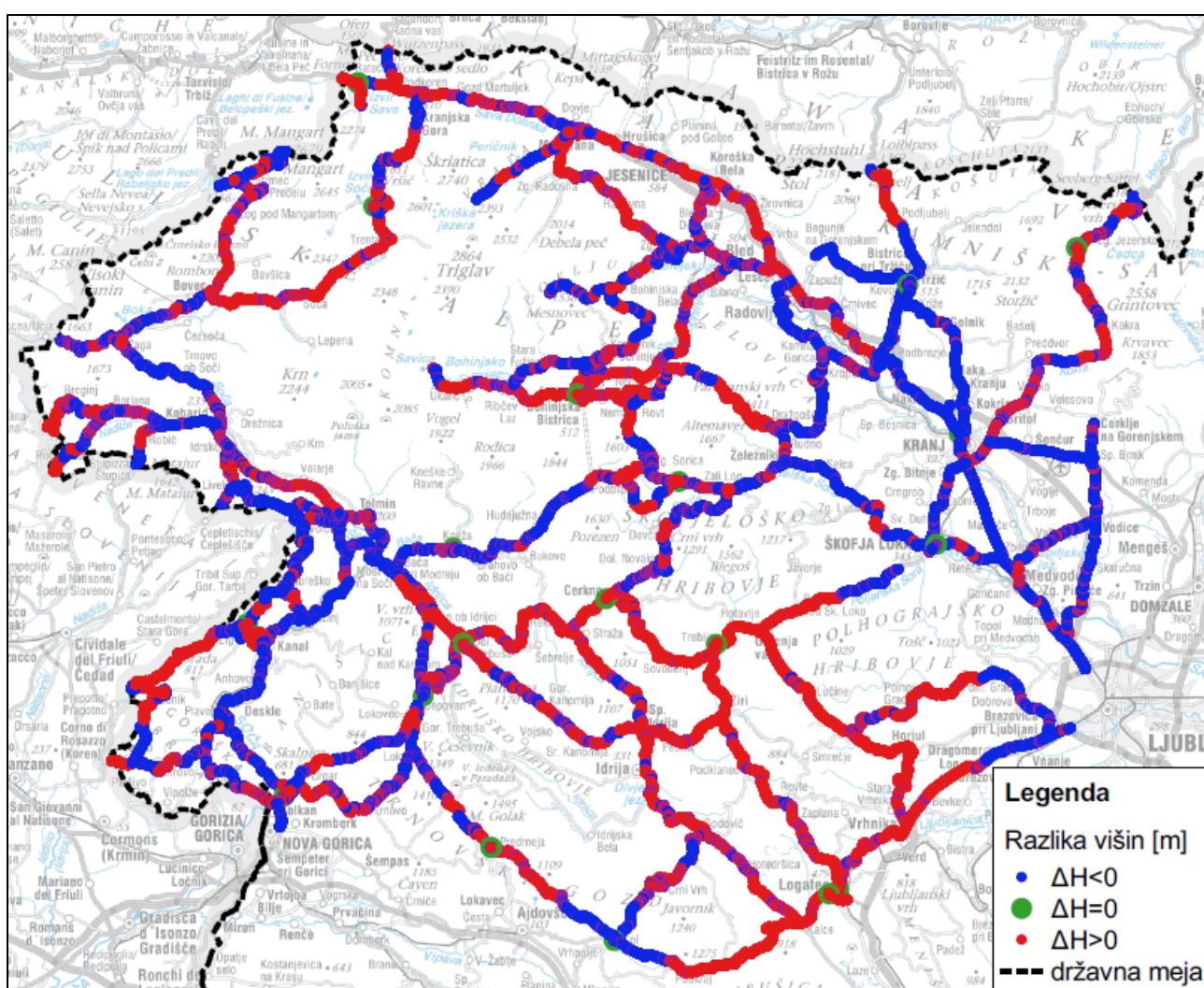


Slika 19: Algoritem za izračun razlik višin v programu FME Desktop.

Za izračun razlik višin za celotno območje obravnave (vsi odseki državnih cest, vključeni v izračun) smo izdelali datoteko batch, ki za vsak odsek kliče ukaze iz programa FME Desktop in izračuna razliko višin za vsako točko trajektorije na tem odseku. Celotno zaporedje ukazov (datoteka final.bat) je priloženo v Prilogi A.

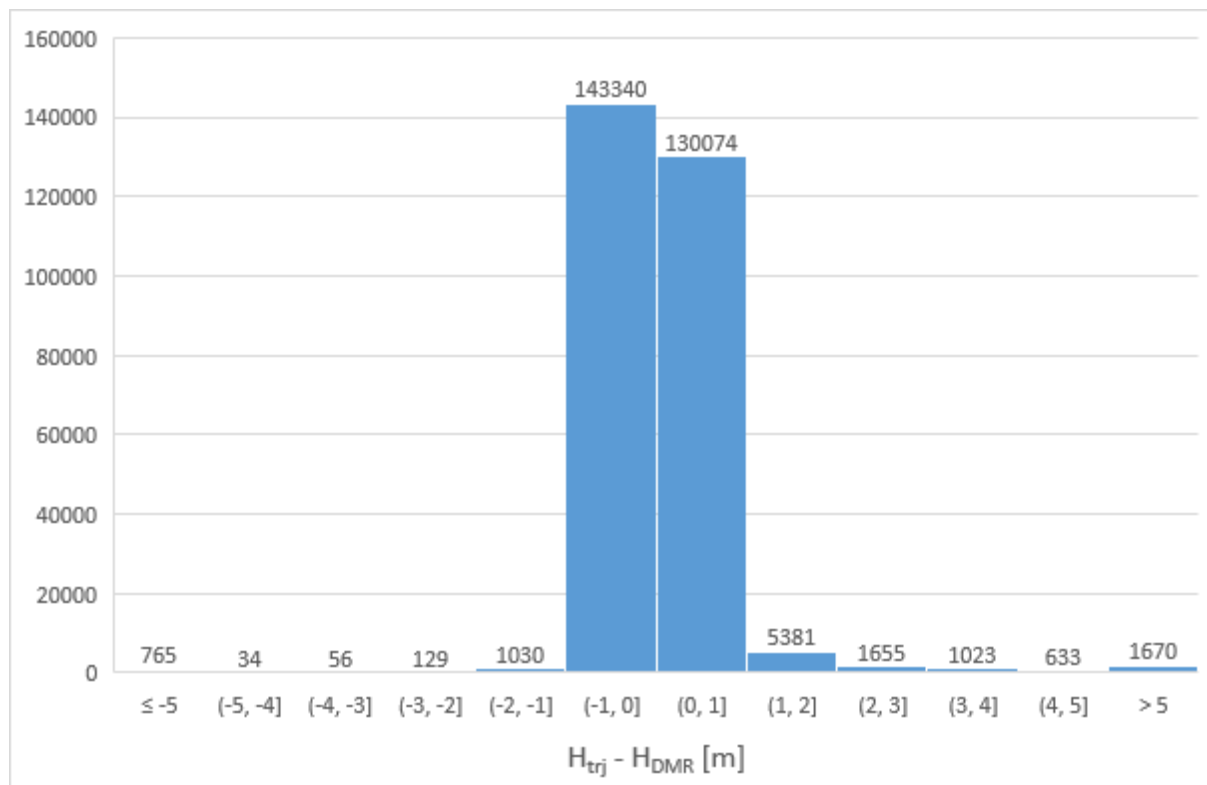
4 REZULTATI

V izračun smo vključili 159 odsekov državnih cest v skupni dolžini 1204,970 km. Za vseh 285.790 točk trajektorije smo pridobili razlike višin med višinami, pridobljenimi z meritvami mobilnega kartirnega sistema, in višinami na DMR-ju, izdelanim iz podatkov aerolaserskega skeniranja Slovenije (Slika 20). Rezultati kažejo na normalno porazdelitev razlik višin okoli srednje vrednosti enake 0 (grafikon 1). 145.329 (50,85 %) točk trajektorije se nahaja nad ravnino ploskve DMR (rdeča barva), 140.436 (49,14 %) točk pa poteka pod ravnino ploskve DMR (rdeča barva). Nadmorska višina točk trajektorije se v 25-ih primerih popolnoma ujema z nadmorsko višino točk na DMR (0,01 %).



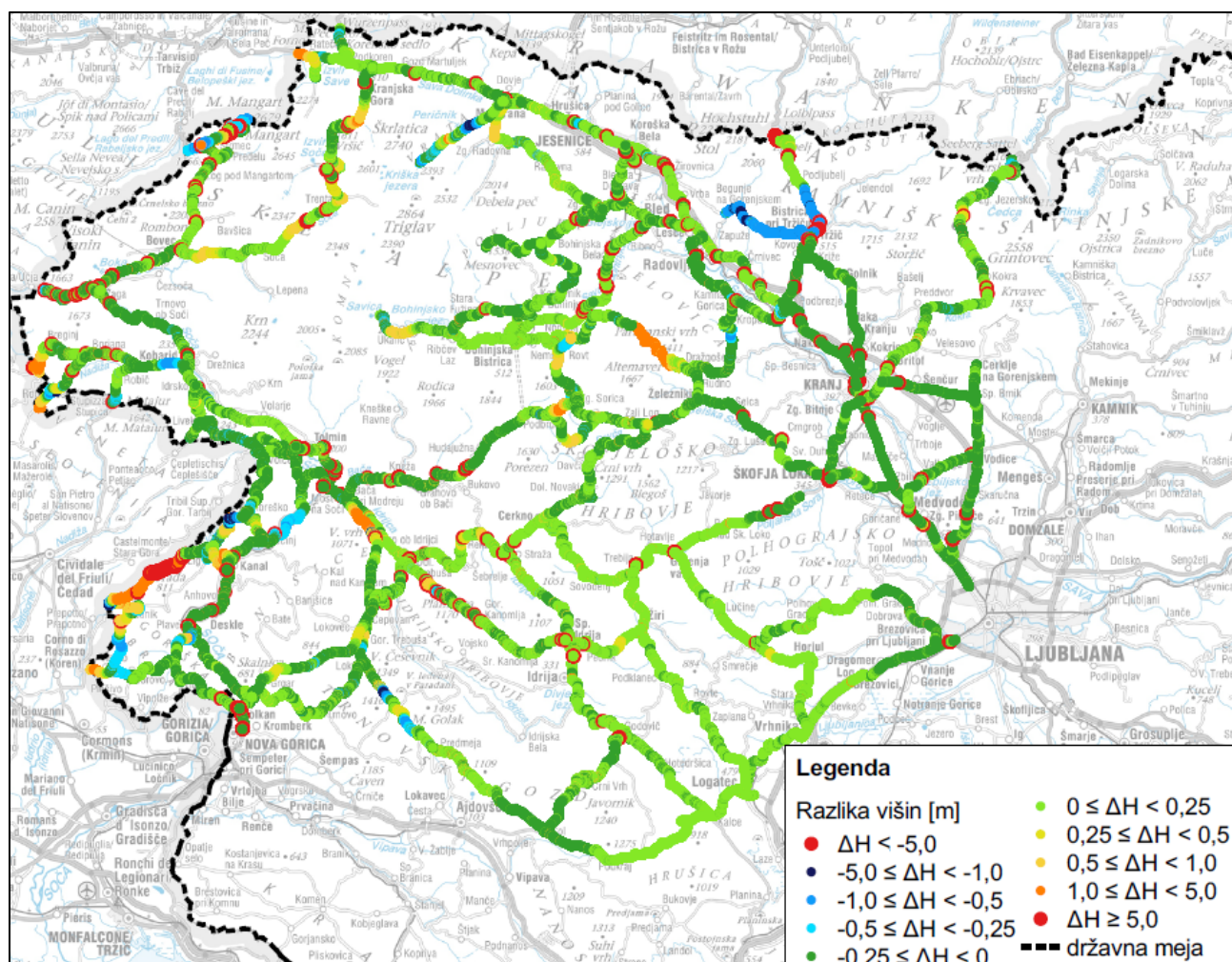
Slika 20: Razlike višin glede na smer odstopanja od DMR-ja.

Normalnost porazdelitve odstopanj vizualno ocenimo na podlagi histograma porazdelitve razlik višinskih koordinat (grafikon 1). Iz grafikona 1 vidimo, da se največ vrednosti giblje okoli srednje vrednosti, ki znaša -0,05 m.

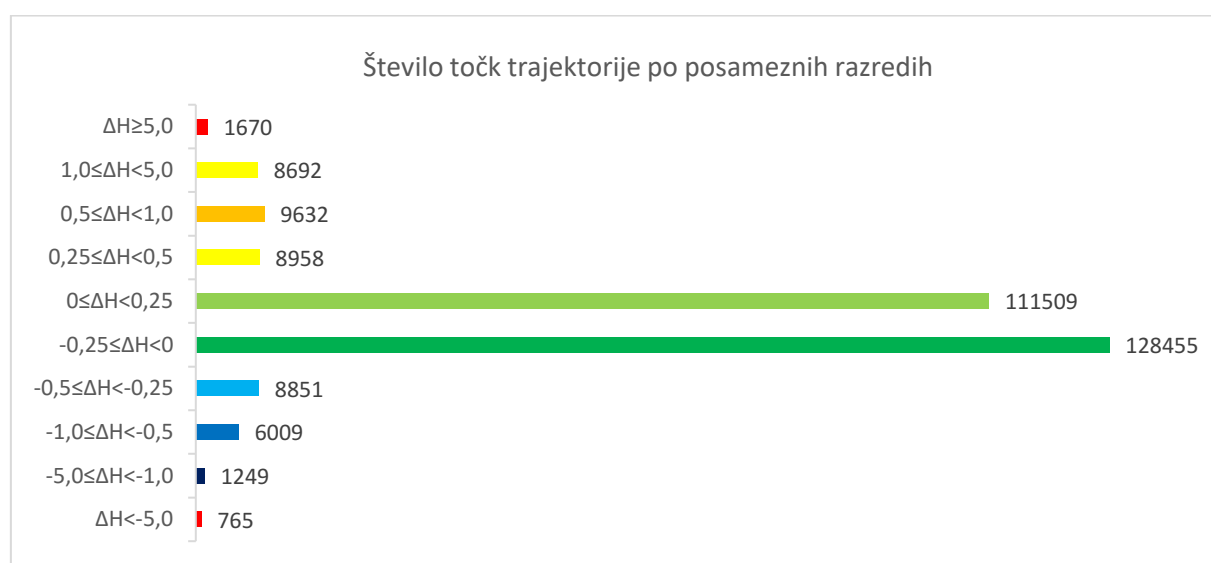


Grafikon 1: Histogram razlik višin za celotno območje obravnave.

V nadaljnji analizi rezultatov smo razlike višin razvrstili v deset razredov odstopanj. Razlike višin so (slika 21) v kar 83,97 % manjše od 0,25 m. Vsaka točka trajektorije se obarva glede na razred odstopanja, v katerega pade (npr. zelena barva predstavlja majhne razlike višin, rdeča barva predstavlja velike razlike višin). Grafikon 2 prikazuje število točk znotraj posameznega razreda odstopanj.



Slika 21: Razlike višin obarvane glede na razred odstopanja v katerega padejo.



Grafikon 2: Število točk znotraj posameznih razredov odstopanj.

Za razlike višin smo ugotovili maksimalno vrednost razlike višin in izračunali standardni odklon, srednjo vrednost, mediano in RMSE razlike višin (preglednica 5). Srednja vrednost znaša -0,05 m, kar pomeni, da so višine točk trajektorije v povprečju 5 centimetrov nižje kot DMR1, interpoliran iz lidarskih točk. Razpršenost razlik višin prikažemo s standardnim odklonom, ki znaša 7,28 m. RMSE znaša 7,28 m. Srednjo vrednost in RMSE lahko označimo kot osnovi za določitev zanesljivosti rezultata. Maksimalna razlika višin znaša kar 407,30 m. Tako visoke vrednosti se pojavijo na območju predora (Ljubelj), kjer višine pridobljene z meritvami mobilnega kartirnega sistema predstavljajo višino ceste, ki poteka skozi tunel, višine iz DMR pa predstavljajo višine na površju.

Preglednica 5: Vrednosti cenilk odstopanj.

Cenilka	Vrednost
Maksimalna razlika višin [m]	407,30
Standardni odklon [m]	7,28
Srednja vrednost [m]	-0,05
Mediana [m]	-0.002
RMSE [m]	7,28

Podrobneje smo analizirali kje in zakaj prihaja do večjih odstopanj. Velike razlike višin smo opazili predvsem na območjih goste vegetacije in območjih različnih antropogenih vplivov na okolje (različne pozidave, ceste, mostovi itd.). Kot že omenjeno, DMR1 prikazuje teren brez grajenih objektov, zato so razlike višin, ki padejo v območje teh objektov, lahko grobo pogrešene. Do razlik prihaja tudi zaradi fizičnih sprememb samega reliefa po izvedbi ALS Slovenije. Najbolj pravilne rezultate bi dobili, če bi bile meritve z mobilnim kartirnim sistemom izvedene takoj po izvedbi ALS.

Podrobneje smo te ugotovitve prikazali in razložili v nadaljevanju poglavja na dveh izbranih odsekih. Pri tem smo izbrali odseka z različno konfiguracijo terena, s čimer smo želeli prikazati tudi ta vpliv na razlike višin.

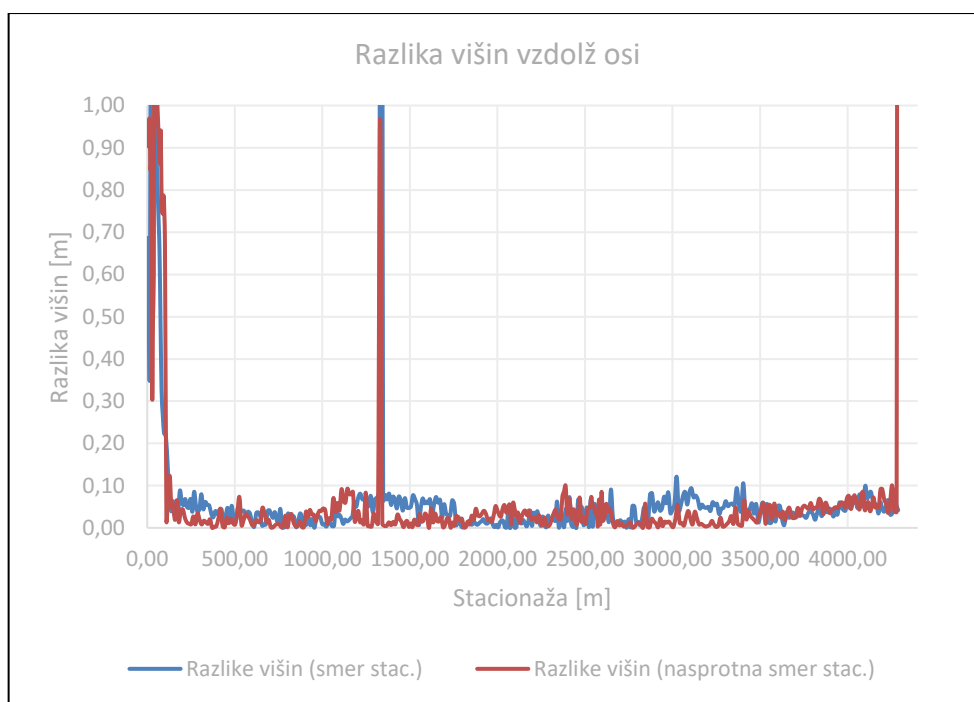
Primer 1

Za prvi primer smo izbrali del odseka 1078, ki poteka med Škofjo Loko in Jeprco (slika 22). Dolžina odseka je 4,21 km, število točk trajektorije na tem odseku je 831. Odsek je ravninski, brez goste vegetacije in strmih naklonov. Opisana konfiguracija terena omogoča doseganje dobrih rezultatov z uporabo GNSS tehnologije. Nebo je odprto proti jugu, kar zagotavlja sprejem signala zadostnega števila satelitov. Poleg tega na območju odseka ni goste vegetacije, zaradi česar ne prihaja do večjih prekinitev signala s satelitov. Ravninska območja poleg tega spadajo tudi med najpreprostejše primere za izdelavo DMR, natančnost izdelave DMR je na ravninskih območjih nad povprečjem (Mongus in sod., 2013).



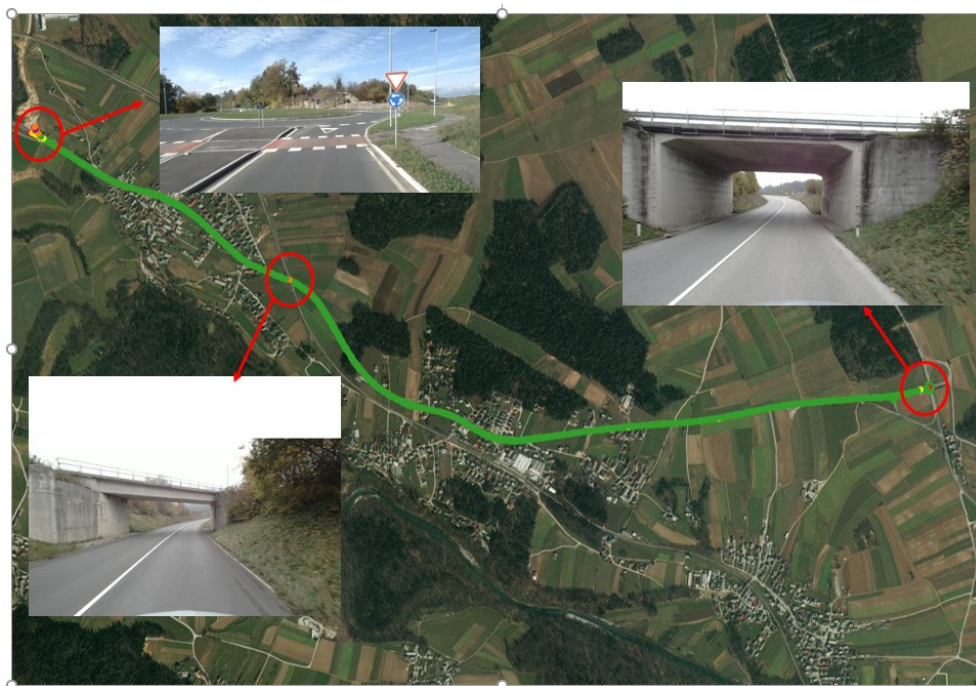
Slika 22: Digitalna os ceste za odsek 1078.

Na grafikonu 3 so prikazane razlike višin vzdolž odseka 1078 v obe smeri vožnje. Razlika višin za večino točk trajektorije je po pričakovanjih majhna in sicer kar v 94,4 % primerih pade v območje 0,1 m in manj. Srednja vrednost razlik višin je na tem odseku 0,05 m, višine točk trajektorije so torej v povprečju 5 centimetrov višje kot DMR1, interpoliran iz lidarskih točk. Standardni odklon razlike višin je 0,15 m, kar kaže na majhno razpršenost podatkov okoli srednje vrednosti. Mediana oz. središčna vrednost (Me) je srednja vrednost, ki leži na polovici statistične množice in v našem primeru znaša 0,03 m.

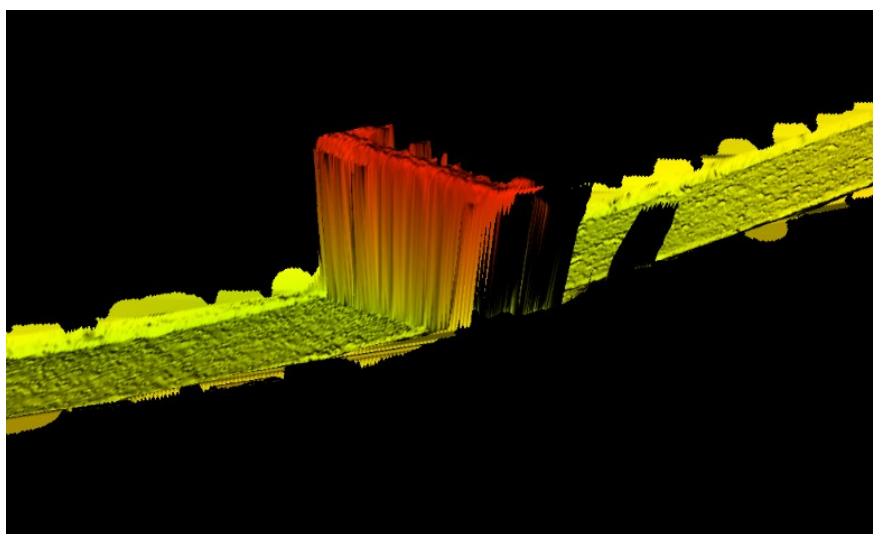


Grafikon 3: Razlike višin vzdolž digitalne osi ceste za odsek 1078.

Na treh mestih vzdolž odseka 1078 je prišlo do večjih odstopanj. Na sliki 23 so ta odstopanja označena z rdečimi krogci. Za vsako situacijo je dodana fotografija iz terena. V dotičnem primeru vidimo, da se v dveh primerih odstopanja pojavijo na mestu, kjer je zgrajen nadvoz. V tretjem primeru je odstopanje posledica novega stanja na terenu. Krožišče je bilo zgrajeno po tem, ko je bilo v Sloveniji izvedeno aerolasersko skeniranje. Naše meritve tako zajemajo novo stanje, DMR1 pa stanje pred spremembo, iz česar lahko zaključimo, da podatki niso primerljivi in jih ni smiselno upoštevati pri izračunu ter končnem vrednotenju podatkov. Na sliki 24 se dobro vidi, kako na območju nadvoza točke lidarja predstavljajo vrh nadvoza in ne vozišča, po katerem poteka trajektorija.



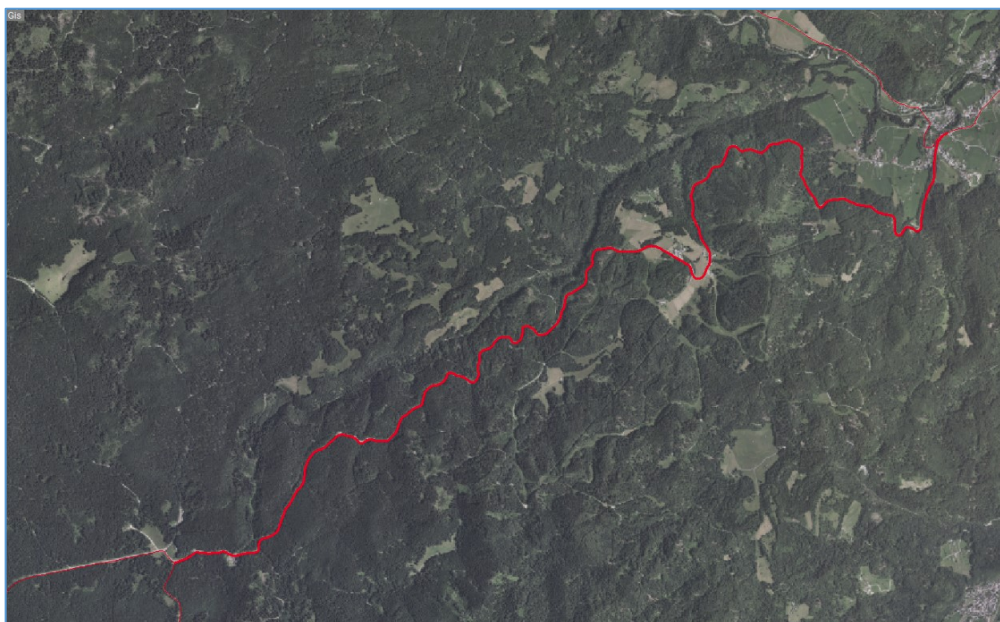
Slika 23: Primeri večjih odstopanj (rdeči krogci).



Slika 24: Prikaz DMR1 na območju podvoza.

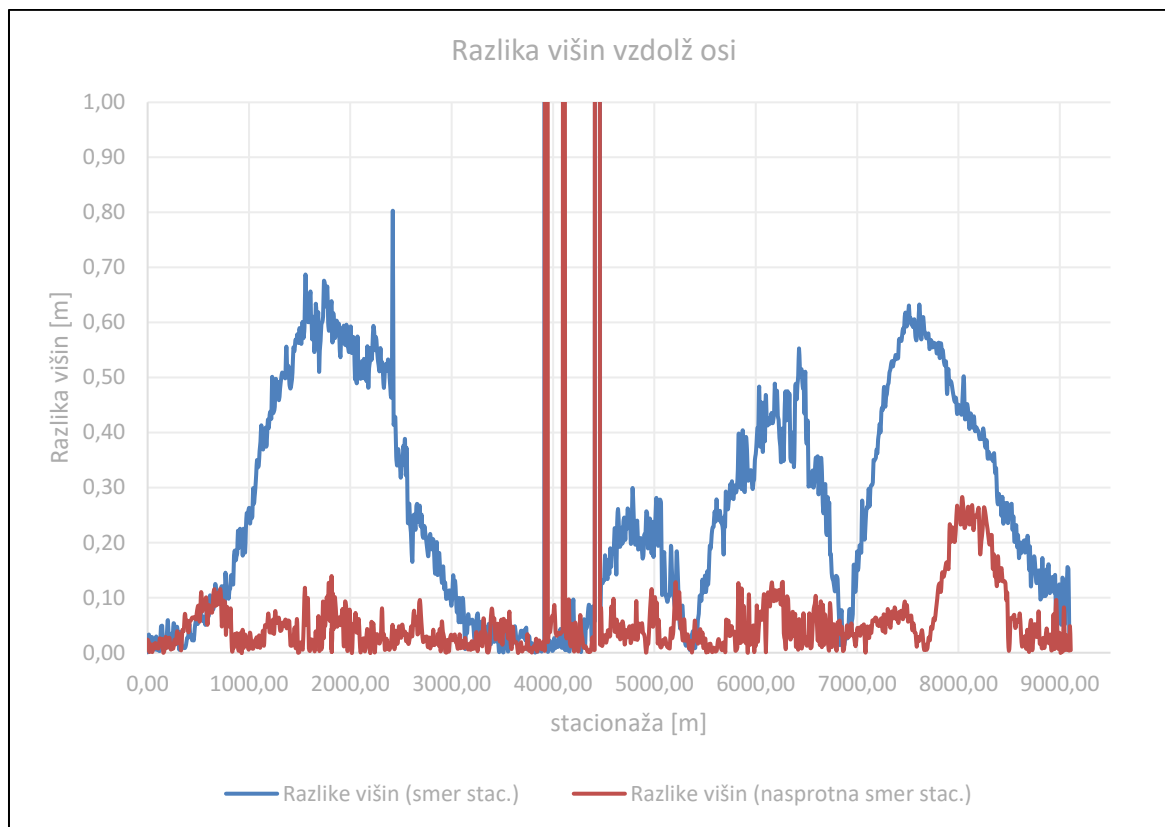
Primer 2

Za drugi primer smo si izbrali odsek 1096, ki poteka med Krnico in Mrzlim Studencem (slika 25). Skupna dolžina odseka je 9,16 km, število točk trajektorije na tem odseku je 2053. Konfiguracija terena je v primerjavi z odsekom 1078 precej bolj razgibana. Večji del odseka 1096 namreč poteka po hribovitem terenu z gosto vegetacijo in občasnimi strmimi nakloni.



Slika 25: Digitalna os ceste za odsek 1096.

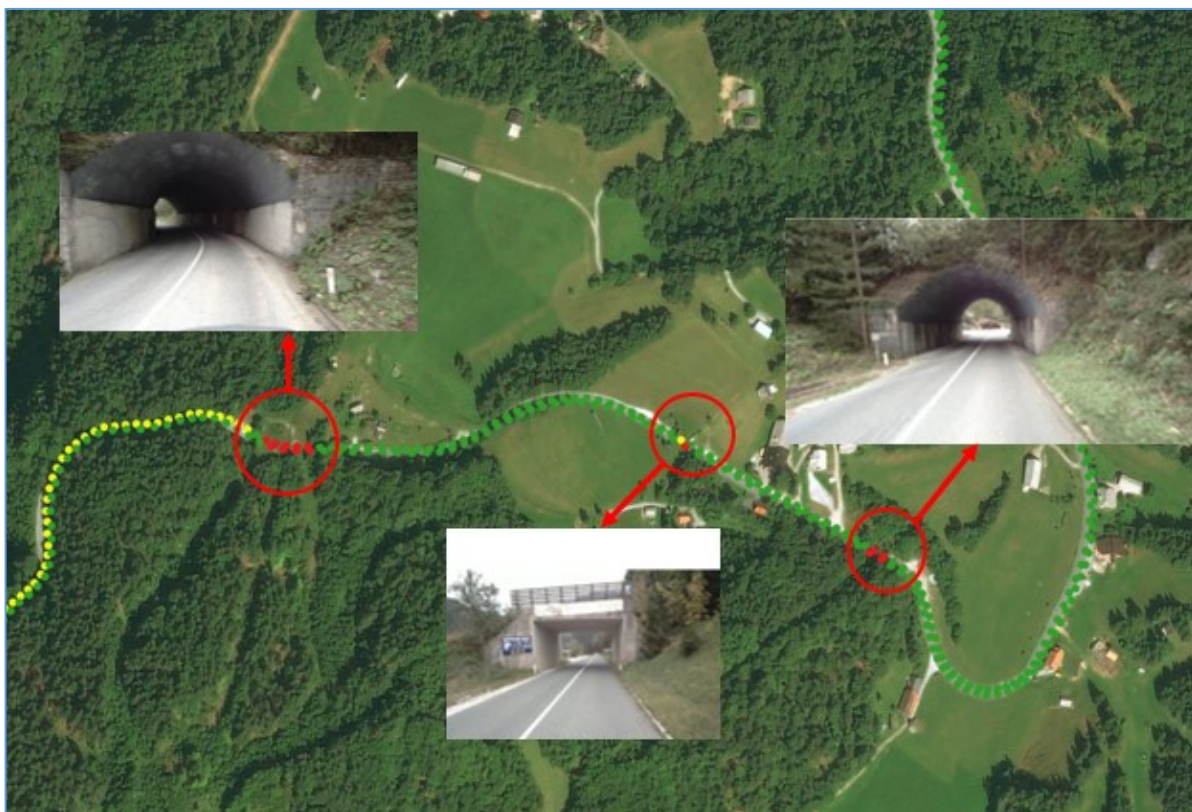
Na grafikonu 4 so prikazana odstopanja višin vzdolž celotnega odseka 1096 v obe smeri vožnje. V tem primeru so odstopanja že v osnovi večja kot v prvem primeru. Eden izmed razlogov za to so gotovo pogosti izpadi/prekinitve sprejema GNSS-signala ali moten signal v času snemanja. V primerih izgube signala GNSS sistem za določevanje položaja SPAN koordinate nadomesti s koordinatami, pridobljenimi z »dead reckoning« sistema, ki pa s časom izgublajo natančnost. Na grafu vidimo tudi veliko razliko v odstopanjih glede na smer vožnje. Po pregledu vhodnih podatkov za ta odsek smo ugotovili, da so bili položaji, določeni z mobilnim kartirnim sistemom, v smeri stacionaže določeni s slabšo natančnostjo, saj je bilo v eni smeri na nebu vidnih manj satelitov (pogostejše izgube signala). Problem lahko na tem odseku predstavljajo tudi meritve ALS, saj v primeru vegetacije laserski žarek težko prodre do tal. Na območjih bujne vegetacije je običajna gostota 0,5 točk/m². Sklepamo lahko, da je model ploskve reliefa na teh območjih zaradi nizke gostote točk precej posplošen.



Grafikon 4: Razlike višin vzdolž osi za odsek 1096.

Srednja vrednost razlik višin je na tem odseku 0,21 m, višine točk trajektorije so torej v povprečju 21 centimetrov višje od DMR1, določenega iz lidarskih točk. Standardni odklon razlike višin je 0,63 m, kar kaže na precejšno razpršenost podatkov okoli srednje vrednosti. Mediana oz. središčna vrednost (Me) je srednja vrednost, ki leži na polovici statistične množice in v našem primeru znaša 0,07 m. Približno 60 % razlik višin je še vedno manjših od 10 centimetrov, najmanjši delež točk pa podobno kot v prvem primeru tudi tukaj pade v najvišji razred odstopanj (razlike višin večje kot 5 m). Tudi v primeru 2 se večja odstopanja pojavijo na mestih, kjer so zgrajeni objekti cestne infrastrukture.

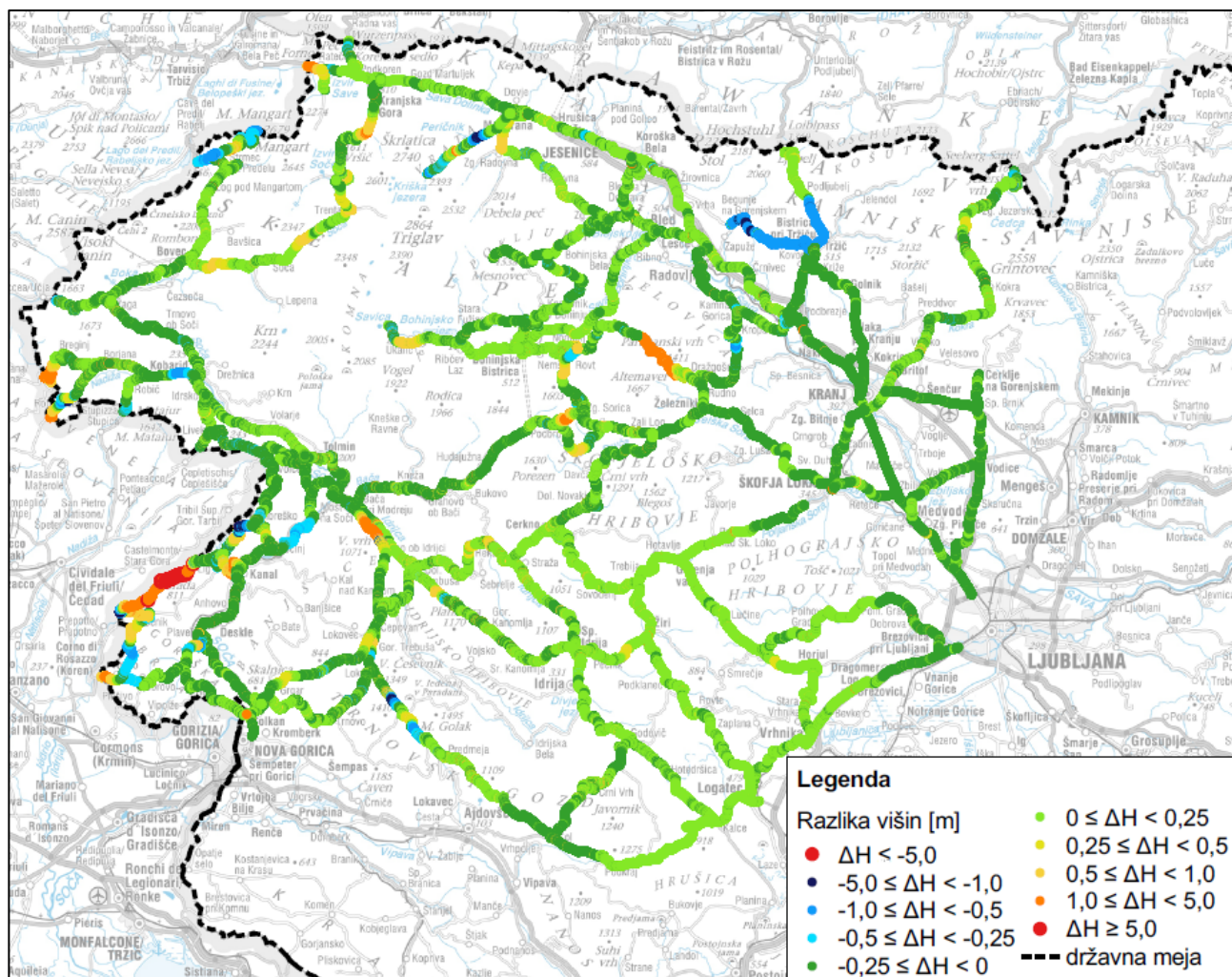
Na sliki 26 so večja odstopanja označena z rdečimi krogi. Za vsako situacijo je dodana fotografija iz terena. Velike razlike v višinah se pojavijo na treh lokacijah vzdolž osi. V dveh primerih predstavlja težavo krajši predor, v enem primeru podvoz.



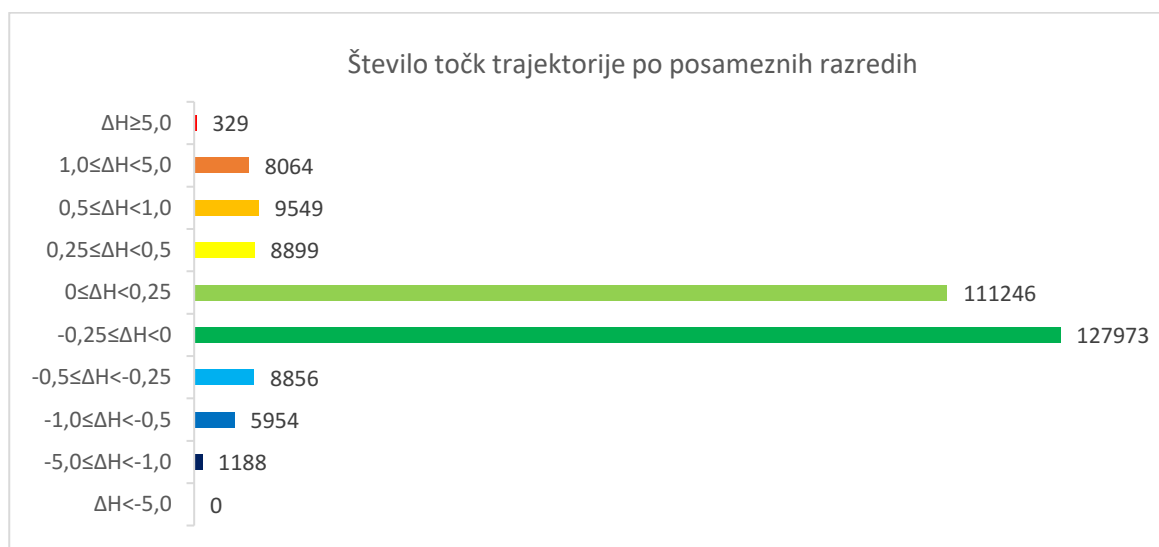
Slika 26: Lokacija večjih odstopanj višin.

Opisana odstopanja predstavljajo grobe pogoške, ki smo jih v nadaljnjem postopku izključili iz analize. Od DRSI smo pridobili linijski sloj objektov gospodarske javne infrastrukture (GJI) v Shapefile formatu. V postopek izračuna razlik višin v programu FME Desktop smo dodali korak, v katerem smo na sloju trajektorija izločili vse točke, ki padejo v območje objektov cestne infrastrukture (mostovi, nadvozi, viadukti idr.).

Po izločitvi objektov GJI je od 285.790 točk ostalo 282.058 točk trajektorije, kar predstavlja približno 1,31 % manj točk kot v prvem izračunu (slika 27). Izločili smo kar 86,5 % točk, ki padejo v najvišji razred odstopanj. Od 2435 točk, za katere je bila razlika višin višja od 5 metrov, je po ponovnem izračunu ostalo le še 329 točk. Število točk po posameznih razredih smo prikazali na grafikonu 5. Razlike višin v kar 84,4 % primerih padejo v območje 0,25 m ali manj.



Slika 27: Razlike višin po izločitvi objektov GJI.



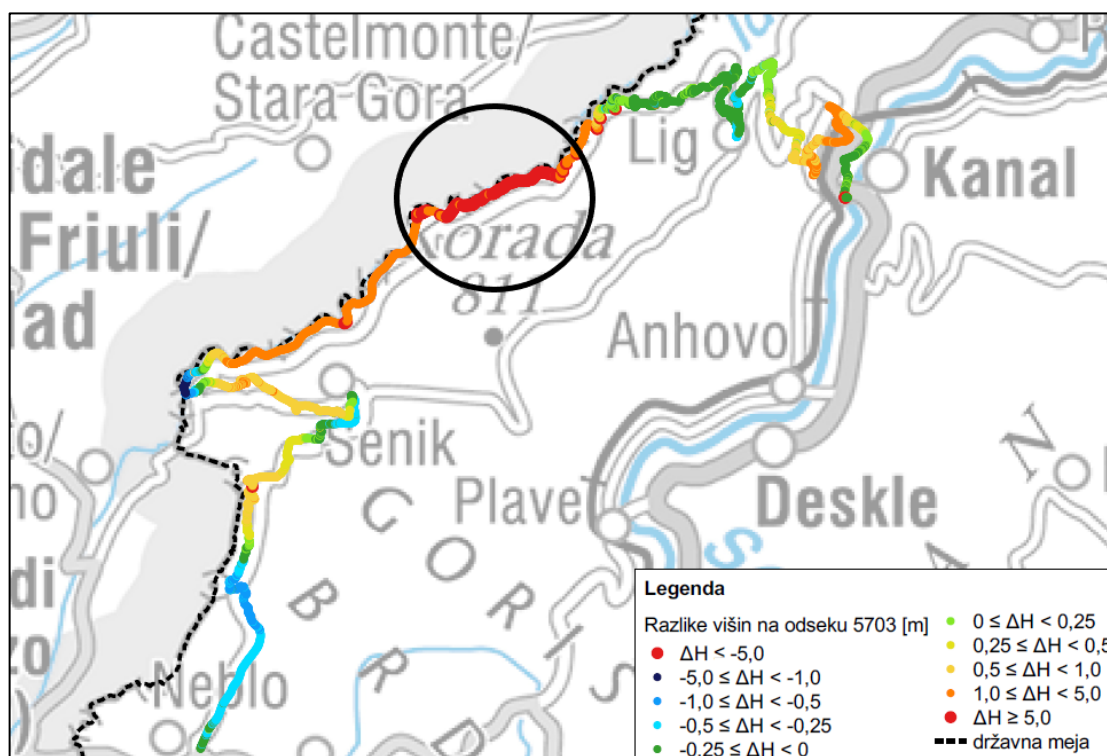
Grafikon 5: Število točk trajektorije po posameznih razredih po izločitvi objektov GJI.

Srednja vrednost razlik znaša 0,06 m, višine točk trajektorije so torej v povprečju 6 centimetrov višje kot DMR1, interpoliran iz lidarskih točk. Mediana v tem primeru znaša -0,20 m. Standardni odklon razlik višin znaša 0,48 m. Najvišja absolutna razlika višin znaša 9,27 m, kar je precej manj kot pred izločitvijo objektov GJI (preglednica 6).

Preglednica 6: Vrednosti cenilk odstopanj po izločitvi objektov GJI.

Cenilka	Vrednost
Največja abs. razlika višin [m]	9,27
Standardni odklon [m]	0,48
Srednja vrednost [m]	0,06
Mediana [m]	-0,20
RMSE [m]	0,49

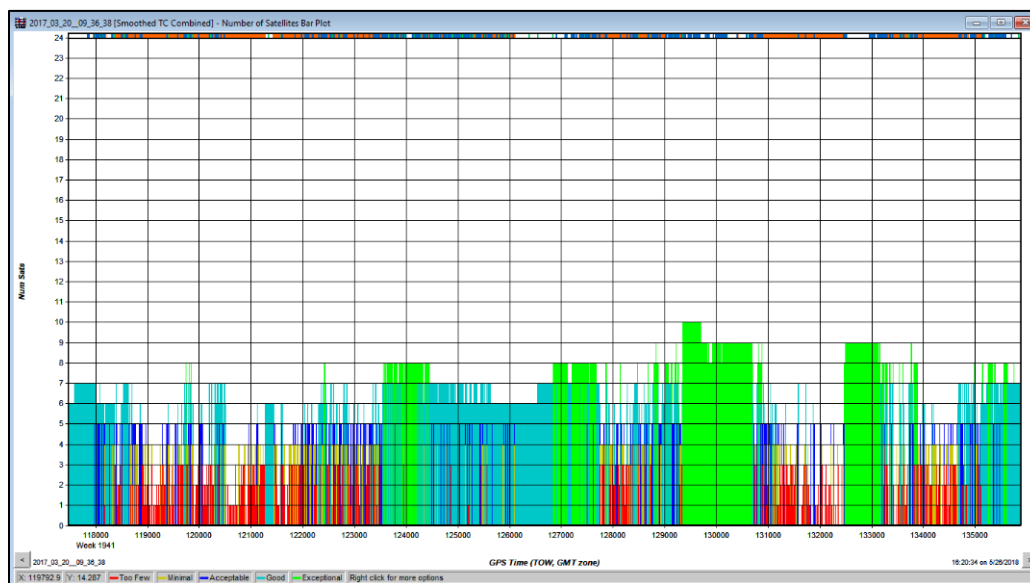
Izločili smo večino točk, kjer se pojavljajo velike razlike višin, vendar so nekatera odstopanja še vedno velika, iz česar sklepamo, da gre za sistematčne napake v vhodnih podatkih. Nekaj točk z velikimi razlikami višin je gotovo ostalo, ker v postopku izločitve območij GJI nismo uspeli zajeti vseh točk in so tako nekatere točke ostale na robovih poligonov oziroma v njihovi bližini. Te točke smo naknadno ročno odstranili. Ostala odstopanja, večja od 5 metrov, so ostala le na območju odseka 5703. Razlike višin na celotnem odseku 5703 so prikazane na sliki 28. S črnim krogcem je še dodatno označeno območje največjih razlik višin.



Slika 28: Razlike višin po razredih odstopanj za odsek 5703.

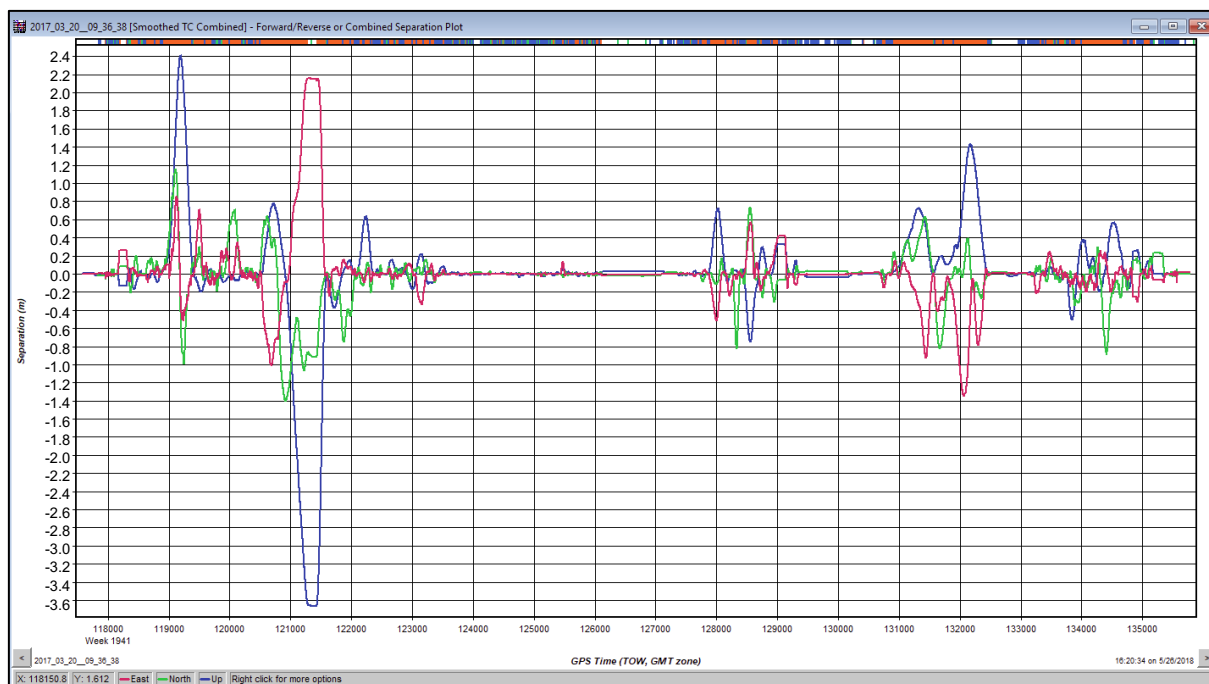
Podrobneje smo obravnavali kakovost vhodnih podatkov na območju odseka 5703. Najprej smo preverili kakovost višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom.

Grafikon 6 prikazuje število vidnih satelitov v času meritev na odseku 5703. Med izvedbo meritev so bili pogosto vidni manj kot štirje sateliti (rdeča barva na grafu), kar pomeni, da za določitev položaja sprejemnika meritve GNSS niso zadostovale. V primeru sprejema signala enega, dveh ali treh satelitov se koordinate določijo iz inercialnih meritev, hkrati pa se uporabijo tudi fazne meritve GNSS opazovanj z enega, dveh ali treh GNSS satelitov. V trenutkih, ko sprejemnik ni sprejemal signala satelitov, so se položaji točk določili samo iz inercialnih meritev. V obeh primerih velja, da je natančnost določitve položaja slabša kot v primeru določitve položaja samo iz meritev GNSS. Že po dveh minutah vožnje brez sprejema signala GNSS s satelitov natančnost drastično pade, na odseku 5703 pa so bile daljše prekinitve signala pogoste.



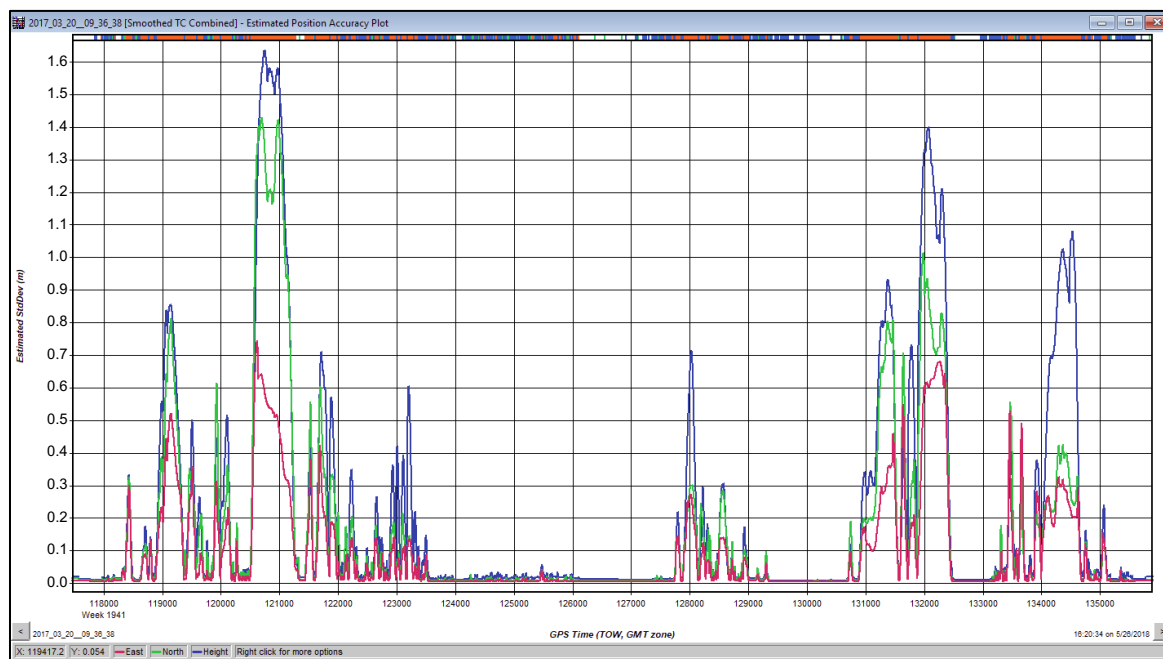
Grafikon 6: Število satelitov v času snemanja na odseku 5703.

Na grafikonu 7 so prikazane koordinatne razlike v položaju točk trajektorije po času naprej in nazaj. Več kot polovica meritev se nahaja v velikostnem razredu med 0 in 0,5 m. Razlika med koordinatami, določenimi po času naprej in nazaj, ima nekaj večjih odstopanj, tudi večjih kot 1,6 m. Pregled izračunanih koordinat kaže, da so te vrednosti na delih odseka, ki potekajo skozi gozd, ali pa na mestih obračanja. Na odstopanje izračunanih koordinat lahko vplivajo tudi slabo določene komponente vektorja premika med centrom IMU ter centrom GNSS antene. Vrednosti komponent je potrebno pred izvajanjem meritev večkrat določiti.



Grafikon 7: Razlike v določitvi položaja točk trajektorije po poti naprej in nazaj.

Grafikon 8 prikazuje natančnost določitve trajektorije, ki je bila izračunana v močno sklopljenem načinu združevanja GNSS in INS meritev z dodatnim glajenjem po času naprej in nazaj. Z zeleno barvo je predstavljen standardni odklon izračunane koordinate N (angl. »north«), rdeča barva predstavlja standardni odklon koordinat E (angl. »East«), modra barva pa predstavlja višinsko komponento, določeno z natančnostjo 40 cm. Rezultati so precej slabi, kar pripisujemo težkim pogojem za izvedbo meritev. Vrednosti standardnih odklonov so določene statistično, zato ocenjujemo, da je sicer njihova vrednost manjša od dejanske, ampak so te razlike zanemarljive. Ker je položaj vozila na tem delu odseka določen z nizko natančnostjo, lahko te točke trajektorije v postopku izračuna razlik upoštevamo kot slabši vhodni podatek.

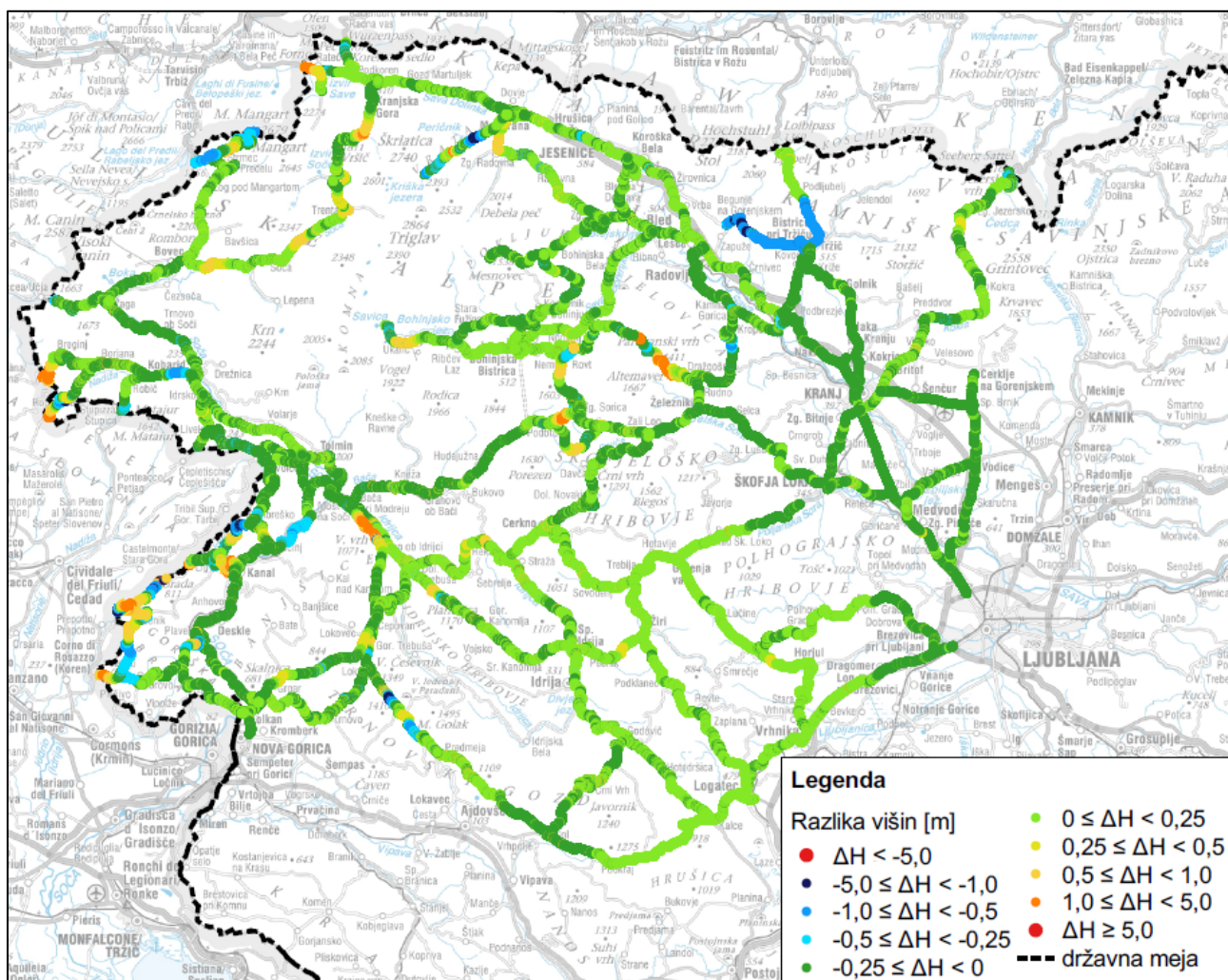


Grafikon 8: Standardni odklon določitve položaja na podlagi močno sklopljene in glajene rešitve.

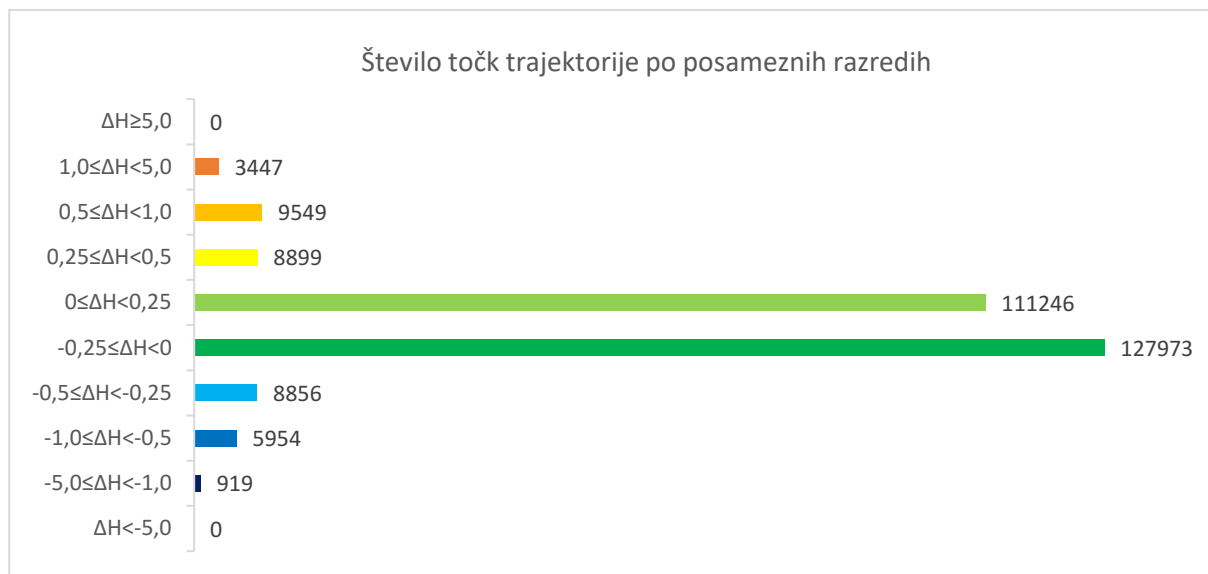
Prvi vhodni podatek za izračun razlik višin je torej slabe natančnosti in zato že na tem mestu ne moremo pričakovati dobrih rezultatov pri izračunu razlik višin. Poleg tega je potrebno preveriti in upoštevati, da so na tem območju lahko problematični tudi lidarski podatki. Podobno kot odsek 1096 tudi odsek 5703 v večjem delu poteka skozi gozd, teren je hribovit, nakloni so precejšnji. Znani algoritmi imajo v strmem gozdnatem reliefu težave z izdelavo DMR, saj ima v strmem reliefu lokalna okolica v oblaku podobne značilnosti kot vegetacija: velike višinske razlike pri majhnih vodoravnih razdaljah, zaradi česar je težavno razlikovanje talnih odbojev od vegetacije (Kobler, 2011). Kobler je v svoji doktorski disertaciji predstavil metodo izdelave DMR, posebej namenjeno uporabi v strmem gozdnem reliefu, ki izkorišča preobilje lidarskih odbojev (redudanco) za zmanjšanje tovrstnih napak v DMR (algoritem REIN) (Kobler, 2011).

Pri interpretaciji rezultatov analiz, opravljenih na podlagi DMR, je pomembno, da poznamo kakovost uporabljenega DMR. Kakovost bi lahko ocenili na podlagi referenčnih meritev. Sami referenčnih meritev nismo izvajali, imamo pa podatke o kakovosti georeferenciranja izdelkov LSS znotraj posameznih blokov snemanj. Ti podatki predstavljajo oceno točnosti višin znotraj posameznih blokov, vseeno pa je območje posameznih blokov precej razgibano in zato ne moremo z gotovostjo trditi, da je na območjih odsekov, vključenih v analizo, višinska točnost vedno znotraj 15 centimetrov (RMSE). Če bi želeli izvesti oceno točnosti višin DMR na posameznem odseku, bi morali izvesti lokalno oceno kakovosti DMR.

Kjer razlike višin dosežejo zelo velike vrednosti, sklepamo, da gre za grobe pogreške. Odstopanje označimo za grobi pogrešek v primeru, da presega 3-kratnik vrednosti RMSE. Grobi pogreški so lahko posledica slabe višinske točnosti bodisi meritev, izvedenih z GNSS/INS izmero, bodisi z ALS. Na podlagi izračunanega RMSE smo vse grobe pogreške izločili in še enkrat izračunali statistične vrednosti za razlike višin. Ostalo je 277.759 točk trajektorije, kar pomeni, da je prag grobih odstopanj preseglo 1,52 % vrednosti. Razlike višin po izločitvi grobih pogreškov so prikazane na sliki 29. Izločili smo vse tiste točke trajektorje, za katere so bile razlike višin večje od 5 m (rdeči krogi), občutno pa se je zmanjšalo tudi število točk v razredih, ki zajemajo absolutne razlike višin od 1 do 5 metrov. Število točk po posameznih razredih je prikazano na grafikonu 9.



Slika 29: Razlike višin po izločitvi grobih pogreškov.



Grafikon 9: Število točk po posameznih razredih po izključitvi grobih pogreškov.

Za razlike višin smo poiskali največjo razliko višin ter izračunali standardni odklon, srednjo vrednost, mediano in RMSE (preglednica 7). Najvišja absolutna razlika višin znaša 1,52 m. Absolutne razlike višin so v kar 86,41 % manjše od 0,25 m. Standardni odklon znaša 0,27 m. Višine točk trajektorije so v povprečju 17 centimetrov višje kot DMR1, interpoliran iz lidarskih točk. RMSE znaša 0,27 m.

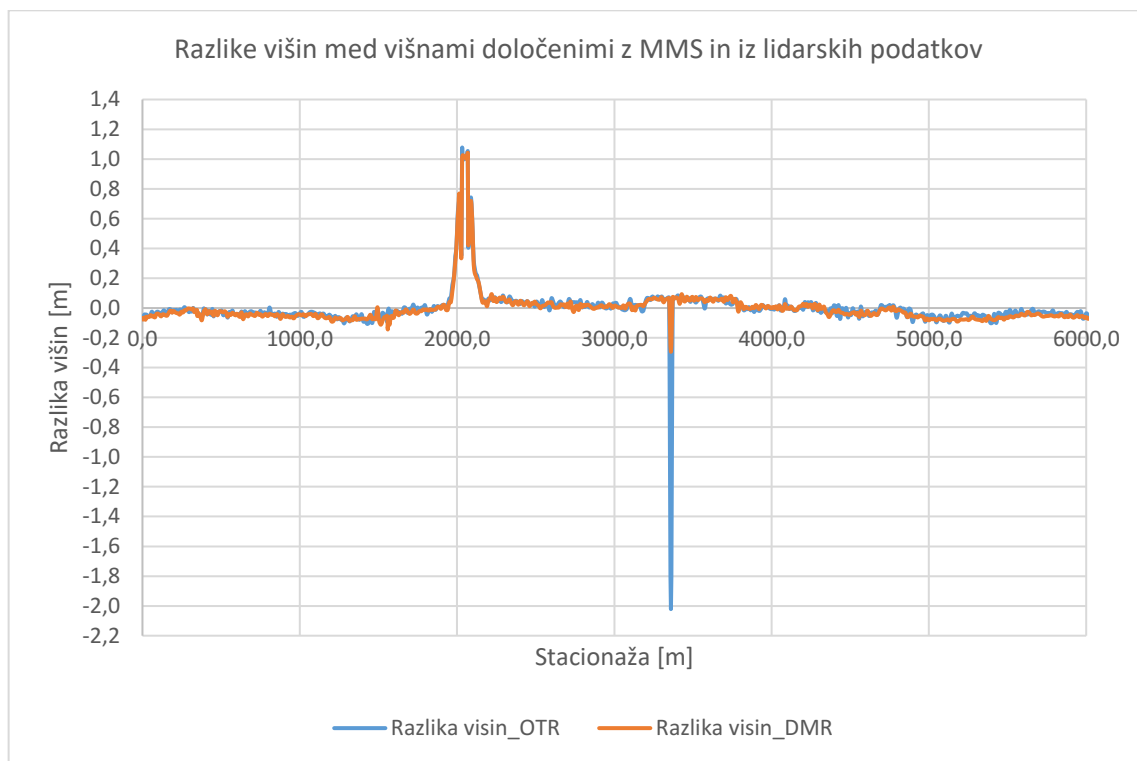
Preglednica 7: Vrednosti cenilk odstopanj.

Cenilka	Vrednost
Največja abs. razlika višin [m]	1,52
Standardni odklon [m]	0,270
Srednja vrednost [m]	0,017
Mediana [m]	-0,004
RMSE [m]	0,270

4.1 Vpliv različnih lidarskih podatkov na izračunane razlike višin

Na končne rezultate izračuna razlik višin zagotovo vplivajo tudi lidarski podatki. Primerjali smo, kakšne rezultate dobimo, če kot vhodni podatek namesto DMR1 vzamemo oblak točk reliefa (OTR). OTR je klasificiran oblak točk, ki predstavlja samo tla. Primerjave nismo izvedli za celotno območje obravnave, ampak smo izbrali le dva odseka, ki pa imata precej različno konfiguracijo terena. Izbrali smo dva testna odseka in namesto DMR1 kot vhodni lidarski podatek uporabili oblak točk reliefa (OTR). Problem oblaka točk reliefa je, da na mestih objektov, kjer laser ni prišel do tal, ostajajo praznine, za razliko od DMR1, kjer je bila na teh mestih izvedena interpolacija reliefa na osnovi vhodnih točk. Za oba odseka smo izvedli primerjavo višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz OTR, ter jih nato primerjali z rezultati, kjer smo kot vhodni lidarski podatek uporabili DMR1. Postopek izračuna razlik višin, kjer smo kot vhodni podatek vzeli OTR, je podan v prilogi B.

Kot prvi primer smo ponovno izbrali odsek 1078, ki poteka po ugodnem terenu za izvedbo GNSS meritev in tudi za izdelavo DMR. Območje je ravninsko in ni pokrito z vegetacijo. Na grafikonu 10 so prikazane razlike višin vzdolž stacionaže za oba niza vhodnih lidarskih podatkov.

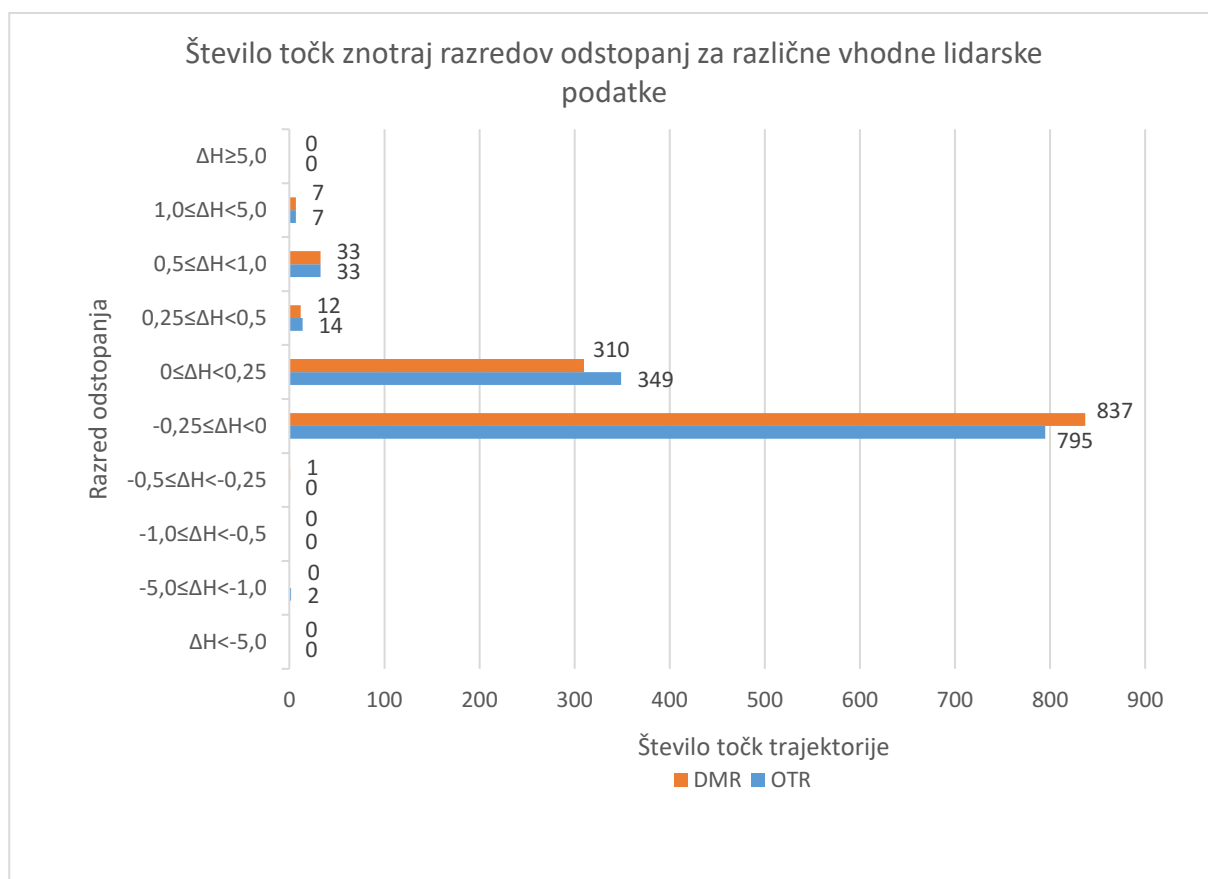


Grafikon 10: Razlike višin med višinami pridobljenimi z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov.

Nekoliko boljše rezultate dobimo, če kot vhodni podatek uporabimo DMR1 (preglednica 8). Standardni odklon v tem primeru znaša 0,160 m, v primeru OTR pa 0,186 m. Izračunali smo tudi RMSE oz. srednji kvadratni pogrešek. V primeru, ko je vhodni lidarski podatek OTR, znaša RMSE 0,187 m. Na podlagi te vrednosti smo ugotovili, da razlika višin v 35 primerih presega 3-kratno vrednost RMSE, kar pomeni, da imamo znotraj odseka 40 grobih napak. V primeru, ko je vhodni lidarski podatek DMR1, znaša RMSE 0,161 m, kar pomeni, da je prag grobih pogreškov preseglo 40 opazovanj. Te točke bi pri ponovnem izračunu odstranili s seznama vhodnih podatkov. Grafikon 11 prikazuje, kako so točke razvrščene po posameznih razredih odstopanj. V primeru, ko je vhodni podatek lidarski DMR1, kar 95,58 % točk pade v območje 0,25 m ali manj, v primeru OTR pade v to območje 95,33 % točk.

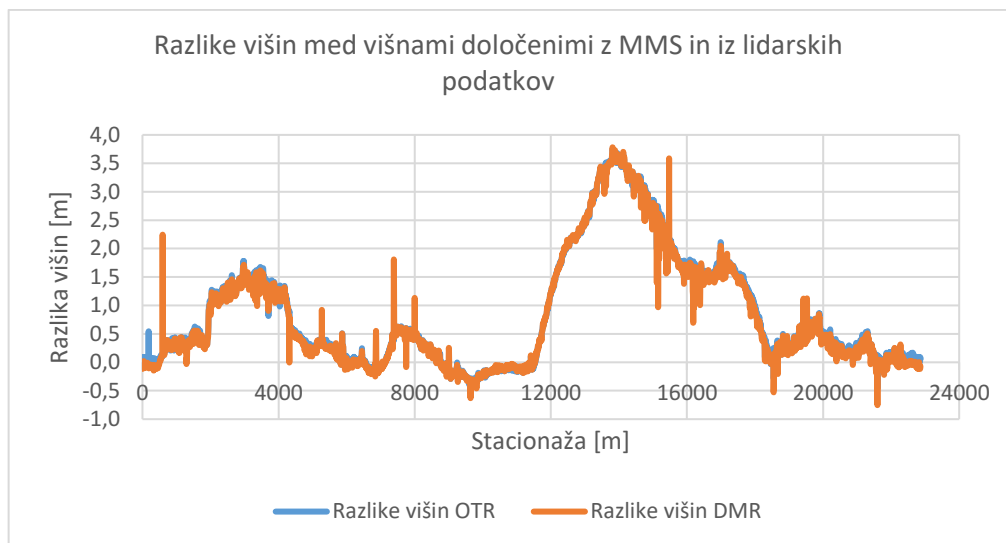
Preglednica 8: Vrednosti cenilk odstopanj za odsek 1078 na podlagi dveh različnih vrst lidarskih podatkov.

Cenilka	OTR	DMR1
Največja višinska razlika [m]	1,233	1,155
Standardni odklon [m]	0,186	0,160
Srednja vrednost [m]	0,013	0,009
Mediana [m]	-0,017	-0,025
RMSE	0,187	0,161



Grafikon 11: Število točk znotraj razredov odstopanj za različne vhodne lidarske podatke (Odsek 1078).

Za drugi primer smo izbrali odsek 1123. Odsek 1123 poteka po zahtevnejšem, hribovitem terenu, pokritem z gosto vegetacijo in občasnimi strmimi nakloni. Razlike višin so na tem območju precejšnje, srednja vrednost razlik višin znaša okoli 0,8 m (grafikon 12).

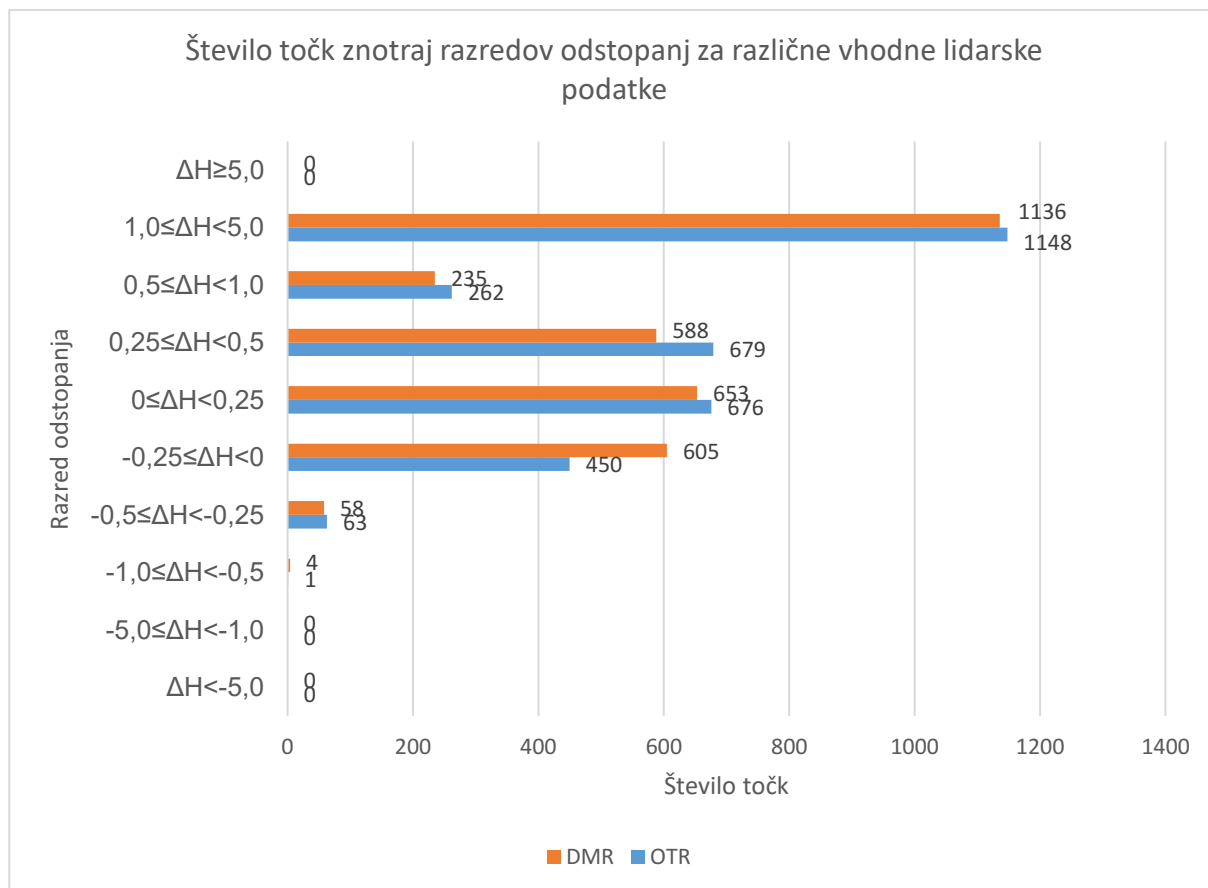


Grafikon 12: Razlike višin vzdolž osi za dva različna niza vhodnih lidarskih podatkov (OTR in DMR1).

Ponovno se lahko vprašamo o kakovosti višin, tako tistih, pridobljenih z mobilnim kartirnim sistemom, kot tistih, pridobljenih iz lidarskih podatkov. Vendar nas v tem delu zanima predvsem, kakšne so razlike višin glede na dva različna vira lidarskih podatkov. Tudi za odsek 1123 dobimo malenkost boljše rezultate, če kot vhodni podatek uporabimo DMR1 (preglednica 9). Standardni odklon v tem primeru znaša 0,997 m, v primeru, ko smo kot vhodni podatek uporabili OTR, pa 0,998 m centimetrov. V primeru, ko je vhodni lidarski podatek OTR, znaša RMSE 1,30 m. Iz vrednosti izračunanega RMSE lahko sklepamo, da med vrednostmi ni grobih napak, saj nobeno odstopanje ne presega 3-kratne vrednosti RMSE. Če je vhodni lidarski podatek DMR1, znaša RMSE 1,28 m. Tudi v tem primeru praga grobih pogreškov ni presegla nobena vrednost (razlika višin). Grafikon 13 prikazuje, kako so razvrščene vrednosti razlik višin po posameznih razredih odstopanj. Ko je vhodni lidarski podatek DMR1, v območje 0,25 m ali manj pade le 38,37 % točk. Podobno velja, če kot vhodni lidarski podatek vzamemo OTR, v tem primeru pade v območje 0,25 m ali manj 34,34 % vseh točk. Kar 35,01 % točk pade v deveti razred odstopanj, ki zajema vrednosti razlik višin med 1 in 5 metrov (vhodni podatek OTR). Nekaj manj točk pade v ta razred, če je vhodni podatek DMR1, in sicer 34,64 % (grafikon 13).

Preglednica 9: Vrednosti cenilk odstopanj za odsek 1123 na podlagi dveh različnih vrst lidarskih podatkov.

Cenilka	OTR	DMR1
Največja abs. višinska razlika [m]	3,755	3,782
Standardni odklon [m]	0,998	0,997
Srednja vrednost [m]	0,833	0,798
Mediana [m]	0,399	0,368
RMSE	1,300	1,277



Grafikon 13: Število točk znotraj razredov odstopanj za različne vhodne lidarske podatke.

Na podlagi majhnega testnega vzorca lahko sklepamo, da vhodni lidarski podatki na same razlike višin nimajo velikega vpliva saj se vrednosti cenilk odstopanj v obeh primerih gibljejo okoli podobnih vrednosti. Na dosego boljših rezultatov bi lahko vplivali drugače, npr. z boljšo opremo za določevanje položaja (boljši GNSS sprejemnik, boljši IMU,...), z boljšo metodo izdelave DMR1, s katero bi uspeli uspešno filtrirati vse talne in netalne točke idr.

4.2 Komentar rezultatov

Teren je na obravnavanem območju relativno raznolik in zahteven za izdelavo DMR-ja. Vključuje ravninska območja, terase, blaga nagnjena in strma pobočja, hribovita območja s strmimi nakloni, območja z nizko in visoko vegetacijo, ostre grebene, idr. Najboljše rezultate smo dosegli na ravninskih območjih brez vegetacije. Ravninska območja brez goste vegetacije predstavljajo najpreprostejše primere za izdelavo DMR, prav tako so to območja, ki omogočajo najnatančnejšo določitev položaja z GNSS meritvami. Najzahtevnejši primeri za izdelavo DMR so območja z zelo strmim terenom in gosto vegetacijo. Kljub temu, da je uporabljena metoda za izdelavo DMR1 relativno uspešna tudi na zahtevnih območjih, njena natančnost v ekstremnih primerih vseeno občutno pade.

Pri interpretaciji rezultatov analiz, opravljenih na podlagi DMR, je pomembno, da poznamo kakovost uporabljenega DMR. Kakovost bi lahko ocenili na podlagi referenčnih meritev. Sami referenčnih meritev nismo izvajali, imamo pa podatke o kakovosti georeferenciranja izdelkov LSS znotraj posameznih blokov snemanja. Kontrolo absolutne točnosti nadomrskih višin za DMR1, je izvedel Geodetski inštitut Slovenije na podlagi primerjave med terenskimi kontrolnimi točkami in modelom terena, izračunanim iz točk digitalnega modela reliefa (DMR1). Dobljena vrednost RMSE po zahtevah razpisne dokumentacije v višinskem smislu naj ne bi bila višja od 15 centimetrov (Triglav Čekada in Bric, 2015). V preglednici 10 so zapisana imena blokov, vključenih v našo analizo, število kontrolnih točk znotraj posameznega bloka, velikost testnega območja ter vrednosti RMSE za posamezni blok. Vidimo lahko, da vrednost RMSE nikjer ni presegla dovoljene vrednosti. Povprečna vrednost RMSE nadmorskih višin za uporabljene snemalne bloke znaša 8 centimetrov. V povprečju je bilo za vsak snemalni blok uporabljenih 129 kontrolnih točk.

Preglednica 10: Kontrola absolutne višinske točnosti nadmorskih višin.

Blok	B11	B12	B13	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37
Število KT	297	87	86	217	42	65	93	96	74	231
RMSE [m]	0,10	0,09	0,07	0,10	0,09	0,05	0,06	0,06	0,07	0,11

Rezultati kontrole absolutne višinske točnosti dajejo odlične rezultate, vendar se moramo zavedati, da ti podatki predstavljajo povprečno oceno točnosti višin znotraj posameznih blokov. Ker je znotraj območja posameznih blokov teren precej razgiban, ne moremo trditi, da je na območjih naših odsekov višinska točnost vedno znotraj predpisanih 15 centimetrov (RMSE). O tem bi se lahko prepričali le z oceno točnosti višin DMR1 na obravnavanem območju, za kar pa bi morali izvesti lokalno oceno kakovosti podatkov.

5 ZAKLJUČEK

V magistrskem delu smo analizirali skladnost višin, določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov. Območje primerjave je obsegalo več kot 1000 km državnih cest različnih karakteristik. Uporabili smo podatke kinematičnih GNSS/INS meritev mobilnega kartirnega sistema podjetja DFG CONSULTING, d.o.o. ter podatke aerolaserskega skeniranja Slovenije (ALS). Višine, določene na osnovi podatkov ALS, smo določili na podlagi digitalnega modela reliefa (DMR). Za primerjavo smo za dva odseka kot vhodni podatek uporabili tudi oblak točk reliefa (OTR). Razliko višin smo izračunali v programskem okolju FME Desktop.

Rezultati izračuna v prvem koraku so pokazali, da so razlike višin v nekaj manj kot 84 % manjše od 0,25 m. Standardni odklon je znašal 7,28 m, kar kaže na precejšnjo razpršenost podatkov. Rezultate smo podrobneje pregledali in ugotovili, da kljub visokemu odstotku točk, ki predstavljajo majhne razlike višin, številne točke precej odstopajo. Glavni razlog za to so bili različni grajeni objekti, kot so mostovi, nadvozi, podvozi in drugi objekti cestne infrastrukture. V ponovne izračuna smo te objekte izločili, saj izdelan DMR1 prikazuje teren brez grajenih objektov in zato točk, ki padejo v njihovo območje, v samem izračunu ni bilo smiselno upoštevati. Do večjih razlik je prišlo tudi na območjih, kjer so se zgodile konkretne fizične spremembe samega reliefa po izvedbi aerolaserskega skeniranja Slovenije, kot npr. izgradnja novega krožišča idr.

V drugem izračunu izračuna smo torej objekte cestne infrastrukture izločili iz izračuna, kar je predstavljalo približno 1,3 % podatkov. Največja sprememba je nastala v razredih največjih odstopanj ($\Delta H > 5$ m). Kar 86,5 % točk, ki so v prvi iteraciji padle v območje z absolutno razliko, večjo od 5 metrov, smo v drugem izračunu izločili. V nekaj več kot 84 % so razlike višin padle v območje 0,25 m ali manj. Standardni odklon je bil tokrat precej manjši in je znašal 0,48 m. Z drugim izračunom smo torej izločili večino večjih odstopanj. Tista, ki so ostala, predstavljajo nekatere točke, ki jih v ponovnem izračunu nismo uspeli zajeti s poligonskim slojem GJI, vse ostale točke pa so ostale na delu odseka 5703. V programu Inertial Explorer, ki je namenjen skupni obdelavi GNSS/INS meritev, smo na tem odseku preverili kakovost podatkov, pridobljenih s kinematičnimi GNSS/INS meritvami. Natančnost določitve položaja na osnovi GNSS-opazovanj je odvisna od kakovosti opazovanj in od geometrijske razporeditve opazovanih satelitov. Ugotovili smo, da je ocenjena natančnost določitve višin na območju odseka 5703 slaba, iz česar lahko sklepamo, da so bili prisotni nekateri slučajni ter sistematični vplivi na GNSS opazovanja. Odsek poteka po precej razgibanem terenu. Poleg tega se je snemalo v času olistane vegetacije, kar povzroča prekinitve sprejema signala satelitov GNSS-vpliv večpotja (»multipath«). V oteženih pogojih je bila precizna določitev položaja zgolj s sistemom GNSS otežena, v ta namen so se hkrati z GNSS-meritvami izvajale tudi meritve z inercialnimi senzorji, ki pa lahko zadovoljivo natančnost dosežejo le v omejenem časovnem intervalu brez sprejema GNSS-signala. Eden

izmed razlogov za velika odstopanja med višinami so torej zagotovo slabe natančnosti GNSS/INS-meritev. Na same vrednosti razlik višin pa zagotovo vpliva tudi kakovost izdelave DMR1 na območju obravnave. V tehničnih poročilih za posamezne bloke aerolaserskega snemanja imamo podatke le o povprečni oceni točnosti višin znotraj posameznih blokov snemanja, zato ne moramo z gotovostjo trditi, da te natančnosti veljajo tudi na območju naše obravnave. Kakovost uporabljenega DMR1 bi lahko ocenili na podlagi referenčnih meritev, vendar jih sami nismo izvajali. Glede na številne analize in raziskave lahko sklepamo, da je DMR na tem območju slabše določen, odsek namreč poteka po razgibanem terenu, obdanem z vegetacijo, uporabljeni algoritem pa ima na takšnih konfiguracijah terena težave z izdelavo DMR-ja (Kobler, 2011).

Kadar razlike višin presežejo 3-kratno vrednost RMSE, govorimo o grobih pogreških. V našem primeru je to vrednost preseglo 1,52 % točk trajektorije, vključenih v izračun. Pred naslednjim izračunom smo vse te točke izločili in nato ponovno izračunali razlike višin. Po tretjem izračunu nobena absolutna razlika višin ni presegla vrednosti 5,0 m. Absolutne razlike višin so v kar 86,4 % manjše od 0,25 m, kar predstavlja precej višji odstotek, kot smo si pričakovali pred začetkom izdelave magistrskega dela. Pri tem je potrebno poudariti tudi, da je samo obravnavano območje v večjem delu potekalo po zahtevnejšem terenu. V dobrih pogojih (ravninski, odprt teren,...) bi bilo ujemanje višin še boljše. Dober primer je bil odsek 1078, ki poteka v idealnih pogojih tako za izvedbo GNSS meritev kot tudi za izdelavo DMR1. Več kot 90 % izmerjenih točk se v tem primeru po višini razlikuje za manj kot 0,1 m.

Glede na dosedanje izkušnje, lahko trdimo, da absolutne vrednosti razlik višin, manjše od 0,25 m, predstavljajo zadovoljivo skladnost višin, pridobljenih iz meritev mobilnega kartirnega sistema in iz lidarskih podatkov. V uvodu smo govorili o možnosti skupne uporabe teh dveh virov podatkov. Podjetje DFG CONSULTING, d.o.o. v okviru projekta WideoCar s fotogrametričnimi postopki pridobiva/zajema najrazličnejše podatke o cestah. Eden izmed načinov določitve položaja objektov pa je določitev višine iz DMR, s čimer je omogočen hitrejši zajem objektov v cestnem in obcestnem prostoru. Realna natančnost višin objektov, določena s fotogrametričnimi postopki, znaša med 0,1 in 0,15 m v primeru dobro določene trajektorije, v primeru slabo določene trajektorije pa so natančnosti višin lahko tudi slabše od pol metra, kar pa v večini primerov za naročnike še vedno predstavlja zadovoljivo natančnost. Glede na opravljene analize v okviru te naloge lahko zaključimo, da bi bila skupna uporaba lidarskih podatkov ter podatkov pridobljenih z meritvami mobilnega kartirnega sistema zagotovo smiselna na izvenmestnih, ravninskih, in območjih z manj ovirami, kjer lahko dosežemo visoke natančnosti višin, določenih tako z mobilnim kartirnim sistemom kot tudi iz lidarskih podatkov.

VIRI

Uporabljeni viri

Berk, S., Komadina, Ž., Triglav, J. 2011. Analiza skladnosti D48/GK- in D96/TM-koordinat zemljiškokatastrskih točk v Pomurju. Geodetski vestnik 55, 2: 269-283.

Geodetski inštitut Slovenije. 2015. Izvedba laserskega skeniranja Slovenije. Blok 23 - Tehnično poročilo o izdelavi izdelkov.

http://gis.arso.gov.si/related/lidar_porocila/b_35_izdelava_izdelkov.pdf (Pridobljeno 13. 5. 2018.)

GURS. 2012. Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture.

http://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/struktura/GJI_izdaja_sifrant_in_struktura_2.pdf (Pridobljeno 10. 6. 2018.)

Hebel, M., Stilla, U. 2008. Pre-classification of points and segmentation of urban objects by scan line analysis of airborne LIDAR data. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Vol. XXXVII. Part B3a: 105-110.

Inertial Explorer. 2018. User manual. Revision 4. Calgary, Novatel Inc.

https://docs.novatel.com/Waypoint/Content/PDFs/Inertial_Explorer_User_Manual_OM-20000166.pdf (Pridobljeno 3. 2. 2018.)

Kerin, A. 2014. Uporaba posnetkov z brezpilotnega zračnega plovila za izdelavo digitalnega modela reliefa. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 126 str.

Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, I., Oštir, K., Džerovski, S. 2007. Repetitive interpolation: a robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain, Remote sensing of environment. 108, 1: 9-23.

Kobler, A. 2011. Nove metode za obdelavo podatkov letalskega laserskega skeniranja za monitoring gozdnih sistemov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 173 str.

Kosmatin Fras, M. 2009. Zračno lasersko skeniranje. Gradivo za strokovne izpite. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 15 str.

Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. Geodetski vestnik 47, 4: 404-413.

Kozmus, K. 2009. Združeni sistemi GNSS/INS za neprekinjeno navigacijo. Geodetski vestnik 53, 2: 239-252.

Kozmus, K. 2010. Razvoj postopkov obdelave opazovanj GNSS za navigacijo oseb v oteženih pogojih. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 154 str.

Kuhar, M., Berk, S., Koler, B., Medved, K., Omang, O., Solheim, D. 2011. Vloga kakovostnega višinskega sistema in geoida za izvedbo GNSS-višinomerstva. Geodetski vestnik 55, 2: 226-234.

Mongus, D., Žalik, B. 2012. Parameter-free ground filtering of LIDAR data for automatic DTM generation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 67, 1: 1-12

Mongus, D., Triglav Čekada, M., Žalik, B. 2013. Analiza samodejne metode za generiranje digitalnih modelov reliefa iz podatkov lidar na območju Slovenije. Geodetski vestnik 57, 2: 245-259.

Omrežje SIGNAL, Služba za GPS. 2018.
<http://www.gu-signal.si/> (Pridobljeno 30. 4. 2018.)

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU: 250 str.

Pegan Žvokelj, B., Bric, V., Triglav Čekada, M. 2014. Lasersko skeniranje Slovenije. Geodetski vestnik 58, 2: 349-351.

Pavlovčič Prešeren, P., Mencin, A., Stopar B. 2010. Analiza preizkusa instrumentarija GNSS-RTK po navodilih standarda ISO 17123-8. Geodetski vestnik 54, 4: 607-626.

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2004. Izračun položaja GPS-satelita iz podatkov oddanih efemerid. Geodetski vestnik 48, 2: 151-166.

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2005. Izračun položaja GPS-satelita iz podatkov preciznih efemerid. Geodetski vestnik 49, 2: 177-190.

Ranfl, U. 2009. Uporaba Kalmanovega filtra pri povezavi različnih senzorjev za določevanje položaja v cestnem mobilnem kartirnem sistemu. Magisterska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Ranfl): 123 str.

Safe Software, 2012. Spatial ETL.

<http://www.safe.com/> (Pridobljeno 12. 2. 2018.)

Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P., Kozmus, K. 2006. GPS v geodetski praksi. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 50 str.

Triglav Čekada, M. 2009. Optimizacija metodologije obdelave in analize natančnosti letalskega laserskega skeniranja pri zajemu geodetskih podatkov za lokalno prostorsko planiranje. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Triglav Čekada): 231 str.

Triglav Čekada, M. 2010. Zračno lasersko skeniranje in nepremičninske evidence. Geodetski vestnik, 54, 2: 181–194.

Triglav Čekada, M., Bric, V., Oven, K. 2012. Prvo vsedržavno lasersko skeniranje Slovenije. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012: 191–196.

Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015. Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. Geodetski vestnik 59, 3: 586–592.

Triglav Čekada, M. 2016. Lasersko skeniranje Slovenije. Geografski obzornik 3, 4: 44–48.

Triglav Čekada, M. 2017. Fotogrametrični in lidarski oblaki točk. Geografski vestnik 89, 1: 115–129

Urbančič, T., Grigillo, D. 2015. Lidar in uporaba laserskega skeniranja v geodeziji. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 50 str.

Urbančič, T. 2017. Ocenjevanje geometrične podobnosti oblakov točk aerolaserskega skeniranja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 274 str.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: PROGRAMSKA KODA ZA IZRAČUN RAZLIK VIŠIN (vhodni lidarski podatek je DMR)

PRILOGA B: PROGRAMSKA KODA ZA IZRAČUN RAZLIK VIŠIN (vhodni lidarski podatek je OTR)

PRILOGA A: PROGRAMSKA KODA ZA IZRAČUN RAZLIK VIŠIN (vhodni lidarski podatek je DMR1)

```
SET INPUT=.\10_VhodniPodatki\10_Odseki
rem SET LASGRID=.\10_VhodniPodatki\20_Mreza_lidar
SET FMEPRJ=.\15_FmeProj
SET WORK=.\20_Work
SET TRJ=.\10_VhodniPodatki\50_Trj
SET GJI=.\10_VhodniPodatki\15_ObjektiGJI

SET REZULTATI=.\50_Rezultati
SET STATISTIKA=.\50_Rezultati\Statistika
SET STATISTIKA_Abs=.\50_Rezultati\Statistika\AbsolutneVrednosti
SET RAZLIKE=.\50_Rezultati\Razlike

FOR %%F IN ("%INPUT%\*.shp") DO (

copy %INPUT%\%%~nF.shp %WORK%\
copy %INPUT%\%%~nF.dbf %WORK%\
copy %INPUT%\%%~nF.shx %WORK%\

REM Kličemo FME: izrežemo območja objektov GJI
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\GJI_clip2.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_5 %WORK%\%%~nF.shp^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3
"P:\UraPrj\Razno\NAN_Magisterij\FME\10_VhodniPodatki\15_ObjektiGJI\Objekti_2016_vpis_v_GJI.shp
"^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

REM Kličemo FME: kreiranje bufferja okrog osi
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\1_Buffer.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF.shp^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

md %REZULTATI%\%%~nF

REM Kopiramo output FME (_buf.shp) na imenik z rezultati
copy %WORK%\%%~nF_buf.shp %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_buf.shx %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_buf.dbf %REZULTATI%\%%~nF\

del %WORK%\%%~nF.shp
del %WORK%\%%~nF.dbf
del %WORK%\%%~nF.shx

REM Kličemo FME: kreiranje batch datoteke s seznamom DMR datotek (SpatialFilter)
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\2_SpatialFilterDMR.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_buf.shp^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3
"P:\UraPrj\Razno\NAN_Magisterij\FME\10_VhodniPodatki\20_Mreza_lidar\LIDAR_FISHNET_D48GK.shp"^
```

```
--DestDataset_TEXTLINE "%WORK%"

copy %WORK%\%%~nF_buf_DmrLista.bat %RESULTATI%\%%~nF\

rem Zaženemo batch file, ki ga je generiral FME: kopiranje dmr datotek za buffer v work imenik
%RESULTATI%\%%~nF\%%~nF_buf_DmrLista.bat

REM Kličemo FME: kreiranje clipa (Clipper)
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\3_clipperDMR.fmw^
    --SourceDataset_POINTCLOUDXYZ_4 %WORK%\*.xyz^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3 %WORK%\%%~nF_buf.shp^
    --DestDataset_POINTCLOUDXYZ .

copy %WORK%\%%~nF_buf.xyz %RESULTATI%\%%~nF\

rem del %WORK%\*.xyz

REM Kopiramo trajektorijo iz imenika vhodnih podatkov v work
copy %TRJ%\%%~nF_trj.shp %WORK%\
copy %TRJ%\%%~nF_trj.dbf %WORK%\
copy %TRJ%\%%~nF_trj.shx %WORK%\

REM Clipamo trjaketorijo na območje nF_buf

"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\4_TrjClipper.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3 %WORK%\%%~nF_trj.shp^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_buf.shp^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip.shp %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip.dbf %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip.shx %RESULTATI%\%%~nF\

REM Kličemo FME: kreiranje digitalnega modela reliefa iz clipanih LAS datotek ter izračun
višiniskih razlik(Surface Modeler)

"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\5_SurfaceModellerDMR.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_trj_clip.shp^
    --SourceDataset_POINTCLOUDXYZ_3 %WORK%\%%~nF_buf.xyz^
    --DestDataset_ESRISHAPE .^
    --DestDataset_ESRISHAPE_4 .

REM Kopiramo višine spuščene na DEM v mapo Rezultati
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_DEM_dmr.shp %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_DEM_dmr.dbf %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_DEM_dmr.shx %RESULTATI%\%%~nF\

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.shp %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.dbf %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.shx %RESULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.shp %RAZLIKE%
```

```
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.dbf %RAZLIKE%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.shx %RAZLIKE%

"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\6_StatisticCalculatorDMR.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr.shp^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr_stat.shp %STATISTIKA%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr_stat.dbf %STATISTIKA%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr_stat.shx %STATISTIKA%

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr_stat_Abs.shp %STATISTIKA_Abs%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr_stat_Abs.dbf %STATISTIKA_Abs%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_dmr_stat_Abs.shx %STATISTIKA_Abs%

del /Q %WORK%\*.*

pause
)
```

PRILOGA B: PROGRAMSKA KODA ZA IZRAČUN RAZLIK VIŠIN (vhodni lidarski podatek je OTR)

```
SET INPUT=.\10_VhodniPodatki\10_Odseki
rem SET LASGRID=.\10_VhodniPodatki\20_Mreza_lidar
SET FMEPRJ=.\15_FmeProj
SET WORK=.\20_Work
SET TRJ=.\10_VhodniPodatki\50_Trj
SET GJI=.\10_VhodniPodatki\15_ObjektiGJI

SET REZULTATI=.\50_Rezultati
SET STATISTIKA=.\50_Rezultati\Statistika
SET STATISTIKA_Abs=.\50_Rezultati\Statistika\AbsolutneVrednosti
SET RAZLIKE=.\50_Rezultati\Razlike

FOR %%F IN ("%INPUT%\*.shp") DO (

copy %INPUT%\%%~nF.shp %WORK%\
copy %INPUT%\%%~nF.dbf %WORK%\
copy %INPUT%\%%~nF.shx %WORK%\

REM Kličemo FME: izrežemo območja objektov GJI
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\GJI_clip2.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_5 %WORK%\%%~nF.shp^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3
"P:\UraPrj\Razno\NAN_Magisterij\FME\10_VhodniPodatki\15_ObjektiGJI\Objekti_2016_vpis_v_GJI.shp
"^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

REM Kličemo FME: kreiranje bufferja okrog osi
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\1_Buffer.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF.shp^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

md %REZULTATI%\%%~nF

REM Kopiramo output FME (_buf.shp) na imenik z rezultati
copy %WORK%\%%~nF_buf.shp %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_buf.shx %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_buf.dbf %REZULTATI%\%%~nF\

del %WORK%\%%~nF.shp
del %WORK%\%%~nF.dbf
del %WORK%\%%~nF.shx

REM Kličemo FME: kreiranje batch datoteke s seznamom LAS datotek (SpatialFilter)
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\2_SpatialFilter.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_buf.shp^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3
"P:\UraPrj\Razno\NAN_Magisterij\FME\10_VhodniPodatki\20_Mreza_lidar\LIDAR_FISHNET_D48GK.shp"^
```

```
--DestDataset_TEXTLINE "%WORK%"

copy %WORK%\%%~nF_buf_lasLista.bat %REZULTATI%\%%~nF\

pause

rem Zaženemo batch file, ki ga je generiral FME: kopiranje las datotek za buffer v work imenik
%REZULTATI%\%%~nF\%%~nF_buf_lasLista.bat

REM Kličemo FME: kreiranje clipa (Clipper)
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\3_clipper.fmw^
    --SourceDataset_LAS %WORK%\*.zlas^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_buf.shp^
    --DestDataset_LAS .

copy %WORK%\%%~nF_buf.las %REZULTATI%\%%~nF\

rem del %WORK%\*.zlas

REM Kopiramo trajektorijo iz imenika vhodnih podatkov v work
copy %TRJ%\%%~nF_trj.shp %WORK%
copy %TRJ%\%%~nF_trj.dbf %WORK%
copy %TRJ%\%%~nF_trj.shx %WORK%

REM Clipamo trjaketorijo na območje nF_buf
"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\4_TrjClipper.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_3 %WORK%\%%~nF_trj.shp^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_buf.shp^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip.shp %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip.dbf %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip.shx %REZULTATI%\%%~nF\

REM Kličemo FME: kreiranje digitalnega modela reliefa iz clipanih LAS datotek ter izračun
višinskih razlik(Surface Moddeler)

"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\5_SurfaceModeller.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE %WORK%\%%~nF_trj_clip.shp^
    --SourceDataset_LAS %WORK%\%%~nF_buf.las^
    --DestDataset_ESRISHAPE .^
    --DestDataset_ESRISHAPE_4 .

REM Kopiramo višine spuščene na DEM v mapo Rezultati
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_DEM.shp %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_DEM.dbf %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_DEM.shx %REZULTATI%\%%~nF\

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.shp %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.dbf %REZULTATI%\%%~nF\
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.shx %REZULTATI%\%%~nF\
```

```
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.shp %RAZLIKE%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.dbf %RAZLIKE%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.shx %RAZLIKE%

"C:\Program Files\FME\fme.exe" %FMEPRJ%\6_StatisticCalculator.fmw^
    --SourceDataset_ESRISHAPE_2 %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin.shp^
    --DestDataset_ESRISHAPE .

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_stat.shp %STATISTIKA%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_stat.dbf %STATISTIKA%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_stat.shx %STATISTIKA%

copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_stat_Abs.shp %STATISTIKA_Abs%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_stat_Abs.dbf %STATISTIKA_Abs%
copy %WORK%\%%~nF_trj_clip_RazlikaVisin_stat_Abs.shx %STATISTIKA_Abs%

del /Q %WORK%\*. *

pause
)
```